

EFEITO DO GRAU DE HIDRATAÇÃO, TIPO DE ADIÇÃO MINERAL E GRAU DE SATURAÇÃO DO CONCRETO NAS LEITURAS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA.

Analiét Calvo Valdés (Mestranda PPGECC-UFPR); analietcv@yahoo.es.
Fernanda Gadler (Mestranda PPGECC-UFPR); fernandagadler@gmail.com.
Isaac Aguiar Oliveira (Mestranda PPGECC-UFPR); zacaguiar@gmail.com.
Marcelo Henrique Farias de Medeiros (Professor Doutor PPGECC-UFPR);
medeiros.ufpr@gmail.com.

RESUMO: As estruturas de concreto, por meio da interação que possuem com o meio ambiente, estão submetidas a diversos tipos de agentes físicos e químicos, que fazem com que as obras se degradem ao longo do tempo. A tendência atual com relação à manutenção de estruturas e prevenção de patologias é usar, conjuntamente com as inspeções visuais, ensaios químicos, físico-químicos e até microestruturais que permitam caracterizar o material e monitorar os efeitos da interação do mesmo com o meio em sua volta. Um dos principais parâmetros utilizados para o monitoramento de estruturas é a resistividade elétrica. Este parâmetro sofre influência de diversos fatores como, por exemplo, grau de saturação, grau de hidratação e composição química do material. Este trabalho estuda o efeito da variação de tais fatores na resistividade, para uma umidade relativa constante e em condições estacionárias típicas de uma situação de imersão, além da verificação dos mesmos com relação à absorção de água por capilaridade usando baixas relações a/c, tempos de cura extensos (hidratação alta) e adição de minerais reativos como a cinza volante e sílica de casca de arroz.

Palavras-chave: resistividade elétrica, absorção, resistência, cinza volante, sílica de casca de arroz.

Effect of the degree of hydration, type of mineral addition and degree of saturation of the concrete in the electrical resistivity readings

ABSTRACT: Concrete structures, through interaction with the environment, are exposed to many types of physical and chemical agents, which cause degradation of constructions over

time. The current trend in relation to the maintenance of structures and prevention of pathologies is to use, together with the visual inspections, chemical, physical-chemical and even microstructural tests that allow to characterize the material and monitor the effects of its interaction with the environment. One of the main parameters used for the monitoring of structures is the electrical resistivity. This parameter is influenced by several factors, such as degree of saturation, degree of hydration and chemical composition of the material. This research evaluates the effect of the variation of such factors on the resistivity, for a constant relative humidity and in stationary conditions typical of an immersion situation, besides the verification of the same ones with respect to the absorption of water by capillarity using low water cement ratios, extensive curing time (high hydration) and addition of reactive minerals such as fly ash and rice husk silica.

Keywords: Electrical resistivity, absorption, resistance, fly ash, rice husk silica

1. INTRODUÇÃO

As estruturas de concreto em condições de serviço estão submetidas a diversos tipos de agentes físicos e químicos, que fazem com que as obras se degradem ao longo do tempo. Uma consequência possível desta interação é a corrosão das armaduras em estruturas de concreto armado, que tem sido citada como a principal causa da sua deterioração (MEHTA, 1992).

Em diversos países, os gastos anuais com reparos, recuperações e reposições de elementos estruturais afetados por corrosão da armadura são expressivamente elevados, e os prejuízos econômicos e sociais são grandes (CASCUDO, 1991; HELENE, 1993). Neste contexto o monitoramento e prognóstico das estruturas de concreto armado é uma ferramenta útil. Para fins de monitoramento, além dos ensaios mecânicos, pode-se optar pelos ensaios químicos, físico-químicos e até microestruturais, ensaios estes que permitem analisar com maior grau de confiabilidade as consequências da interação entre o material e o ambiente (BERTOLINI, 2006).

Um dos principais parâmetros utilizados para o monitoramento da corrosão é a resistividade elétrica, que muitas vezes é decisiva para se estimar a velocidade de corrosão (BERTOLINI, 2006; MEDEIROS, 2001). A resistividade do concreto é uma propriedade de transporte do material que têm influência significativa na durabilidade e desempenho em longo prazo da estrutura de concreto armado. Em concreto, as propriedades de transporte estão diretamente relacionadas à rede de poros capilares dentro da matriz de cimento, que

controla a penetração da água, a perda de umidade, a difusão de gases como o CO₂ e a entrada de espécies iônicas agressivas (MEDEIROS, 2001; MCCARTER *et al.*, 2009).

Na prática para o monitoramento de estruturas de concreto armado, a medida da resistividade é associada a outras técnicas de avaliação da estrutura como, por exemplo, a medida do potencial eletroquímico estabelecido no sistema armadura-concreto. Em geral, admite-se que a corrosão da armadura é certa e deve apresentar taxa elevada quando a resistividade elétrica do concreto está baixa e a medida do potencial indica a sua despassivação (ARAUJO *et al.*, 2014).

A baixa resistividade do concreto está relacionada também à rápida penetração de cloretos. Adicionalmente os mapas de resistividade podem mostrar as áreas mais porosas, nas quais a penetração de agentes agressivos provavelmente acontecerá de maneira mais rápida e a taxa de corrosão poderá ser mais alta. Em consequência, medidas preventivas podem ser tomadas a partir dessa informação (C. ANDRADE *et al.*, 2000). A norma AASHTO T358 estabelece que para valores de resistividade menores do que 5 kΩ cm a taxa de corrosão da armadura é provavelmente alta e para valores maiores do que 20 kΩ cm são baixas (DODDS *et al.*, 2017).

Depois da ocorrência das manifestações provenientes da corrosão, a resistividade elétrica é relevante para determinar as possíveis ações de manutenção. Desse modo, as medidas de resistividade elétrica podem fornecer informações importantes, indicando as áreas onde a corrosão é mais forte em uma estrutura inspecionada (C. ANDRADE *et al.*, 2000). Ainda, a resistividade elétrica do concreto pode ser considerada para modelar a vida útil de estruturas de concreto devido à praticidade de execução da técnica de medição a qual pode ser repetida com frequência sem afetar a integridade física da estrutura devido à sua natureza não destrutiva. Além disso, o ensaio de resistividade tem um baixo custo e é de fácil implementação. Dessa forma, a resistividade elétrica é uma medida interessante para controle da qualidade do concreto (MEDEIROS-JUNIOR *et al.*, 2015). De qualquer forma, é importante reforçar que a interpretação dos dados coletados requer experiência, já que a resistividade do concreto é influenciada por muitos fatores, tais como: umidade, teor de sais, temperatura, proporção da mistura, materiais que constituem o concreto, dimensões da peça, densidade e localização da armadura (MEDEIROS, 2001).

Ainda, através da medição da variação da resistividade elétrica é possível avaliar, além da probabilidade de corrosão na estrutura, as mudanças na microestrutura do concreto. Essas mudanças podem ser relacionadas às adições utilizadas ou até mesmo ao

grau de hidratação que é correlacionado com a idade da amostra. O volume da água evaporável na pasta em um concreto saturado varia de aproximadamente 60% na hora da mistura para aproximadamente 40% quando o cimento está completamente hidratado. Esta água contém íons, primeiramente Na^+ , K^+ , Ca^{++} , SO_4^- e OH^- , cujas concentrações variam com o tempo. A concentração de alguns íons aumenta enquanto que a de outros diminui. Assim, com a evolução da hidratação a porosidade vai diminuindo e os vazios, que inicialmente eram ocupados pelo eletrólito, vão sendo preenchidos pelos compostos que se formam no decorrer do tempo (MONFORE, 1968).

Neste sentido, um estudo que avaliou o efeito das adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais, concluiu que, em função da hidratação e densificação existe um incremento na resistividade elétrica dos concretos, em maior ou menor intensidade. O incremento no valor da resistividade está relacionado ao tipo de adição ou de cimento (MEDEIROS JUNIOR *et al.*, 2014). As adições minerais alteram significativamente a microestrutura da matriz de cimento devido aos efeitos pozolânicos e microfiller que apresentam. Estes materiais ao provocar o refinamento da estrutura dos poros da matriz e, especificamente, no caso dos materiais pozolânicos, diminuir a concentração iônica da solução influenciam na resistividade, influenciam na resistividade. O refinamento da estrutura dos poros é resultado da reação das adições pozolânicas com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e com a água formando gel C-S-H o que torna o material mais denso. Essa densificação da matriz e do aumento da quantidade de poros de menores diâmetros provavelmente mais tortuosos e descontínuos, dificulta a condução da corrente através do concreto e, portanto aumentam a resistividade elétrica (SANTOS, 2006). Alguns autores destacam maiores valores de resistência à compressão e resistividade elétrica muito maiores do que a mistura de referência, em traços com incorporação de até 30% de adições minerais. Os autores ressaltam ainda que, com o aumento do percentual de incorporação, de 10% para 20% de cinza de casca de arroz, houve um aumento de quase 100% nos valores de resistividade elétrica (GASTALDINI *et al.*, 2009). De qualquer forma, é importante destacar que, segundo a literatura (RAMEZANIANPOUR *et al.*, 2011), não é recomendado usar a resistividade elétrica como indicador de resistência à compressão. Isso se deve ao fato de que, mesmo em concretos com materiais similares, diferentes relações podem ser encontradas, geralmente devido ao fato da diferença entre os mecanismos de resistência à compressão e resistividade elétrica.

Como já mencionado, a relação água/cimento influencia consideravelmente a estrutura porosa da pasta de cimento, especificamente no volume total de poros e na quantidade de poros de maiores diâmetros (SILVA, 2016; SANTOS, 2006). A água em excesso na mistura do concreto, após a solidificação, tende a evaporar fazendo do poro capilar uma via de acesso ao interior da peça de concreto (FRIZZO, 2001). Logo, quando a porosidade for alta, a resistividade do material tende a ser alta para concretos com baixa umidade, devido à redução da quantidade de eletrólito. E quando o concreto estiver saturado, esta alta porosidade reduz a sua resistividade deixando-o mais condutivo, pois a água e os íons liberados pela dissolução dos minerais do próprio concreto formam uma solução condutiva (ABREU, 1998). Sendo assim, para uma umidade relativa constante e em condições estacionárias, a resistividade do concreto é aumentada usando baixas relações a/c, tempos de cura extensos (hidratação avançada) ou pelo uso de adições minerais reativos como escórias de alto forno, cinza volante ou sílica fume (C. ANDRADE *et al.*, 2000). Quanto ao grau de saturação na rede de poros capilares do concreto, este varia em função das condições atmosféricas do ambiente no qual está exposto. Considerando que a passagem de corrente pelo concreto depende do teor de eletrólito contido em seus poros, alterações no teor de umidade da matriz acarretarão em alterações na resistividade elétrica do concreto (SILVA, 2016).

Diante das hipóteses levantadas e discutidas na literatura, o presente trabalho pretende contribuir para o melhor entendimento do comportamento da resistividade do concreto exposto a diferentes níveis de saturação e hidratação, além de verificar a influência das adições minerais neste parâmetro.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho tem como foco testar a sensibilidade do ensaio de resistividade elétrica quanto ao avanço da hidratação e quanto ao grau de saturação do concreto, que variou através da disposição dos corpos de prova a ambiente com níveis diferentes de umidade relativa do ar.

Em função do foco apresentado, as variáveis independentes deste trabalho são:

- Tempo de cura: (cinco níveis - 3, 7, 28, 63 e 91 dias);
- Adição pozolânica: (dois tipos: cinza volante e sílica de casca de arroz, ambas utilizadas com teor de incorporação de 30% em substituição parcial do cimento

Portland nos concretos produzidos) - (três níveis - referência sem adição, substituição do cimento em 30% de cinza volante e substituição do cimento em 30% de sílica de casca de arroz).

As variáveis dependentes são os ensaios propriamente ditos, realizados no experimento, que estão descritos a seguir:

- Resistência à compressão axial nas cinco idades;
- Absorção de água por sucção capilar;
- Absorção de água por imersão;
- Resistividade do concreto.

Como parâmetros fixados, pode-se citar o traço do concreto (1 : 2,70 : 3,20), relação água/cimento de 0,58 e consistência medida pelo abatimento do tronco de cone de (100 ± 20) mm. Para produção dos concretos foi utilizado cimento tipo CPII-F, areia média natural, brita 1 e água potável, além das adições (cinza volante e sílica de casca de arroz). Além destes, é importante ressaltar que foi utilizado também aditivo superplasticante, condicionado à avaliação do abatimento estabelecido, nos teores de 0,5%, 0,75% e 1,0%, para o concreto de referência, o concreto com adição de cinza volante e o concreto com adição de sílica de casca de arroz, respectivamente.

Para realização dos ensaios foram moldados seis corpos de prova cilíndricos (10cm x 20cm) para cada tipo de concreto e idade de avaliação, sendo 3 utilizados para medição da resistência à compressão e 3 para os ensaios de absorção por sucção capilar e absorção por imersão (que foram medidos no mesmo corpo de prova). A medida de resistividade foi realizada neste último grupo de 3 corpos de prova onde foram feitas as medições de absorção.

O procedimento para realização do ensaio de absorção por sucção capilar seguiu as recomendações da NBR 9779/2012, sendo que, a secagem inicial em estufa, até constância de massa, foi realizada a uma temperatura de 60°C, para que não houvessem danos à microestrutura do concreto. Depois da finalização das leituras do ensaio de absorção por sucção capilar, os corpos de prova foram acondicionados em câmara seca, com temperatura e umidade controlada, até secagem completa verificada através de constância de massa. Depois de secos, os corpos de prova foram submergidos em água para determinação da absorção por imersão, conforme diretrizes da NBR 9778/2005.

Contabilizando apenas a duração dos dois ensaios de absorção, sem contar o tempo de secagem em estufa até constância de massa, foram decorridos 6 dias (72 horas para

cada ensaio). Sendo assim, a avaliação da absorção (tanto por sucção quanto por imersão) nos corpos de prova de idade de 3 e 7 dias foi comprometida, já que o tempo de ensaio é muito próximo à idade do concreto a ser ensaiado. Deste modo, o resultado do ensaio de absorção pode não ser assertivo, já que as reações de hidratação foram alteradas, inclusive possivelmente interrompidas pela secagem em estufa. Por conta disso, as medidas de absorção foram avaliadas nos corpos de prova com idade a partir de 28 dias. De qualquer forma, é importante ressaltar que as leituras de resistividade foram realizadas em todas as idades, normalmente, nos corpos de prova que estavam acondicionados em câmara úmida (assim como os demais ensaiados quanto à resistência à compressão), com temperatura e umidade controladas (23°C e 95%, respectivamente), sendo efetuada a medição nas idades pré-determinadas até os 91 dias de idade.

Deste modo, o acompanhamento da resistividade elétrica dentro da câmara úmida determinou o monitoramento do efeito do avanço da hidratação. Já o efeito do grau de saturação, foi avaliado através da medida da resistividade elétrica no estado seco e posteriormente nas medições realizadas à medida que o concreto foi absorvendo água. Com esses dados, foi possível a realização de curvas de saturação e hidratação, avaliando inclusive o efeito das duas adições, através das medidas de resistividade elétrica.

2.2 Resistividade do concreto

As leituras de resistividade foram realizadas com o equipamento Resipod da Proceq, de fabricação suíça. O método de ensaio foi o de medição de campo para solos, conhecido como Sonda Wenner, ou método de quatro pontos. Normatizado pela ASTM G-57 (2012), este método é um procedimento que consiste na medição da resistividade elétrica entre as faces opostas de uma unidade de material (ASTM G-57, 2012). Contudo, aplica-se atualmente em estruturas de concreto.

A sonda utilizada consiste em quatro eletrodos firmemente fixados para manter o espaçamento entre eles. Cada um dos eletrodos faz contato com a superfície do concreto através de um eletrólito condutivo. Conforme recomenda C. Andrade et al. (2000), antes das medições serem tomadas, a superfície do concreto foi levemente umedecida para promover ou melhorar o contato com o eletrodo, para isto, foram feitos contatos rápidos com uma esponja molhada sobre a superfície na qual foram feitas as medições. Ainda, foram feitas 6

leituras em cada corpo de prova, sendo determinado o valor médio das mesmas, de forma a obter um conjunto representativo de dados.

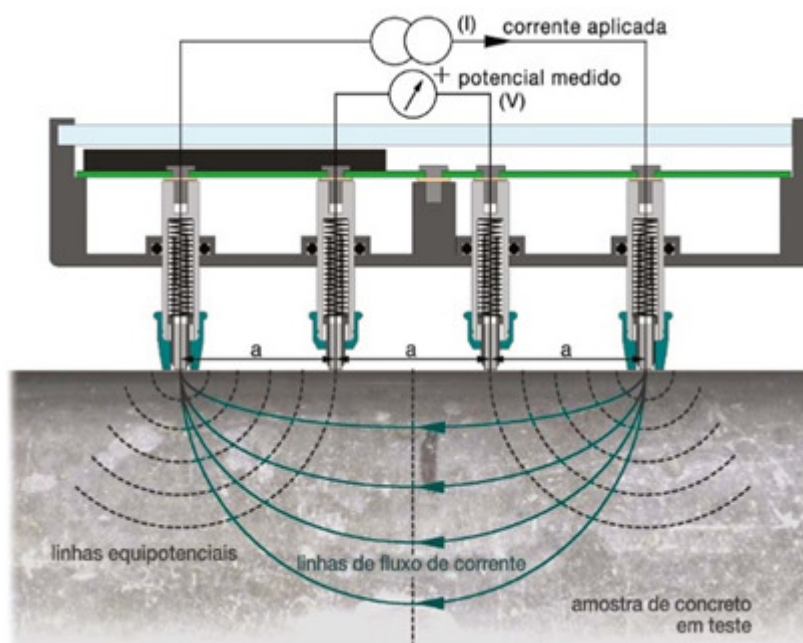


Figura 1 - Princípio de medição - Sonda Wenner

3. RESULTADOS

Para análise dos dados deste trabalho foi utilizada como ferramenta estatística o Teorema do Limite Central e a Análise Múltipla das Médias para constatação se há ou não influência e diferenças significativas das variáveis dependentes e independentes.

Os resultados das Resistividades Elétricas ($\Omega.m$) e Resistências à Compressão (MPa) dos cp's Referência, com adição de Cinza Volante e com adição de Sílica de Casca de Arroz foram coletados aos 7, 28, 63 e 91 dias, Figuras 2 e 3.

A Figura 2 apresenta os resultados das medições de Resistividade Elétrica ($\Omega.m$). Para os cp's referência há um aumento dos valores da resistividade até a idade de 63 dias, a partir desta idade foi constatado que os valores são estatisticamente iguais não apresentando variação significativa. Para os cp's com adição de cinza volante há diferenças significativas das médias para todas as idades, a maior média aferida foi aos 91 dias, 10,13 $\Omega.m$, sabendo que este tipo de adição possui reações tardias talvez necessitasse aumentar o tempo de análise, fato que será levado em consideração em trabalhos futuros. Para os

cp's com adição de sílica de casca de arroz há diferenças significativas das médias para todas as idades, a maior média aferida foi aos 91 dias, 34,28 $\Omega.m$.

A Figura 3 apresenta os resultados da Resistência à Compressão (MPa). Para os cp's referência até a idade de 28 dias há diferenças significativas das médias entre as idades, a partir desta idade os valores aferidos apresentaram-se estatisticamente iguais não apresentando variações significativas. Para os cp's com adição de cinza volante as médias a partir da idade de 63 dias apresentaram-se estatisticamente iguais, atingindo limite médio de resistência mais tardio que os cp's referência. Para os cp's com adição de sílica de casca de arroz, todas médias ao longo das 4 idades, apresentaram-se significativas, a maior resistência média foi aferida aos 91 dias, 59,20 MPa.

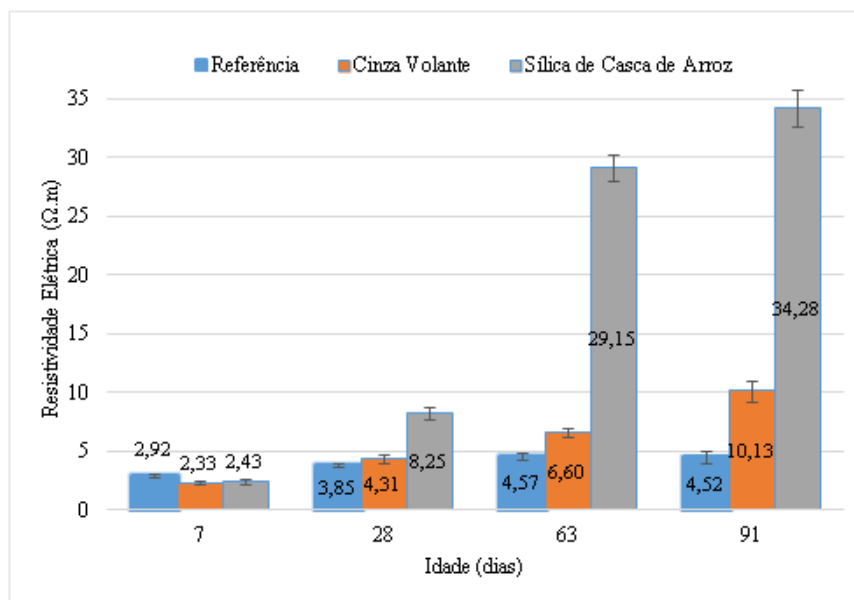


Figura 2 – Resistividade elétrica ($\Omega.m$)

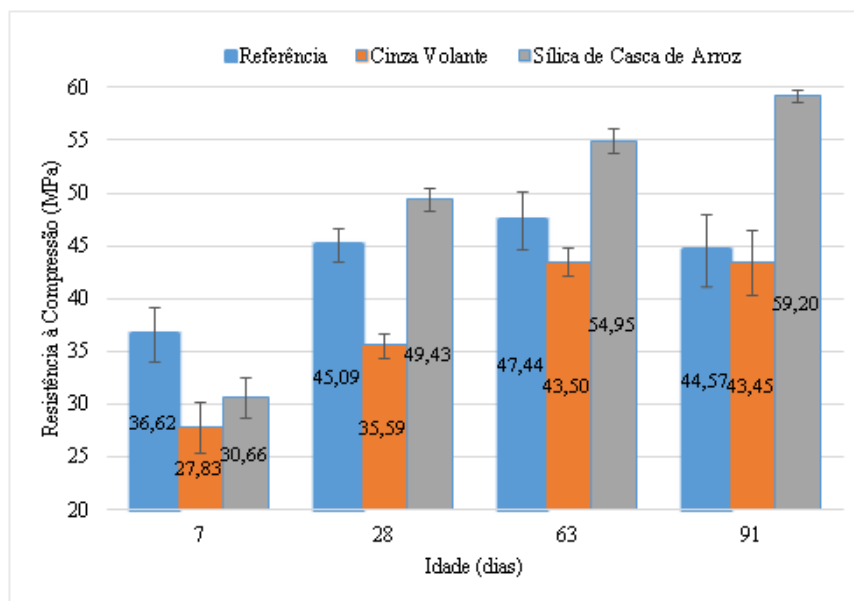


Figura 3 – Resistência à Compressão (MPa)

A Figura 4 e 5 apresentam os resultados dos ensaios de Absorção de Água por Sucção Capilar (g/cm^2) e os de Resistividade Elétrica ($\Omega\cdot\text{m}$) aferida no ensaio de Absorção de Água por Sucção Capilar (g/cm^2) os dados foram coletados aos 28, 63 e 91 dias de idade. As leituras de absorção capilar foram efetuadas conforme indicação da NBR 9779, efetuando as medidas das massas dos corpos de prova com 3h, 6h, 24h, 48h e 72h, no final do ensaio foram obtidas as médias das absorções nestes períodos de tempo. Também as leituras de resistividade foram efetuadas nestes mesmos intervalos.

A Figura 4 apresenta os resultados dos ensaios de Absorção de Água por Sucção Capilar (g/cm^2). Para os cp's referência até a idade de 28 dias apresentaram aumento da absorção capilar, a partir desta idade foi atingida constância da absorção, as médias a partir deste ponto apresentaram-se estatisticamente iguais, sem diferenças significativas. Para os cp's com adição de cinza volante, o comportamento dos cp's foi similar à referência, apresentando aumento da absorção capilar até a idade de 28 dias, as médias também apresentaram estatisticamente iguais após 28 dias. Para os cp's com adição de sílica de casca de arroz as médias para todas as idades apresentaram diferenças significativas para todas as idades, a maior média de absorção foi aferida aos 91 dias, $0,30 \text{ g}/\text{cm}^2$.

A Figura 5 apresenta os resultados das medições de Resistividade Elétrica ($\Omega\cdot\text{m}$) aferidas nos ensaios de Absorção de Água por Sucção Capilar (g/cm^2). Para todos os cp's referência, cinza volante e sílica de casca de arroz, a maiores leituras médias de resistividade foram aferidas foi aos 91 dias, $12,04 \Omega\cdot\text{m}$, $33,78 \Omega\cdot\text{m}$ e $98,88 \Omega\cdot\text{m}$. Para todas as análises as médias se apresentaram estatisticamente diferentes.

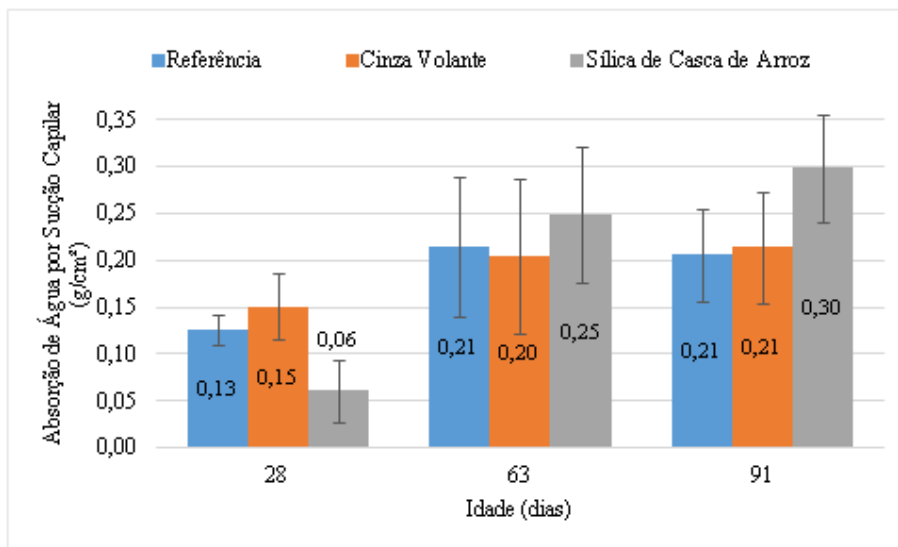


Figura 4 – Absorção de Água por Sucção Capilar (g/cm²)

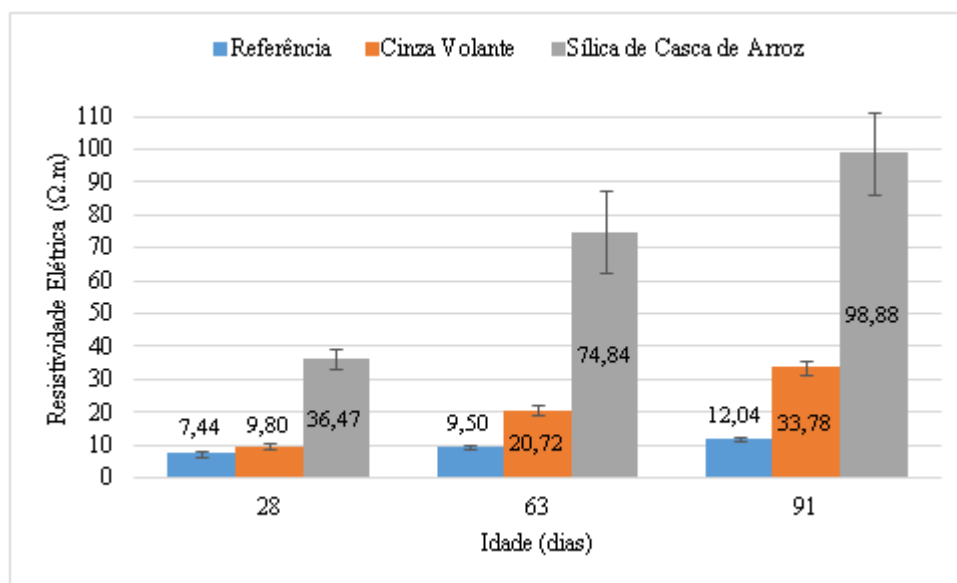


Figura 5 – Resistividade Elétrica (Ω.m) aferida no ensaio de Absorção de Água por Sucção Capilar (g/cm²)

Nos gráficos representados pelas Figuras 6 e 7 são apresentados os resultados dos ensaios de Absorção de Água por Imersão (%) e os de Resistividade Elétrica (Ω.m) aferida no ensaio de Absorção de Água por Imersão (%). As leituras de absorção por imersão foram efetuadas conforme indicação da NBR 9778, a massa foi aferida após 24h, 48h e 72h, no final do ensaio foram obtidas as médias das absorções nestes períodos de tempo. Também as leituras de resistividade foram efetuadas nestes mesmos intervalos.

Na Figura 6 são representadas as leituras médias dos valores de absorção de água por imersão, importante notar que as respostas para este ensaio se dão em porcentagem, ou seja, elas mostram o índice de saturação em cada idade dos cp's. Para os cp's referência a maior leitura média ocorreu aos 91 dias, 1,33 %, todas as médias se apresentaram estatisticamente diferentes. Para os cp's com adição de cinza volante as leituras aos 28 e 63 dias apresentaram médias estatisticamente iguais, assim, as maiores leituras médias ocorreram aos 91 dias, 1,39%. Para os cp's com adição de sílica de casca de arroz todas as leituras médias apresentaram ser estatisticamente diferentes, as maiores leituras médias ocorreram aos 91 dias, 1,04%.

A Figura 7 apresentam os resultados das leituras de Resistividade Elétrica ($\Omega.m$) aferidas no ensaio de Absorção de Água por Imersão (%). Para os cp's referência, em todas as idades, elas apresentam leituras médias estatisticamente iguais. Para os cp's com adição de cinza volante as leituras de resistividade apresentam valores médios estatisticamente diferentes, a maior leitura média aferida foi aos 91 dias, 16,15 $\Omega.m$. Para os cp's com adição de sílica de casca de arroz as leituras de resistividade apresentam valores médios estatisticamente diferentes, a maior leitura média aferida foi aos 91 dias, 57,72 $\Omega.m$.

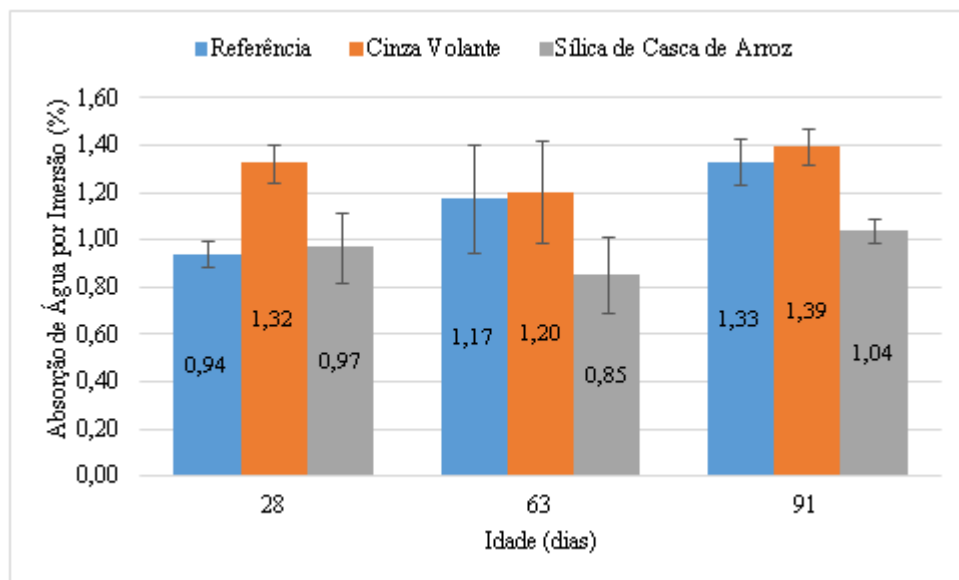


Figura 6 – Absorção de Água por Imersão (%)

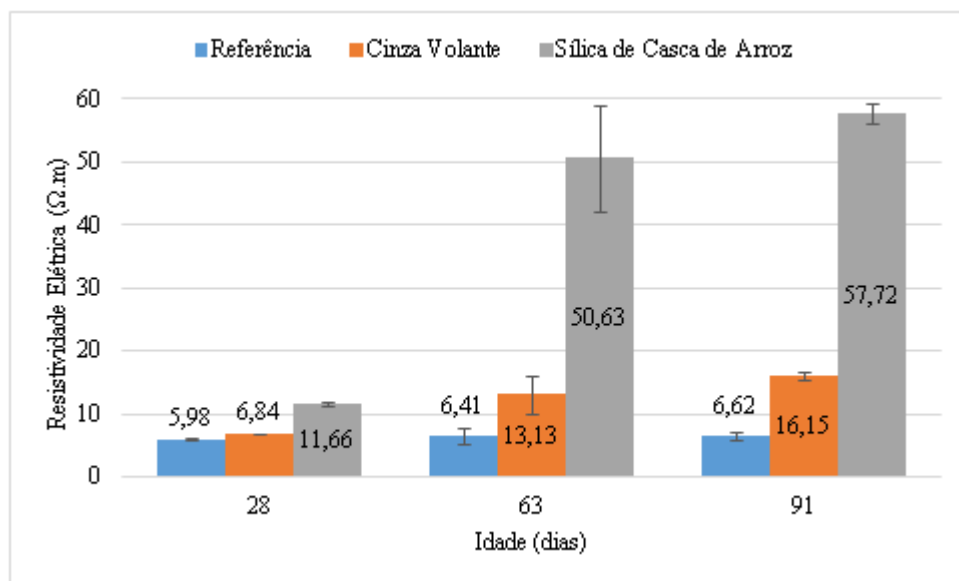


Figura 7 – Resistividade Elétrica (Ω.m) aferida no ensaio de Absorção de Água por Imersão (%)

As Figuras 8, 9 e 10 apresentam as correlações entre os ensaios executados, objetivando encontrar um efeito padrão entre o grau de hidratação e saturação com a resistividade elétrica. Todas as correlações significativas deste trabalho apresentam-se como diretamente proporcionais.

Na Figura 8 são representadas as Correlações logarítmicas entre as Resistências à Compressão (MPa) e às Resistividades Elétricas (Ω.m). Foram encontradas boas correlações entre estas grandezas, para os cp's referência apresentou $R^2 = 0,8773$, para os cp's com adição de cinza volante apresentou $R^2 = 0,9192$ e para os cp's com adições de sílica de casca de arroz apresentou $R^2 = 0,9347$. Esse fato é corroborado por outras pesquisas que também indicam a relação, diretamente proporcional entre resistividade e resistência à compressão, ou seja, quanto maior a resistência maior a resistividade (CHEN *et al.*, 2014).

Na Figura 9 são representadas as Correlação lineares entre as Resistividades Elétrica (Ω.m) e as Absorções de Água por Capilaridade (g/cm²). Para estas correlações os cp's que obtiveram pior índice de correlação R^2 foram os cp's referência com $R^2 = 0,6121$, já os cp's com adição de cinza volante e sílica de casca de arroz apresentam $R^2 = 0,8185$ e $R^2 = 0,9641$.

Na Figura 10 são representadas as Correlações lineares entre as Resistividades Elétricas (Ω.m) e Absorções de Água por Imersão (%). Os únicos cp's que apresentaram correlação significativa foi o referência com $R^2 = 0,9924$, já os cp's com adições de cinza

volante e com sílica de casca de arroz não apresentaram correlação significativa, $R^2 = 0,0289$ e $R^2 = 0,0005$.

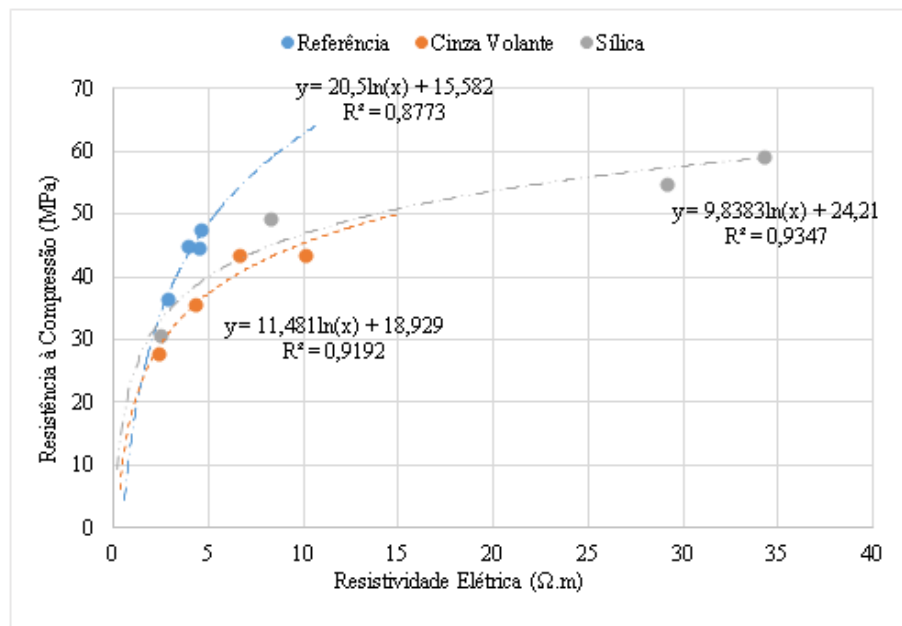


Figura 8 – Correlação logarítmica entre Resistência à Compressão (MPa) x Resistividade Elétrica (Ω.m)

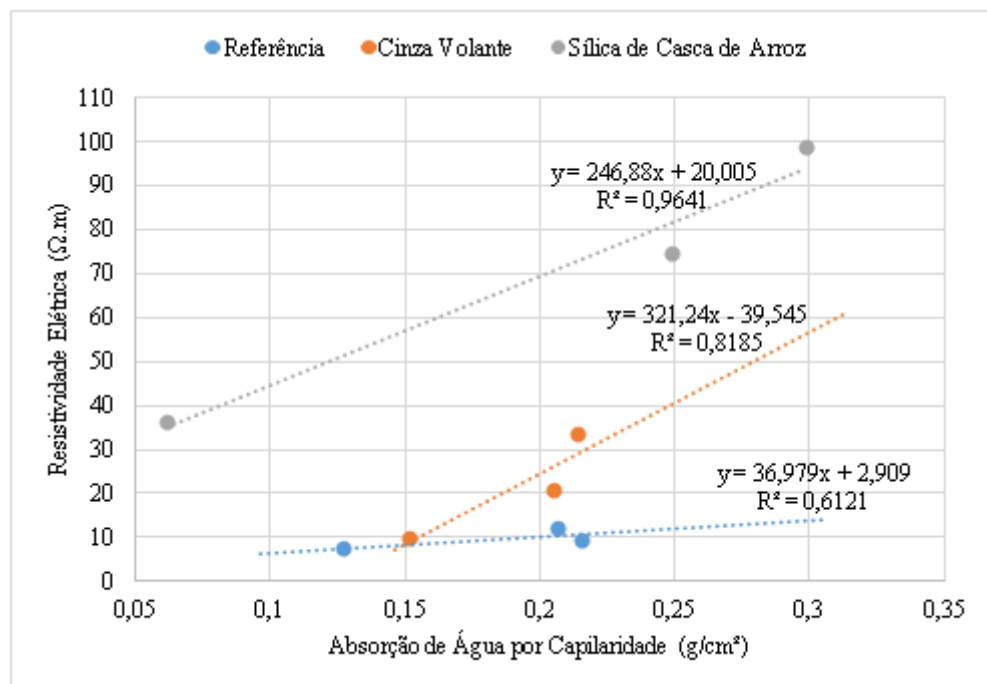


Figura 9 – Correlação linear entre Resistividade Elétrica (Ω.m) e Absorção de Água por Capilaridade (g/cm²)

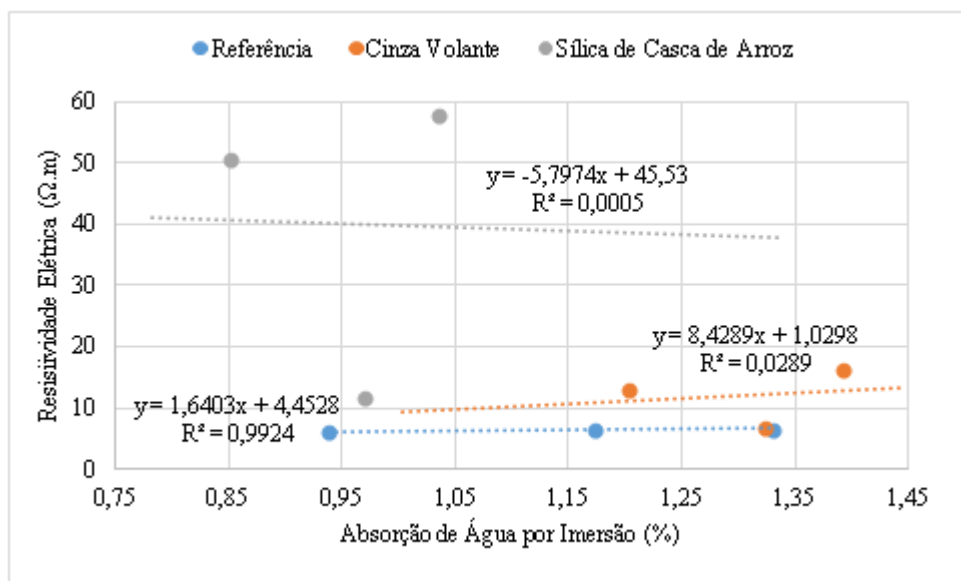


Figura 10 – Correlação linear entre Resistividade Elétrica (Ω.m) e Absorção de Água por Imersão (%)

4. CONCLUSÕES

Diante dos resultados apresentados, no que diz respeito ao grau de saturação, é possível concluir que até a idade de 28 dias a relação com a resistividade elétrica é diretamente proporcional, independente do tipo de adição. Na medida em que a idade é avançada, a relação não é mais direta, sendo o fator determinante o tipo de adição. Quanto ao grau de hidratação, a relação é direta, ou seja, quanto maior o grau de hidratação maior a resistividade do material, independentemente do grau de saturação e tipo de adição. Os valores de resistividade aumentaram progressivamente com o aumento da idade dos corpos de prova, com os três traços apresentando desempenho similar.

Outra conclusão relevante diz respeito à resistência, corroborando com as indicações da literatura, sendo que quanto maior a resistência maior a resistividade. Os resultados de resistência comprovaram que a resistência dos corpos de prova aumentou em paralelo com o nível de hidratação e conseqüentemente os valores de resistividade também progrediram.

Por fim, quanto às adições, os traços com adição de cinza volante e sílica de casca de arroz apresentaram maior resistividade do que o traço de referência em todas as idades consideradas. A resistividade nos corpos com cinza volante apresentou menores valores do

que nos corpos com sílica de casca arroz, sendo assim, é possível concluir que quanto mais ativa seja a adição usada maior serão os valores de resistividade.

5. AGRADECIMENTOS

Às empresas Supermix e Itambé, nas pessoas dos engenheiros Maurício Bianchini e Jorge Christófolli, respectivamente, pela doação dos materiais utilizados na pesquisa e auxílio na execução dos ensaios de resistência à compressão. Ainda, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela disponibilização da verba para aquisição dos equipamentos de laboratório empregados nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MEHTA, P.K., “Rice husk ash – A unique supplementary cementing material”, In: CANMET, Proceedings of the International Symposium on Advances in Concrete Technology, pp. 407-430, Athens, Greece, May. 1992.
- [2] CASCUDO, O. Contribuição ao estudo e emprego de técnicas eletroquímicas no controle da corrosão de armaduras em concreto armado, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 1991.
- [3] HELENE, P.R. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado, Tese (Livre Docência), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 1993.
- [4] BERTOLINI, L. Materiais de construção: patologia, reabilitação, prevenção, pp 257-283, Oficina de textos, São Paulo – Brasil, 2006.
- [5] MEDEIROS, M. H. F. Estudo de variáveis que influenciam nas medidas de resistividade de estruturas de concreto armado, Escola Politecnica da Universidade de São Paulo – SP, Brasil, 2001.
- [6] MCCARTER, W. JOHN; STARRS, GERRY; KANDASAMI, SIVA; JONES, ROD AND CHRISP, MALCOLM. Electrode Configurations for Resistivity Measurements on Concrete. ACI MATERIALS JOURNAL, 106-M30. Maio, 2009.
- [7] ARAUJO D. ADRIANA; PANOSSIAN, ZEHBOUR; OLIV, KLEBER J.; FILHO PEREIRA, MARIO L. Técnicas de medição da resistividade elétrica em estruturas

atmosféricas de concreto convencional. Revista técnica. Edição 210 - Setembro/2014.

[8] C. ANDRADE, B. ELSENER, C. ALONSO, R. CIGNA, J. GALLAND, J. GULIKERS, U. NÜMBERGER, R. POLDER, V. POLLET, M. SALTA, R. WEIDERT, Corresponding members: C Page, UK; C. Stevenson, Sout; RILEM tc 154-emc: electrochemical techniques for measuring metallic corrosion, "Test methods for on site measurement of resistivity of concrete"; Materials and Structures, Vol. 33, December 2000, pp 603-611

[9] DODDS, WAYNE; GOODIER, CHRIS; CHRISTODOULOU, CHRISTIAN; AUSTIN, SIMON; DUNNE, DAVID. Durability performance of sustainable structural concrete: Effect of coarse crushed concrete aggregate on microstructure and water ingress. Construction and Building Materials 145; 183–195. 2017.

[10] MEDEIROS - JUNIOR , RONALDO A; LIMA, MARYANGELA G. Variação da resistividade elétrica do concreto com o formato de corpos de prova para diferentes tipos de cimento. Revista de Engenharia e Tecnologia. ISSN 2176-7270. V. 7, No. 1, Abr/2015

[11] MONFORE, G.E. "The electrical resistivity of concrete", Journal of the PCA Research and development Laboratories, pp. 35-49, 1968.

[12] MEDEIROS JUNIOR, R. A. ; LIMA, M. G. ; MEDEIROS, M. H. F. ; REAL, L. V. . Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento. Revista ALCONPAT, v. 4, p. 116-128, 2014.

[13] SANTOS, LOURDIMINE. Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto. Abril, 2006.

[14] GASTALDINI, A. L. G.; ISAIA, G. C.; HOPPE, T. F.; MISSAU, F.; SACIOTO, A. P. Influence of the use of rice husk ash on the electrical resistivity of concrete: A technical and economic feasibility study. Construction and Building Materials, 23, 3411-3419, 2009.

[15] RAMEZANIANPOUR, A. A.; PILVAR, A.; MAHDIKHANI, M.; MOODI, F. Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength. Construction and Building Materials, 25, 2472-2479, 2011.

[16] SILVA MELO ANDRADE., LEANDRO. Resistividade elétrica superficial do concreto: influência da cura. Monografia de Projeto Final de Curso, apresentada à Coordenação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás. 2016.

[17] FRIZZO, B.T. Influência do teor e da finura de pozolanas na permeabilidade ao oxigênio na absorção capilar do concreto, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil),

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2001.

[18] ABREU, A.G. Efeito das adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1998.

[19] ASTM G-57 Standard test method for field measurement of soil resistivity using the Wenner, Four-electrode method, 2012.

[20] CHEN, C.; CHANG, J.; YEIH, W. The effects of specimen parameters on the resistivity of concrete. *Construction and Building Materials*, 71, 35-43, 2014.