



Correlação entre a resistividade elétrica superficial no concreto produzido com cimento resistente a sulfatos e a agressividade do ambiente

Correlation between surface electrical resistivity in concrete produced with sulfate-resistant cement and the aggressiveness of the environment

Pimentel, Thaís Esmério (1); Silva, Adriano de Paula (2); Jonov, Cristiane Machado Parisi (3)

(1) Mestranda em Construção Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais

(2) Prof. Dr., Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Universidade de Minas Gerais

(3) Prof. Dr., Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Universidade de Minas Gerais
thais_pimentel@yahoo.com.br

Resumo

A corrosão é uma manifestação patológica proveniente da percolação de agentes físicos e químicos de caráter agressivo pelos poros do concreto, podendo atingir a camada passivadora do aço. À medida em que o fenômeno ocorre, a resistividade elétrica superficial do concreto sofre alterações, indicando a possibilidade de diminuição de sua durabilidade e vida útil. A resistividade elétrica superficial é um parâmetro utilizado para monitoramento da corrosão no concreto, de caráter bastante sensível às suas características microestruturais, sobretudo em relação à conectividade e distribuição de seus poros. O objetivo deste estudo foi estabelecer uma correlação entre a agressividade do ambiente, avaliada de acordo com o teor de sulfato de magnésio, e a resistividade elétrica superficial do concreto ao longo do tempo. Foram realizadas medidas da RES em corpos de prova de duas séries de amostras de concreto produzidas com cimentos CP III 32 RS e CP V ARI RS, e relações água/cimento, sendo 0,65; 0,50 e 0,45 para exposição a ciclos de molhagem e secagem em meio aquoso com solução de sulfato de magnésio. A resistividade elétrica superficial foi monitorada através de metodologia não destrutiva de WENNER. Um dos fatores que afetam a resistividade elétrica de um elemento de concreto é a relação água/cimento (a/c) utilizada na fase de preparo. Quanto mais saturados estiveram os poros e com maior quantidade de poros e com maiores diâmetros, maior é a relação a/c, sendo constatada diminuição da resistividade elétrica superficial. Conforme medições realizadas em três idades (42, 70, 112 dias) as alterações evidenciaram crescimento da resistividade elétrica superficial ao longo do tempo e redução da condutividade elétrica nos poros.

Palavra-Chave: Resistividade Elétrica Superficial; Concreto; Corrosão.

Abstract

Corrosion is a pathological manifestation resulting from the percolation of aggressive physical and chemical agents through the concrete pores, which can reach the passive layer of the steel. As the phenomenon occurs, the surface electrical resistivity of the concrete undergoes changes, indicating the possibility of a decrease in its durability and useful life. Surface electrical resistivity is a parameter used to monitor corrosion in concrete, which is very sensitive to its microstructural characteristics, especially in relation to the connectivity and distribution of its pores. The objective of this study is to establish a correlation between the aggressiveness of the environment, evaluated according to the magnesium sulfate content, and the surface electrical resistivity of the concrete over time. RES measurements were performed on specimens from two series of concrete samples produced with CP III 32 RS and CP V ARI RS cements, and water/cement ratios, being 0.65; 0.50 and 0.45 for exposure to wetting and drying cycles in aqueous medium with magnesium sulfate solution. Surface electrical resistivity was monitored using WENNER's non-destructive methodology. One of the factors that affect the electrical resistivity of a concrete element is the water/cement (w/c) ratio used in the preparation phase. The more saturated the pores were and the greater the number of pores and larger diameters, the greater the w/c ratio, with a decrease in surface electrical resistivity being observed. According to measurements carried out at three ages (42, 70, 112 days) the changes showed an increase in surface electrical resistivity over time and a reduction in electrical conductivity in the pores.

Keywords: Surface Electrical Resistivity; Concrete; Corrosion.



1 Introdução

As estruturas de concreto armado compõem estruturas residenciais, industriais, comerciais, esportivas laborais, e fazem parte do sistema construtivo mais utilizado no Brasil. Estão inseridas na sociedade em um longo horizonte temporal em meio a crescente industrialização e urbanização, de modo que são submetidas a exposição de intempéries da natureza e agentes agressivos que afetam diretamente a sua vida útil e durabilidade através de manifestações patológicas (RIBEIRO, 2014).

O processo de construção destas edificações é constituído de diversas etapas, iniciando no projeto, dimensionamento das armaduras, escolha do tipo de concreto de acordo com o ambiente em que será construído e com a finalidade para utilização, seleção de mão de obra qualificada, seleção de materiais adequados, operação e supervisão do profissional de engenharia (FERREIRA JR, 2020).

Neste cenário, as manifestações patológicas mais comuns são as fissuras, trincas, corrosão de armadura, eflorescências, porosidade e umidade (FERREIRA JR, 2020).

O concreto precisa garantir a qualidade relativa ao quesito resistência do material, a norma brasileira analisa por meio do quadro da classe de agressividade que é definida de acordo com as condições climáticas e ambientais do local da construção e com estes requisitos se mede as proporções adequadas dos componentes do concreto (ABNT, 2018).

As estruturas de concreto estão constantemente expostas a efeitos prejudiciais, como sobrecargas, danos ambientais, desastres naturais e outros fatores. Esses elementos estão diretamente relacionados à baixa qualidade dos materiais de construção, problemas no projeto e na execução, bem como à falta de manutenção adequada das estruturas. Essa falta de cuidado resulta na deterioração prematura das edificações e, como resultado, na perda de desempenho das mesmas. A deterioração prévia das construções acarreta um aumento nos custos de manutenção e reparo (PETRU, 2019). Existem diversos elementos capazes de promover de forma significativa a degradação de uma estrutura, resultando na perda de sua durabilidade. Esses elementos, tanto intrínsecos quanto extrínsecos, abrangem desde a etapa de projeto até a execução (envolvendo materiais e métodos utilizados), bem como o uso e a realização de manutenção periódica (REAL, 2015).

É relevante para a indústria da construção civil compreender como o ataque de sulfatos afeta a durabilidade do concreto armado, pois isso envolve um processo químico significativo. Estudos e pesquisas contínuas são realizados para investigar as manifestações patológicas e a durabilidade das estruturas. Dependendo do tipo de solo, as fundações podem estar em contato direto com águas contendo altos níveis de sulfatos, o que pode ter um impacto econômico significativo na recuperação da edificação. Portanto, ao compreendermos adequadamente os efeitos químicos causados pelos sulfatos, é possível evitar custos elevados ao recuperar a estrutura (PEREIRA, 2019).

O presente trabalho teve como objetivo realizar uma revisão bibliográfica sobre a correlação entre a resistividade elétrica superficial concreto produzido com cimento resistente a sulfatos e a agressividade do ambiente.



A resistividade é uma propriedade da matéria que indica a habilidade do material em transportar cargas elétricas. Esse parâmetro é definido como o inverso da condutividade e se caracteriza pela capacidade do concreto de suportar a transferência de íons submetidos a um campo elétrico (HALLIDAY E RESNICK, 1994).

GIROTTTO E SANTOS (2002) definiu a resistividade elétrica como a razão entre o campo elétrico gerado por uma diferença de potencial e a densidade de corrente:

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

Onde a resistividade elétrica (ρ), medida em ohms-metros (Ωm) é o resultado da divisão do campo elétrico (E), medido em ampère, pela densidade de corrente elétrica (J), medida em ohm. GIROTTTO E SANTOS (2002) vincula a resistividade elétrica com a resistência ao fluxo de corrente elétrica por um material:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde a resistência elétrica do material é obtida através do produto da resistividade elétrica do material pelo seu comprimento, divididos pela área da seção transversal do material. O Sistema Internacional de Unidades (SI), instituiu a unidade de medida da resistividade elétrica como sendo $\Omega\cdot\text{m}$ (ohm vezes metro) (HALLIDAY E RESNICK, 1994).

Sendo assim, a resistividade de cada material está relacionada diretamente proporcional a quantidade de passagem de corrente elétrica, ou seja, quanto maior a resistividade elétrica de um material, maior será sua oposição ao fluxo elétrico (HALLIDAY E RESNICK, 1994).

A resistividade elétrica superficial do concreto é um parâmetro associado a permeabilidade, e por consequência, está relacionado com a resistência do concreto à penetração dos agentes agressivos ambientais, como sulfatos e cloretos (MEDEIROS, 2014).

O monitoramento ao longo do tempo da RES pode ser realizado pelo método de Wenner, difundido como método dos quatro pontos, que consiste em uma técnica de baixo custo e fácil execução e pelo seu caráter não destrutivo permite a contínua reprodução e observação dos resultados sem comprometimento da integridade física da estrutura (ANDRADE E D'ANDREA, 2011; LÜBECK et al, 2012).

A RES é uma característica uma das principais características que diferencia os mais diversos tipos de materiais pois trata de uma característica intrínseca advinda da composição química.

A resistividade do concreto é atribuída à comunicabilidade da rede de poros e à alta concentração de íons Na^+ (Sódio), K^+ (Potássio), Ca^{++} (Cálcio), OH^- (hidroxila) e Cl^- (Cloro) na solução dos poros (ABREU, 1998), ou seja, a movimentação dos íons no concreto está intimamente relacionada à umidade contida nos poros do mesmo. Sendo assim, num mesmo elemento de concreto podem ser caracterizadas pelo menos duas regiões, onde os valores da resistividade são distintos: uma mais superficial, correspondente à região de cobrimento da armadura e que sofre ciclos permanentes de molhagem e secagem, denominada resistividade elétrica aparente.



Consequentemente, espera-se que os concretos adicionados de sulfato e cloreto apresentem mudanças na RES ao longo do tempo. Diversos estudos (ALONSO ET AL, 1988; ANDRADE et al, 1996; GULIKERS, 2005; GHODS et al, 2007) consideram a RES como um fator importante que afeta a velocidade ou taxa de corrosão das armaduras do concreto.

1.1 Agentes que afetam a resistividade elétrica

A resistividade elétrica do concreto é uma propriedade altamente sensível às suas características, tanto físicas quanto químicas. O concreto é um sistema composto por vários tamanhos de agregados e partículas imersas em uma matriz de pasta de cimento. Assim, a resistividade do compósito depende da resistividade das partículas, da resistividade da matriz e do volume relativo desses dois materiais (ABREU, 1998).

De acordo com Santos (2006), a matriz de cimento presente no concreto é composta principalmente por silicato de cálcio hidratado (C-S-H), hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), sulfoaluminatos de cálcio e grãos de clínquer anidro. Além disso, a estrutura da pasta de cimento hidratada contém diferentes tipos de vazios, que são classificados principalmente de acordo com suas dimensões (MEHTA E MONTEIRO, 1994)

Os espaços interlamelares presentes no C-S-H possuem dimensões de poucos Angstroms (Å). Em contrapartida, os vazios capilares - que são os poros não preenchidos pelos produtos de hidratação ou pelo cimento - apresentam dimensões que variam entre 0,01 a 1 mm, dependendo da relação água/cimento ou do grau de hidratação. Os vazios de ar incorporado, por sua vez, são geralmente esféricos, com dimensões que variam normalmente entre 50 a 200 μm , enquanto os vazios de ar aprisionado podem chegar a 3 mm. Esses vazios contêm água em diferentes formas, tais como água capilar (também conhecida como água livre), água adsorvida, água interlamelar (associada à estrutura do C-S-H) e água quimicamente combinada (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

Diversos fatores influenciam a condutividade elétrica do concreto, incluindo sua composição e propriedades físicas e químicas. Assim, a resistividade elétrica é uma característica que varia conforme as condições do ambiente, como temperatura, umidade e agressividade do meio, bem como a composição do próprio concreto. Nos próximos itens, serão descritos os principais fatores que afetam a resistividade elétrica do concreto (HELENE, 1993).

1.1.1 Relação água/cimento

Os valores de resistividade do concreto são influenciados não só pela umidade, mas também pela composição do material. De modo geral, a resistividade aumenta quando a relação a/c é baixa, já um concreto com alta relação a/c e sem adições apresenta baixa resistividade elétrica. Como a qualidade potencial do concreto depende da relação água/cimento e do tipo de cimento, esta relação influi na permeabilidade e capacidade de absorção de água pelo concreto. Quanto maior a relação água/cimento, maior será a porosidade e permeabilidade de um concreto e, a princípio, menor será sua resistividade elétrica. Medeiros et al., relatam que a solução existente nos poros atua como um condutor elétrico na estrutura interna do concreto. Assim, uma maior concentração de água no interior do concreto juntamente com a sua permeabilidade, ambos aspectos provocados pela alta relação água/cimento, favorecem para o crescimento da condutividade elétrica na parte interna do concreto (HELENE, 1993).

A Figura 1 demonstra a influência do teor de cimento e relação água/cimento na resistividade elétrica do concreto, obtidas por HUGHES et al. (1985) utilizando cimento Portland comum aos 28 dias, em cura úmida:

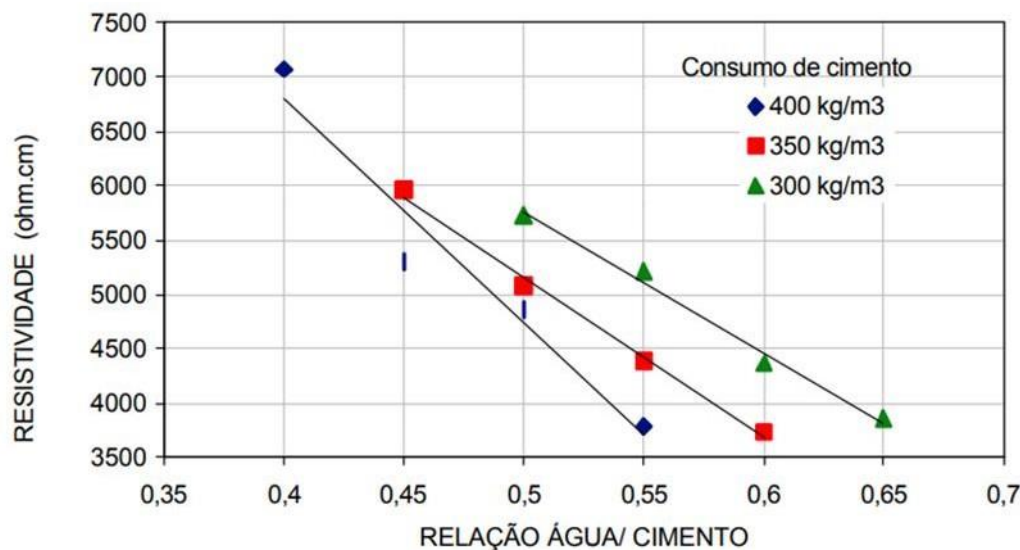


Figura 1: Influência do teor de cimento e relação água/cimento na resistividade elétrica do concreto (Hughes et al., 1985)

1.1.2 Hidratação do concreto

A variação da resistividade elétrica no concreto ao longo do tempo está interligada com a hidratação da pasta de cimento de modo que indica a velocidade na qual as relações químicas ocorrem dentro da pasta pois, o volume da água evaporável na pasta em um concreto saturado varia tanto no momento da mistura, quanto após, quando o cimento está completamente hidratado (SANTOS, 2006).

A água de hidratação contém íons em que as concentrações são alteradas ao longo do tempo, podendo variar de modo que aumentem ou diminuam, sendo assim, os vazios diminuem pelo preenchimento dos poros que antes eram ocupados pelos eletrólitos e passam a ser preenchidos pelos compostos que se formam ao longo do tempo.

Durante a combinação da água com o cimento, ocorre uma reação química conhecida como hidratação da pasta de cimento, que resulta em produtos que possuem características de endurecimento e pega. De acordo com METHA E MONTEIRO (2008), à medida que o processo de endurecimento avança, as reações químicas preenchem os vazios existentes na pasta de cimento, reduzindo sua porosidade e permeabilidade, e aumentando, assim, a força do material.

1.1.3 Umidade

A condutividade por intermédio da umidade do concreto pode ser vislumbrada como sendo o movimento de íons na água evaporável da matriz e nos poros das partículas de agregados que afetam na quantidade ou propriedade da água. Esta quantidade de íons influencia na resistividade elétrica do concreto por meio do grau de saturação dos poros, limitando a transferência de carga elétrica entre áreas anódicas e catódicas (RIBEIRO,



2014). Assim, quanto mais saturado estiverem os poros de concreto, menor será a resistividade elétrica, sendo o concreto um material poroso, o que significa que contém espaços vazios que podem ser preenchidos com água, quando o concreto está úmido, a água preenche esses espaços vazios, aumentando a condutividade elétrica do material. Por outro lado, se o concreto estiver seco, terá uma resistividade elétrica mais alta (RIBEIRO, 2018).

1.1.4 Temperatura

A temperatura também pode ter um impacto significativo na resistividade elétrica do concreto. A resistividade elétrica de um material é diretamente proporcional à temperatura, o que significa que a resistividade elétrica do concreto aumenta à medida que a temperatura diminui e diminui à medida que a temperatura aumenta (ANDRADE, 1995).

Essa relação explica-se pelo fato de que, em temperaturas mais baixas, os átomos e as moléculas do material se movem com menos energia eletromagnética, o que aumenta a resistência elétrica. Por outro lado, em temperaturas mais altas, as partículas se movem com mais energia eletromagnética, o que reduz a resistência elétrica (AGUIAR, 2018).

1.1.5 Agregados

Os agregados graúdos têm uma resistividade elétrica mais baixa do que os miúdos, o que significa que a presença de uma maior proporção de agregados graúdos no concreto pode diminuir sua resistividade elétrica. Por outro lado, a presença de uma maior proporção de agregados miúdos pode aumentar a resistividade elétrica do concreto (MEDEIROS et al., 2017).

Além disso, a natureza dos agregados, como a porosidade e a composição mineralógica, também pode influenciar na resistividade elétrica do concreto. Por exemplo, a presença de agregados porosos, como pedras calcárias, pode aumentar a condutividade elétrica do concreto, enquanto a presença de agregados com elevado teor de sílica, como a areia de quartzo, pode diminuir a condutividade elétrica (MEDEIROS et al., 2017).

1.1.6 Carbonatação

A carbonatação é um processo natural em que o dióxido de carbono presente na atmosfera reage com o hidróxido de cálcio no concreto para formar carbonato de cálcio. A carbonatação pode diminuir a resistividade elétrica do concreto, pois o carbonato de cálcio formado é um bom condutor elétrico. A presença de carbonato de cálcio pode aumentar a condutividade elétrica do concreto, diminuindo assim sua resistividade elétrica (MEDEIROS et al., 2017).

1.2 Métodos de medida de resistividade elétrica no concreto

A resistividade elétrica do concreto é uma medida útil para investigar as propriedades do material em laboratório ou para monitorar estruturas de concreto no local. Quando combinada com medidas de potencial de eletrodo, é particularmente eficaz para avaliar o risco de corrosão em estruturas de concreto (ORTEGA, 2017).

1.3 Método dos quatro eletrodos “Wenner”

O Método dos Quatro Eletrodos é um método padronizado pela ASTM G57, que foi originalmente desenvolvido para uso em solos. Desde então, tem havido muitos estudos para adaptá-lo para uso em concreto e, como resultado, equipamentos foram desenvolvidos para permitir medições “in situ” de resistividade elétrica de maneira não destrutiva (ORTEGA, 2017).

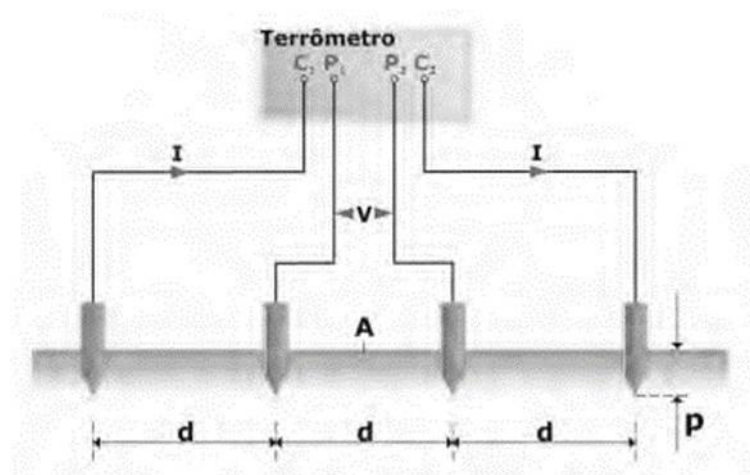


Figura 2: Esquema elétrico para medição de resistividade elétrica em solos – Método de Wenner (PINHEIRO, 2013)

Os eletrodos de medição são dispostos da seguinte forma: os dois terminais localizados nos extremos da linha são destinados às correntes C1 e C2, enquanto os eletrodos centrais são designados para os potenciais P1 e P2 (LENCIONI, 2011).

O método de Wenner consiste na aplicação de corrente elétrica no concreto por meio de eletrodos dispostos em uma linha reta. A distância entre os eletrodos é variada, e a tensão elétrica é medida entre pares de eletrodos em diferentes configurações. A partir dessas medidas, é possível determinar a resistividade elétrica superficial, que é uma propriedade que indica a capacidade do material em resistir à passagem de corrente elétrica. Trata-se de uma técnica não destrutiva e relativamente rápida, o que a torna uma opção atraente para a investigação da resistividade elétrica do concreto em diferentes ambientes. Para medição da resistividade elétrica no concreto, segue-se a sequência da preparação da amostra de concreto, sendo realizada em formato cilíndrico, de dimensões suficientes para acomodar os quatro eletrodos do método de Wenner. Os eletrodos são dispostos em uma linha reta e espaçados de forma uniforme, conforme as dimensões do aparelho. A tensão elétrica medida entre pares de eletrodos em diferentes configurações. No caso do concreto, é recomendável utilizar eletrodos de cobre, que possuem boa condutividade elétrica e são resistentes à corrosão (LENCIONI, 2011).



1.4 Ataque por sulfatos

O ataque por sulfatos pode afetar significativamente a durabilidade do concreto, pois os sulfatos são compostos químicos que estão presentes no solo, água subterrânea e em algumas fontes de água potável, e podem reagir com os componentes do concreto, incluindo o cimento Portland, e causar danos no material. Isso ocorre porque a reação dos sulfatos com o cimento Portland produz compostos expansivos, que aumentam o volume do concreto e podem causar tensões internas que levam à fissuração (BROWN, 2002).

Os efeitos do ataque por sulfatos no concreto dependem do tipo de sulfato, da concentração e do tempo de exposição. Em geral, quanto maior a concentração de sulfatos e o tempo de exposição, maior o dano e a redução da resistência à compressão. Para evitar o ataque por sulfatos e proteger a resistência à compressão do concreto, são utilizados diferentes métodos e materiais de construção. Por exemplo, é possível escolher um tipo de cimento Portland mais resistente aos sulfatos, adicionar aditivos especiais ao concreto para retardar a reação dos sulfatos, e usar materiais resistentes a sulfatos para os agregados e outros componentes do concreto. Além disso, a aplicação de revestimentos protetores e o controle do teor de umidade no solo também são medidas que podem ajudar a prevenir o ataque por sulfatos e manter a resistência à compressão do concreto (METHA E MONTEIRO, 2008)

O sulfato de magnésio é um composto químico que consiste em íons de magnésio (Mg^{2+}) e íons sulfato (SO_4^{2-}). Sua fórmula química é $MgSO_4$. Em sua forma mais comum, o sulfato de magnésio é um sólido branco cristalino que é facilmente solúvel em água. Isso significa que cada molécula de sulfato de magnésio é composta por um átomo de magnésio (Mg), um átomo de enxofre (S) e quatro átomos de oxigênio (O) arranjados em uma estrutura iônica. Os íons de magnésio (Mg^{2+}) têm uma carga elétrica positiva, enquanto os íons sulfato (SO_4^{2-}) têm uma carga elétrica negativa. Esses íons se unem por meio de ligações iônicas para formar o composto de sulfato de magnésio. O sulfato de magnésio pode potencialmente prejudicar o concreto em certas circunstâncias, especialmente quando está presente em concentrações elevadas ou em condições específicas de exposição. Os principais efeitos negativos do sulfato de magnésio no concreto incluem a expansão e fissuração, pois pode reagir com certos compostos presentes no concreto, como o alumínio, formando etringita de magnésio, que é um composto expansivo. Essa reação pode levar à expansão do concreto e à formação de fissuras, comprometendo a integridade estrutural do concreto e reduzindo sua durabilidade. A reação entre o sulfato de magnésio e o cimento Portland pode resultar em uma redução da resistência mecânica do concreto. A formação de etringita de magnésio pode levar a uma diminuição da resistência à compressão e à tração do concreto, o que pode comprometer sua capacidade de suporte de cargas e sua durabilidade. A exposição prolongada do concreto ao sulfato de magnésio pode causar a degradação da superfície do concreto, levando a uma aparência manchada e deteriorada, conhecida como eflorescência de sulfato de magnésio. Isso ocorre devido à migração dos íons sulfato e magnésio na superfície do concreto, onde podem reagir com os compostos presentes e formar depósitos indesejáveis. A susceptibilidade do concreto ao ataque do sulfato de magnésio depende de vários fatores, como a concentração de sulfato de magnésio presente, a presença de outros materiais reativos, a relação água/cimento do concreto, as condições ambientais, entre outros (METHA E MONTEIRO (2008).

De acordo com BROWN (2002), os sulfatos causam danos às estruturas de várias maneiras, incluindo a formação de etringita e/ou gesso, o ataque físico de sulfatos resultante da cristalização dos sais de sulfato na superfície do concreto, a formação tardia de etringita, o ataque de sulfatos associado à formação de fases de monossulfato de aluminato de ferrita (AFm), e a formação de taumasita. A formação de gesso e etringita requer uma fonte de alumina, enquanto a taumasita depende de uma fonte de sílica e carbonato. (JALALI, 2007). A formação de etringita dentro da matriz do concreto, um fenômeno químico, juntamente com a cristalização dos sulfatos, um fenômeno físico, resulta em um aumento de volume de 1,2 a 2,2 vezes em relação ao volume original. Isso leva à geração de tensões internas, resultando em expansões, fissuras e danos ao material (AI-AKHRAS, 2006; HOOTON, 1993; ZHANG et al. 2017).

A Figura 3 é uma representação aproximada da etringita presente no interior do concreto.

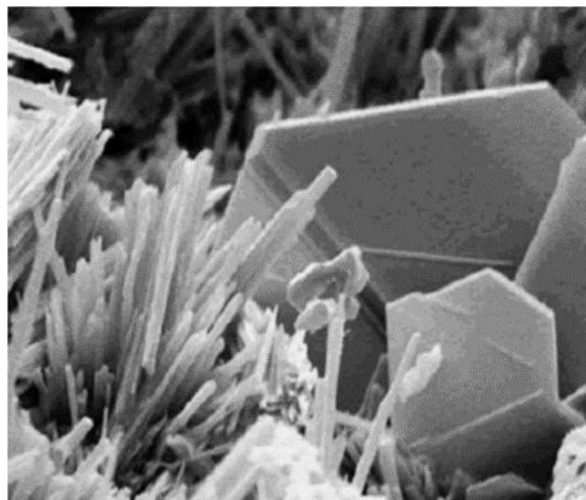


Figura 3: Cristais prismáticos de etringita em pasta de cimento (MELO, 2010)

Durante o processo de hidratação do cimento, as temperaturas podem atingir valores acima de 70°C devido aos altos teores de cimento utilizados, o que pode levar à instabilidade da etringita. Como resultado, a etringita pode se formar nos poros da pasta de cimento (GOTO, 2017). A presença significativa de gipsita ou sulfatos solúveis nos poros da matriz, seja de origem externa ou interna, pode levar à formação de etringita ao longo do tempo, gerando a expansão das argamassas quando são submetidas ao ataque por sulfato de magnésio em função do tempo (SANTHANAN; COHEN; OLEK, 2001)

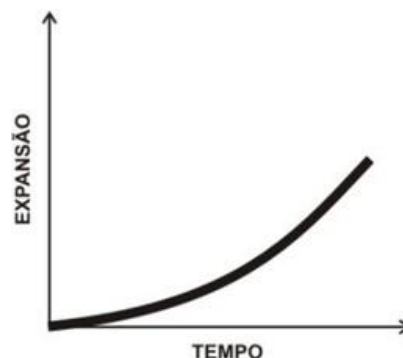


Figura 4: Esquema da expansão de argamassas submetidas ao ataque por sulfato de magnésio em função do tempo (Santhanan; Cohen; Olek, 2001)

A massa de concreto com alto índice de deterioração pode apresentar camada de brucita fissurada, ocasionando na descalcificação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), formando silicato de magnésio hidratado (M-S-H). O modelo pelo qual ocorre o ataque por sulfato de magnésio ocorre em etapas:

- Primeira etapa: A solução agressiva de MgSO_4 difunde-se para o interior do material;
- Segunda etapa: Uma camada de brucita forma-se rapidamente na superfície do concreto, a partir da reação da reação agressiva com a portlandita da pasta de cimento hidratada;
- Terceira etapa: A formação de brucita consome muita portlandita, consequentemente o pH da pasta diminui. Para manter o equilíbrio o C-S-H libera portlandita, aumentando novamente o pH. Este processo contribui para a descalcificação da estrutura;
- Quarta etapa: Quando a camada de brucita é formada, a solução agressiva penetra no concreto por difusão, porém esta é dificultada pela camada de brucita, caracterizada por um gel impermeável;
- Quinta etapa: A gipsita e etringita são formadas nas camadas superficiais, e abaixo da camada de brucita, causando expansão e tensões internas nas camadas inalteradas, gerando a fissuração nesta região;
- Sexta etapa: Em algumas regiões a solução agressiva de sulfatos, devido à ação do cátion de magnésio degrada diretamente o C-S-H, resultando em perda e desintegração da pasta.

O material cimentício fica dividido em regiões, camada de brucita e gipsita paralela à superfície, região de depósitos de produtos de ataque, regiões isoladas de descalcificação do C-S-H, formando M-S-H, região com fissuração e região sã (SOUZA, 2006).

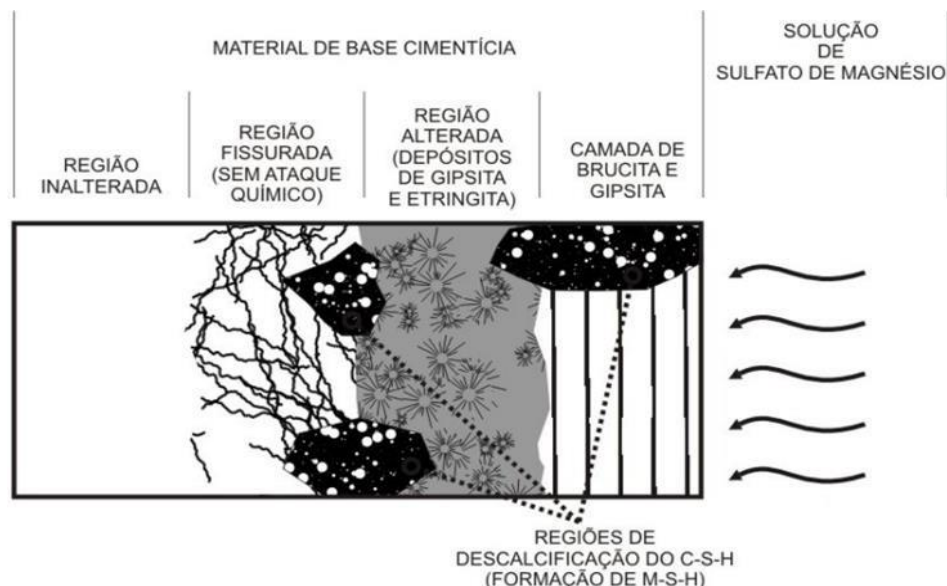


Figura 5: Modelo de ataque em material de base cimentícia por sulfato de magnésio (SOUZA, 2006)



2 Procedimento Experimental

No procedimento experimental da pesquisa foram elaboradas 2 séries de 48 corpos de prova de concreto cada, divididos em quatro lotes, sendo eles referência, exposição fraca, moderada e severa a condições de exposição a ciclos de molhagem e secagem em meio aquoso com a presença de sulfato de magnésio. A primeira série foi produzida com cimento CP III 32 RS e a segunda série produzida com cimento CP V ARI RS.

As relações água/cimento adotadas foram consonantes com a NBR 12655, sendo 0,65 para exposição fraca, 0,50 para moderada e 0,45 para exposição severa aos ciclos de molhagem e secagem em meio aquoso com solução de sulfato de magnésio, nas proporções, 0,15 g/l na exposição fraca, 0,5 g/l na exposição moderada e 1,6 g/l na exposição severa.

As medições foram realizadas em três idades, sendo elas 42, 70 e 112 dias.

3 Resultados

Conforme medições realizadas em três idades (42, 70, 112 dias) as alterações evidenciaram crescimento da resistividade elétrica superficial ao longo do tempo devido a hidratação do cimento e redução da condutividade elétrica nos poros. Constatou-se também que a medida em que se aumentava as condições de agressividade do meio, havia diminuição da resistividade elétrica superficial, possibilitando maior tendência a corrosão do concreto. As Tabelas 1 e 2 mostram os resultados obtidos para os dois tipos de cimento utilizados:

Tabela 1 – Resistividade elétrica ao longo do tempo

Série 1 – Concreto produzido com cimento CP III 32 RS				
Média da Resistividade Elétrica Superficial KΩ.cm				
		42 dias	70 dias	112 dias
Lote 1	Referência	123,9	133	171
Lote 2	Exposição Fraca	85,7	99,4	184,15
Lote 3	Exposição Moderada	75,9	94,6	121,65
Lote 4	Exposição Severa	67,6	89,5	110,4

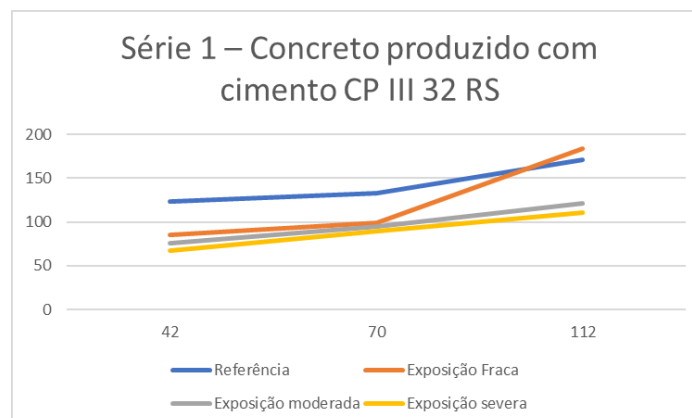
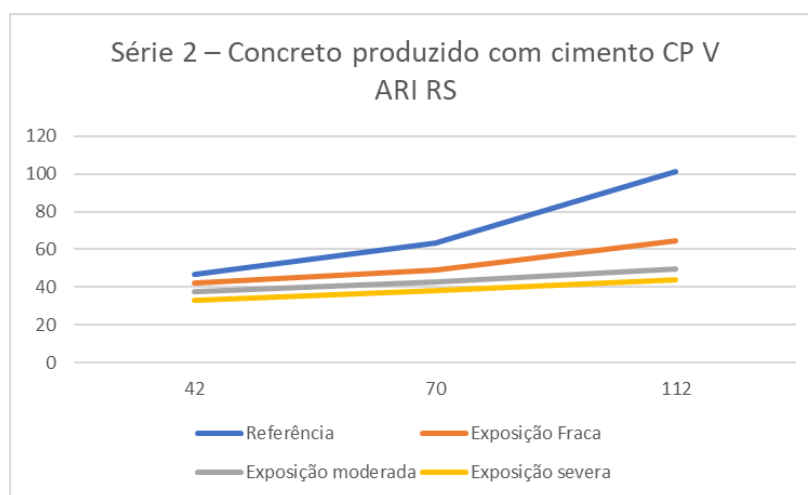


Tabela 2 – Resistividade elétrica ao longo do tempo

Série 2 – Concreto produzido com cimento CP V ARI RS				
Média da Resistividade Elétrica Superficial KΩ.cm				
		42 dias	70 dias	112 dias
Lote 1	Referência	46,9	63,3	101,5
Lote 2	Exposição Fraca	42	49	64,3
Lote 3	Exposição Moderada	37,6	42,8	49,8
Lote 4	Exposição Severa	33	38,1	44,1



Com o passar do tempo, houve um aumento na resistividade elétrica, conforme os padrões estabelecidos pelo embasamento teórico. Esse aumento é atribuído à diminuição da capacidade de condução elétrica nos poros. Além disso, vários outros elementos impactam no aumento da resistividade elétrica em todas as amostras de corpos de prova, incluindo a hidratação do cimento e o progressivo endurecimento do concreto.

Fazendo uma correlação entre o ataque de sulfatos e a resistividade elétrica, pode-se verificar que o fator tempo é significativo para fazer com que haja uma relação visível entre os dois ensaios para ocorrer a queda dos valores.

Ao longo do período, observa-se um crescimento gradual na resistividade elétrica devido às reações químicas que promovem o endurecimento do concreto. Paralelamente, à medida que a exposição ao teor de sulfato de magnésio é intensificada, verifica-se uma redução na resistividade elétrica.



4 Conclusão

A partir do exposto anteriormente, fica claro que a resistividade elétrica está relacionada com as características microestruturais da matriz cimentícia. Isso inclui a distribuição do tamanho dos poros, a conectividade entre os poros e a porosidade total. Ao correlacionar o ataque de sulfatos com a resistividade elétrica, observa-se que o fator tempo desempenha um papel significativo no processo.

A resistividade elétrica do concreto é uma propriedade extremamente sensível às características microestruturais da matriz cimentícia. Fatores relacionados à estrutura de poros, à composição e à concentração da água livre presente nos poros do concreto e às características ambientais às quais o concreto está submetido apresentam reflexos diretos na resistividade do concreto. De uma forma mais abrangente, pode-se afirmar que a resistividade elétrica apresenta grande sensibilidade a fatores que indicam a capacidade do concreto em resistir à penetração de substâncias líquidas ou gasosas. Essa propriedade é fundamentalmente relacionada à permeabilidade de fluidos e à difusividade de íons através dos poros do material e, no caso do concreto armado, está intimamente relacionada à penetração de agentes agressivos no seu interior e também à velocidade do processo de corrosão das armaduras, a partir do momento em que ela se inicie. Por esses motivos, a resistividade elétrica constitui-se em um parâmetro que abrange propriedades fundamentais relacionadas à durabilidade das estruturas de concreto armado e pode ser utilizada como parâmetro de previsão da vida útil de estruturas existentes, a partir de ensaios não destrutivos de fácil execução que podem ser realizados in loco.



5 Referências

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16.697: Cimento Portland**. Rio de Janeiro. 2018.
- Al-AKHRAS, N. M. **Durability of metakaolin concrete to sulfate attack**. Cement and Concrete Research, Vol. 36, p. 1727 – 1734, 2006
- Andrade, C., D'Andréa, R. (2011), **“La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad”**, Revista ALCONPAT, V.1, No. 2, pp. 93-101
- BROWN. P.W. **Thaumasite formation and other forms of sulfate attack**. Cement & Concrete Composites. 2002.
- FERREIRA, R. M.; JALALI, S. **NDT measurements for the prediction of 28-day compressive strength**. NDT & E International, v. 43, n. 2, p. 55-61, 2010.
- GIROTTTO, E. M.; SANTOS, I. A. **Medidas de resistividade elétrica dc em sólidos: como efetuá-las corretamente**. Química Nova, v. 25, n. 4, 639 – 647. 2002.
- MEDEIROS-JUNIOR, R.; LIMA, M. **Electrical resistivity of unsaturated concrete using different types of cement**. Construction and Building materials. v. 107, 11- 16. 2016.
- MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de et al. **Resistência a compressão em testemunho de concreto: influência do fator de esbeltez, diâmetro da amostra e método de extração**. Reec - Revista Eletrônica de Engenharia Civil, [s.l.], v. 13, n. 1, p.240-250, 29 mar. 2017. Universidade Federal de Goiás.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO. P.J.M. **Concreto – Microestrutura, propriedades e materiais**. 3ª Ed. São Paulo: Ibracon, 674p, 2008.
- PETRU, M; WANG, X. **Mode I fracture evaluation of CFRP-to-concrete interfaces subject to aggressive environments agents: Freeze-thaw cycles, acid and alkaline solution**. Elsevier. V. Part B 168. 581-588. 2019
- SANTHANAM, M; COHEN, M. D; OLEK, J. **Mechanism of sulfate attack: a fresh look**. Cement and Concrete Research. V 33, pg. 341-346. 2003.
- SANTOS. L.; **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto**. Brasília:UnB, 2006.
- SOUZA, R.B., 2006. SOUZA, R. B. de. **Suscetibilidade de pastas de cimento ao ataque por sulfatos – método de ensaio acelerado**. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.
- ANAIS DO 64º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2023 – 64CBC2023