

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA,  
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**TRANSPORTE DE CLORETOS EM  
CONCRETOS COM ADIÇÕES MINERAIS E O  
DESEMPENHO EM RELAÇÃO À CORROSÃO  
DAS ARMADURAS**

**ALEX MIZAEL MARTINS**

D0147C16  
GOIÂNIA  
2016

---

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR  
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES  
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

**1. Identificação do material bibliográfico:**       **Dissertação**       **Tese**

**2. Identificação da Tese ou Dissertação:**

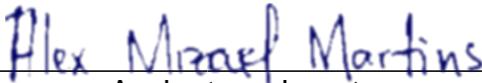
Nome completo do autor: Alex Mizael Martins

Título do trabalho: Transporte de cloretos em concretos com adições minerais e o desempenho em relação à corrosão das armaduras

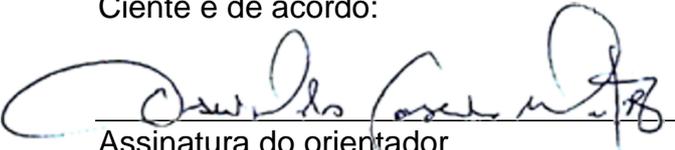
**3. Informações de acesso ao documento:**

Concorda com a liberação total do documento  SIM       NÃO

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.

  
Assinatura do autor

Ciente e de acordo:

  
Assinatura do orientador

Data: 17 / 10 / 2017

ALEX MIZAEEL MARTINS

**TRANSPORTE DE CLORETOS EM  
CONCRETOS COM ADIÇÕES MINERAIS E O  
DESEMPENHO EM RELAÇÃO À CORROSÃO  
DAS ARMADURAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre.

Área de concentração: Construção Civil

Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Cascudo

D0147C16

GOIÂNIA

2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Mizael Martins, Alex

Transporte de cloretos em concretos com adições minerais e o desempenho em relação à corrosão das armaduras [manuscrito] / Alex Mizael Martins. - 2016.  
CLXVI, 166 f.

Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Cascudo de Matos.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Goiânia, 2016.

Bibliografia. Apêndice.

Inclui siglas, fotografias, abreviaturas, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Durabilidade. 2. Sílica ativa. 3. Nanossílica. 4. Metacaulim. 5. Cloretos. I. Cascudo de Matos, Oswaldo, orient. II. Título.

CDU 624

Ata de Nº 0147 da sessão de julgamento da  
Dissertação do aluno Alex Mizael Martins da  
área de concentração Construção Civil do PPG  
em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil.

Aos 16 dias do mês de dezembro de 2016, às 14h30min, no Auditório Biolkino Pereira da Escola de Engenharia Civil e Ambiental da UFG, reuniu-se a banca examinadora designada na forma regimental pela Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil para julgar a Dissertação intitulada “**Transporte de Cloretos em Concretos com Adições Mineraias e o Desempenho em Relação à Corrosão das Armaduras**”, apresentada pelo aluno **Alex Mizael Martins** como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de MESTRE, área de concentração Construção Civil. A Banca Examinadora foi Presidida pelo Prof. Dr. Oswaldo Cascudo Matos (GECON/UFG), tendo como membros a Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Helena Carasek Cascudo (GECON/UFG), e a Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Andrielli Moraes de Oliveira (UFPA). Aberta a sessão pública, o candidato teve a oportunidade de expor o trabalho. Após a exposição, o aluno foi arguido oralmente pelos membros da Banca, os quais concluíram pelos seguintes resultados:

Membro	Instituição	Função	Resultado
Oswaldo Cascudo Matos	GECON/UFG	Presidente	<u>APROVADO</u>
Helena Carasek Cascudo	GECON/UFG	Examinadora Interna	<u>APROVADO</u>
Andrielli Moraes de Oliveira	UFPA	Examinadora Externa	<u>APROVADO</u>

Tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema de sua Dissertação, a Banca Examinadora concluiu pela **aprovação** do candidato **sem restrições**.

Não tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema de sua Dissertação, a Banca Examinadora concluiu pela **reprovação** do candidato, conforme as seguintes justificativas:

---

---

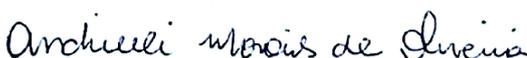
---

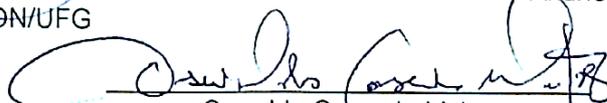
---

---

Nos termos do Regulamento Geral dos Cursos de pós-graduação desta Universidade, foi lavrada a presente ata que, lida e julgada conforme, segue assinada pelos membros da **Banca Examinadora** e pelo **candidato**.

  
Helena Carasek Cascudo  
GECON/UFG

  
Andrielli Moraes de Oliveira  
UFPA

  
Oswaldo Cascudo Matos  
GECON/UFG

Candidato: Alex Mizael Martins Alex Mizael Martins

## AGRADECIMENTOS

À minha mãe e irmã por me darem suporte para chegar até aqui.

Ao meu tio William, por me influenciar e me dar suporte, inclusive financeiro, para me formar engenheiro na universidade dos meus sonhos.

Aos meus padrinhos, por me acolherem nos momentos em que precisei.

À minha família, de modo geral, pois esta é uma instituição indispensável na formação do caráter de uma pessoa.

Aos mais que professores Oswaldo Cascudo e Helena Carasek pela orientação competente, pelo exemplo de profissionalismo e pela motivação desde os tempos da graduação. Muito obrigado pelas oportunidades.

Aos demais professores do GECON e da graduação que estiveram presentes ao longo da minha caminhada acadêmica.

Aos colegas do mestrado com os quais tive a oportunidade de conviver mais de perto, Cecile, Flávio, Gabi, Gustavo, Raquel, Victor Leandro, Patrícia Gambale, Aline Crispim e ao Rodrigo Teodoro, por ser tão solícito e pelas informações e materiais fornecidos.

Ao meu amigo Thomas.

Ao colega de mestrado, amigo e parceiro Plínio Pires, pessoa que conheço desde os tempos de cursinho pré-vestibular e já dividiu comigo bons e maus momentos.

À colega de mestrado, amiga, parceira de projeto e da vida e futura namorada, Marina, por enfrentar muitos problemas comigo.

Ao pessoal da república, em especial ao Zé Henrique. Pessoas que sempre foram muito solícitas quando precisei.

Aos alunos de iniciação científica, Eleude, Guilherme e Gabriel, pela troca de conhecimentos e pela ajuda no decorrer do programa experimental.

Ao meu tio Wellington e ao meu amigo Renato por me ajudarem na confecção das armaduras do programa experimental.

À Gerência de Pesquisa, Serviços e Inovação Tecnológica de Furnas Centrais Elétricas S.A. pela realização dos ensaios e doação do material necessário à confecção dos corpos de prova e por disponibilizar os laboratórios e o pessoal. Em especial ao Eng. Mestre Alexandre Castro, pelas orientações competentes, pela paciência, por ser tão solícito e também pelos conselhos de vida.

À toda equipe de Furnas, pela confecção dos corpos de prova, realização dos ensaios e pelos momentos divertidos, em especial ao Mão de Onça, Jeguinho, Paulo Arcanjo, Silvio Cândido, Joaquim, Seu Jorge, Fábio, Jésus e Renato Batista.

Ao Centro de Gestão do Espaço Físico da UFG (CEGEF), pela confecção cuidadosa das fôrmas e, em especial ao Clismagleiton, pelo corte do aço utilizado no programa experimental e pelos momentos cômicos.

Ao técnico laboratorista do LABITECC, Vitor, pela inestimável ajuda na condução do programa experimental.

À Votorantim Cimentos pela doação do cimento indispensável à execução do programa experimental.

À Metacaulim do Brasil pela doação dos metacaulins utilizados, em especial ao Eng. Me. Guilherme Gallo.

À Silicon, pelo fornecimento da nanossílica utilizada na pesquisa, em especial ao Eng. Eduardo Cherutti.

À CAPES pelo apoio financeiro indispensável na forma de concessão de bolsa.

A Deus, acima de tudo, por ter colocado cada uma dessas pessoas em minha vida e por me abençoar tanto.

*“A mente que se abre a uma nova ideia  
jamais voltará ao seu tamanho original”.*  
*Albert Einstein*

## RESUMO

A introdução da energia eólica na matriz energética brasileira é de suma importância para a política energética nacional. Nesse contexto, a viabilidade das torres eólicas é questão fundamental. No Brasil essas torres são construídas, principalmente, em concreto armado em regiões de alta agressividade (regiões litorâneas, por terem maior potencial eólico) e, portanto, faz-se necessário o desenvolvimento de concretos de alto desempenho que sejam capazes de resistir às ações ambientais às quais são submetidos, principalmente à ação dos cloretos, de maneira que essas estruturas atinjam a vida útil de projeto previamente definida, garantindo assim a viabilidade das torres. Nesse sentido, o presente trabalho avalia as propriedades mecânicas, os mecanismos de transporte de cloretos e o desempenho em relação à corrosão das armaduras, de concretos que contêm adições minerais pozolânicas de alto desempenho, a fim de avaliar a influência dessas adições nessas propriedades. Foram elaborados três diferentes proporcionamentos de estudo contendo respectivamente, 9% de sílica ativa em composição com 1% de nanossílica, 5% de um metacaulim de elevada finura em composição com 5% de um metacaulim um pouco menos fino, ambos de elevada pozolanidade e um proporcionamento contendo exclusivamente 10% do metacaulim de maior finura, além de um proporcionamento de referência. São apresentadas análises relacionadas ao transporte de cloretos: penetrabilidade e difusão; análises relacionadas à corrosão das armaduras: indução da corrosão por meio de ciclos de molhagem em solução agressiva contendo cloretos, medidas de resistividade elétrica superficial do concreto e potencial de corrosão, além da caracterização mecânica. Os concretos com incorporação de adição pozolânica apresentaram, em geral, melhorias em suas propriedades mecânicas. Já nas propriedades de transporte de cloretos, as melhorias advindas das adições minerais foram mais significativas, assim como no desempenho em relação à corrosão das armaduras. Desse modo, concluiu-se que a incorporação das diferentes adições minerais estudadas no presente trabalho alterou significativamente as propriedades do concreto, com destaque positivo para as propriedades associadas à durabilidade, nas quais os benefícios do uso da adição mineral são mais pronunciados.

**Palavras-chave:** Concreto. Durabilidade. Sílica ativa. Nanossílica. Metacaulim. Cloretos.

## ABSTRACT

The introduction of wind energy into the Brazilian energy matrix is of paramount importance for national energy policy. In this context, the viability of wind towers is a fundamental issue. In Brazil, these towers are built mainly in reinforced concrete, in regions of high aggressiveness (coastal regions, because of their greater wind potential) and, therefore, it is necessary to develop high performance concretes that are able to withstand environmental actions to which they are subjected, mainly the action of the chlorides, so that these structures reach the previously defined project life, thus guaranteeing the viability of the towers. In this sense, the present work evaluates the mechanical properties, the mechanisms of transport of chlorides and the performance in relation to the corrosion of the reinforcement, in concretes that contain high performance pozzolanic mineral additions, in order to evaluate the influence of the presence of these additions in these properties. Three different study mixes were developed containing respectively, 9% of silica fume in composition with 1% of nanosilica, 5% of a high fineness metakaolin in composition with 5% of a slightly less fine metakaolin, both with high pozzolanic activity and a mix containing only 10% of the finest metakaolin, in addition to a reference mix. Analyzes related to the chloride transport are presented: penetrability and diffusion; analyzes related to the corrosion of reinforcement: induction of corrosion by aggressive solution wetting cycles and air drying, surface electrical resistivity of concrete and corrosion potential, besides the mechanical characterization. The concretes with incorporation of pozzolanic addition showed, in general, improvements in the mechanical properties. In the chloride transport properties and corrosion performance of the reinforcements, the improvements from the mineral additions were significant. Thus, it was concluded that the incorporation of the different mineral additions studied in the present work significantly altered the properties of the concrete, with a positive highlight for the properties associated with durability, in which the benefits of using mineral addition are more pronounced.

**Keywords:** Concrete. Durability. Silica fume. Nanosilica. Metakaolin. Chlorides.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Ordem cronológica das 14 dissertações desenvolvidas, até o presente momento, neste projeto de pesquisa. ....	23
Figura 2.1 - Esquema da estrutura interna do concreto (OLLIVIER; TORRENTI, 2014). ....	33
Figura 2.2 - Disposição da água em capilares do concreto (FUSCO, 2008). ....	33
Figura 2.3 - Modelo de vida útil proposto por Tuutti (1982) .....	39
Figura 2.4 - Vida útil das estruturas de concreto armado com base na corrosão das armaduras (HELENE, 1993) .....	39
Figura 2.5 - Mecanismos de iniciação da corrosão das armaduras (APOSTOLOPOULOS; PAPADAKIS, 2008) - modificado pelo autor. ....	40
Figura 2.6 - Evolução da composição da solução intersticial de uma pasta de cimento ao longo do tempo (LONGUET <i>et al.</i> , 1973 <i>apud</i> BAROGHEL-BOUNY <i>et al.</i> , 2014) .....	41
Figura 2.7 - Camada protetora (filme óxido) do aço (GHODS <i>et al.</i> , 2012) - modificado pelo autor. ....	42
Figura 2.8 - Pilha eletroquímica no concreto armado (CASCUDO, 1997). ....	43
Figura 2.9 - Formas de ocorrência de cloretos no concreto (TUUTTI, 1982). ....	45
Figura 2.10 - Variação de teor crítico de cloretos em função da qualidade do concreto (CEB 183, 1992). ....	46
Figura 2.11 - Esquema do complexo transitório causado por cloreto, causando corrosão por pites (TREADAWAY <i>et al.</i> , 1988 <i>apud</i> CASCUDO, 1997). ....	48
Figura 2.12 - Efeito da umidade na resistividade elétrica do concreto (GJORV <i>et al.</i> , 1977 <i>apud</i> GJORV, 2009). ....	49
Figura 2.13 - Esquema do ensaio de resistividade elétrica, método dos quatro eletrodos (PULLAR, 1978). ....	50
Figura 2.14 - Esquema para a medida dos potenciais de corrosão (MCKENZIE 1987 <i>apud</i> CASCUDO, 1997). ....	52
Figura 2.15 - Efeito da adição mineral na morfologia da zona de transição aos 28 dias: (a) sem adição; (b) 10% de sílica ativa em relação à massa de cimento (DUAN <i>et al.</i> , 2013). ....	54

Figura 2.16 - Dados de resistência à compressão, aos 28 dias de idade, de concretos estudados por vários autores, os quais usaram 10% de sílica ativa em substituição parcial ao cimento. ....	57
Figura 2.17 - Dados de avaliação da penetrabilidade de cloretos, aos 28 dias de idade, dado pela ASTM C1202, em concretos com 10% de sílica ativa para diferentes relações água/ligante.....	59
Figura 2.18 - Dados de avaliação da penetração de cloretos, aos 91 dias de idade, em concretos com diferentes teores de sílica ativa.....	60
Figura 2.19 - Dados de coeficiente de difusão em estado não estacionário, aos 28 dias de idade, em concretos com 10% de sílica ativa. ....	61
Figura 2.20 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos em função do teor de sílica ativa (BAGHERI <i>et al.</i> , 2013).....	62
Figura 2.21 - Dados dos trabalhos de Ferreira (2003), Sun <i>et al.</i> (2004) e Oliveira (2007) avaliam a resistividade elétrica em concretos contendo 10% de substituição de sílica ativa. ....	63
Figura 2.22 - Dados, dos trabalhos de Ferreira (2003) e Oliveira (2007), que mostram a influência da sílica ativa no potencial de corrosão. ....	64
Figura 2.23 - Dados de resistência à compressão, aos 28 dias de idade, dos concretos estudados por vários autores, os quais usaram 10 % de substituição de metacaulim em relação à massa de cimento. ....	65
Figura 2.24 - Dados de avaliação da penetrabilidade de cloretos, aos 28 dias de idade, de acordo com a ASTM C1202, em concretos com substituição de 10% de metacaulim e diferentes relações água/ligante.....	69
Figura 2.25 - Dados de avaliação da penetração de cloretos, aos 91 dias de idade, em concretos com diferentes teores de substituição em massa de metacaulim (HASSAN <i>et al.</i> , 2012).....	69
Figura 2.26 - Coeficiente de difusão no estado não estacionário, de concretos com metacaulim, em função da idade (FERREIRA <i>et al.</i> , 2015). ....	70
Figura 2.27 - Resistência elétrica de concretos de relação ag/lig 0,45 com 10% de substituição em massa de metacaulim (MADANDOUST; MOUSAVI, 2012; FERREIRA <i>et al.</i> , 2015).....	72
Figura 2.28 - Valores médios do potencial de corrosão (OLIVEIRA, 2007).....	73

Figura 2.29 - Relação entre o tamanho e a área superficial da partícula (SOBOLEV; GUTIÉRREZ, 2005) -modificado pelo autor. ....	74
Figura 2.30 - Resistência à compressão de concretos com nanossílica aos 28 dias de idade (DU <i>et al.</i> , 2015).....	76
Figura 2.31 - Resistência à compressão das argamassas contendo nanossílica estudadas por Zahedi <i>et al.</i> (2015) - modificado pelo autor. ....	77
Figura 2.32 - Avaliação da penetrabilidade de cloretos em concretos com adição de nanossílica e relação ag/lig igual a 0,4 (SAID <i>et al.</i> , 2012). ....	78
Figura 2.33 - Resistividade elétrica de concretos com diferentes teores de nanossílica, aos 91 dias de idade (KHALOO <i>et al.</i> , 2016).....	80
Figura 2.34 - Resistividade elétrica de concretos com diferentes teores de nanossílica, aos 91 dias de idade (MADANI <i>et al.</i> , 2014). ....	81
Figura 3.1 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo. ....	88
Figura 3.2 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo.....	89
Figura 3.3 - Curvas de dosagens de concretos obtidas pelo método do IPT/EPUSP (LOPES, 2011). ....	92
Figura 3.4 - Protótipo de viga destinado aos ensaios de penetrabilidade e difusão de cloretos: (a) antes e (b) depois da concretagem.....	95
Figura 3.5 - Protótipo de viga e local de extração dos testemunhos de 0,10 m de diâmetro x 0,20 m de altura. ....	96
Figura 3.6 - Corpo de prova cúbico empregado no ensaio de potencial de corrosão: (a) antes e (b) depois da concretagem. ....	97
Figura 3.7 - Aspecto da barra de aço antes e depois da limpeza mecânica. ....	97
Figura 3.8 - Preparação das barras de aço utilizadas no ensaio de potencial de corrosão.....	98
Figura 3.9 - Fôrmas dos corpos de prova prismáticos: (a) CPs destinados aos ensaios de penetrabilidade e difusão de cloretos; (b) CPs destinados aos ensaios de potencial de corrosão e resistividade elétrica.....	98
Figura 3.10 - Sequência do trabalho realizado desde a retirada do concreto da betoneira até a colocação de sacos de aniagem úmidos sobre as fôrmas. ....	100
Figura 3.11 - Local de armazenamento dos corpos de prova. ....	100
Figura 3.12 - Obtenção das amostras para o ensaio de penetrabilidade de cloretos: (a) Extração dos CPs cilíndricos a partir do protótipo de viga; (b) corte das “bolachas”.....	103

Figura 3.13 - Preparação e condicionamento das amostras para o ensaio de penetrabilidade de cloretos. ....	103
Figura 3.14 - Ensaio de penetrabilidade de íons cloro dado pela ASTM C1202. ....	104
Figura 3.15 - Configuração do ensaio acelerado de difusão de cloretos onde: (a) proteção de borracha; (b) solução com NaOH; (c) ânodo; (d) amostra de concreto; (e) solução com NaCl; (f) cátodo; (g) suporte plástico e (h) caixa plástica (NORDTEST, 1999). ....	106
Figura 3.16 - Etapas do ensaio de difusão/migração de cloretos: (a) saturação da amostra; (b) amostras em ensaio. ....	106
Figura 3.17 - Etapas pós ensaio de difusão de cloretos: (a) aspecto da amostra após a aspersão do AgNO <sub>3</sub> ; (b) método de medição da frente de cloretos por meio de paquímetro. ....	107
Figura 3.18 - Período de molhagem/imersão dos CPs em solução agressiva contendo cloretos na concentração de 5% em massa. ....	108
Figura 3.19 – Procedimento de secagem dos CPs: (a) aspecto dos CPs logo após o período de imersão; (b) período de secagem ao ar dos CPs. ....	109
Figura 3.20 - Aparelho usado no teste Wenner. ....	109
Figura 3.21 - Teste de resistividade elétrica no concreto. ....	110
Figura 3.22 - Realização do ensaio de potencial de corrosão: (a) eletrodo e voltímetro de referência; (b) execução do ensaio. ....	111
Figura 3.23 - Panorama geral do programa experimental. ....	112
Figura 4.1 - Resistência à compressão média em função da idade para os concretos estudados. ....	115
Figura 4.2 - Valores médios de resistência à compressão para cada tipo de adição mineral utilizada, com o desvio-padrão, considerando as duas relações ag/lig. ....	117
Figura 4.3 – Resistência à compressão: (a) resultado da análise pelo teste de Duncan, considerando apenas a média global por relação ag/lig e desvio-padrão e (b) valores médios de resistência à compressão para cada tipo de concreto em função da relação ag/lig. ....	119
Figura 4.4 - Dados de resistência à compressão: (a) resultado da análise pelo teste de Duncan, expressando a média global de resistência em função da idade, com o desvio-padrão; (b) resultados médios de resistência à compressão dos concretos estudados em função da idade, separados por relação ag/lig, para cada tipo de adição mineral. ....	121

Figura 4.5 - Gráfico das médias globais de módulo de elasticidade (com seus desvios-padrão) em função das composições com adições minerais, tendo-se nas linhas tracejadas as divisões dos grupos que se diferem estatisticamente. ....	124
Figura 4.6 - Gráfico das médias globais de módulo de elasticidade (com desvio padrão) em função da relação água/ligante.....	125
Figura 4.7 - Gráfico das médias globais de módulo de elasticidade (com seus desvios-padrão) em função da idade analisada. As linhas tracejadas demarcam os grupos que se diferem estatisticamente. ....	126
Figura 4.8 - Penetrabilidade de cloretos média dos concretos estudados aos 91 dias e a classificação segundo a norma ASTM C 1202.....	127
Figura 4.9 - Gráfico das médias globais de carga passante no ensaio de penetrabilidade de cloretos (com seus desvios-padrão) em função da relação ag/lig. ....	130
Figura 4.10 - Gráfico das médias globais de carga passante no ensaio de penetrabilidade de cloretos (com seus desvios-padrão) em função das composições com adições minerais. ....	131
Figura 4.11 - Resultados médios do coeficiente de difusão/migração de cloretos no estado não estacionário em função do tipo de adição mineral empregado aos 91 dias. ....	132
Figura 4.12 - Gráfico das médias globais do coeficiente de difusão de cloretos em estado não estacionário (com seus desvios-padrão) em função da relação ag/lig. ....	135
Figura 4.13 - Gráfico das médias globais do coeficiente de difusão de cloretos em estado não estacionário (com seus desvios-padrão) em função das composições com adições minerais. ....	136
Figura 4.14 - Resistividade elétrica em função do tempo para os concretos de relação ag/lig igual a 0,6. ....	137
Figura 4.15 - Resistividade elétrica em função do tempo para os concretos com relação ag/lig igual a 0,4. ....	137
Figura 4.16 - Resistividade elétrica média após os 13 ciclos de indução da corrosão em solução de cloretos.....	139
Figura 4.17 - Potencial de corrosão em função do tempo para os concretos com relação ag/lig igual a 0,6. ....	140
Figura 4.18 - Potencial de corrosão em função do tempo para os concretos com relação ag/lig igual a 0,4. ....	141
Figura 4.19 - Potencial de corrosão após os 13 ciclos de indução em solução de cloretos....	142

Figura 4.20 - Correlação linear entre a carga passante, obtida pelo ensaio de penetrabilidade de cloretos e o coeficiente de difusão em regime não estacionário, obtido pelo ensaio de difusão/migração, denotando uma relação direta entre as variáveis..... 144

Figura 4.21 - Correlação não linear entre o potencial de corrosão e a resistividade elétrica superficial do concreto, denotando uma relação crescente entre as variáveis..... 145

Figura 4.22 - Correlação não linear entre o coeficiente de difusão em regime não estacionário, obtido pelo ensaio de difusão/migração, e a resistividade elétrica superficial, denotando uma relação inversa entre as variáveis..... 145

Figura 4.23 - Correlação não linear entre o coeficiente de difusão em regime não estacionário, obtido pelo ensaio de difusão/migração, e o potencial de corrosão, denotando uma relação inversa entre as variáveis..... 146

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Classificação das energias em razão de sua avaliação por meio de indicadores de sustentabilidade (EVANS <i>et al.</i> , 2009).....	24
Tabela 2.1 - Cobrimento mínimo de acordo com a classe de agressividade ambiental (NBR 6118, 2014). .....	29
Tabela 2.2 - Problemas relacionados à corrosão das armaduras ocorridos em diversos países (CONCIATORI, 2005 <i>apud</i> OLLIVIER; TORRENTI, 2014).....	31
Tabela 2.3 - Fontes de cloretos (CASCUDO, 1997). .....	44
Tabela 2.4 - Teores máximos de íons cloreto para proteção das armaduras do concreto (ABNT NBR 12655, 2015). .....	46
Tabela 2.5 - Critérios de avaliação da resistividade elétrica do CEB 192 (1989).....	51
Tabela 2.6 - Critério de avaliação do potencial de corrosão (ASTM C876, 2009). .....	53
Tabela 3.1 - Código de chamada das adições minerais. ....	84
Tabela 3.2 - Traços de concreto desenvolvidos no programa experimental. ....	84
Tabela 3.3 - Caracterização do cimento Portland.....	87
Tabela 3.4 - Características do agregado miúdo.....	88
Tabela 3.5 - Características do agregado graúdo.....	88
Tabela 3.6 - Caracterização física e química dos metacaulins e da sílica ativa. ....	90
Tabela 3.7 - Principais características da nanossílica, fornecidas pelo fabricante. ....	91
Tabela 3.8 - Características dos aditivos empregados na dosagem. ....	91
Tabela 3.9 - Proporcionamentos dos concretos estudados. ....	93
Tabela 3.10 - Resumo da quantidade de CPs concretados por ensaios realizados.....	94
Tabela 3.11 - Penetrabilidade de cloretos com base na carga passante (ASTM C1202, 2012).....	104
Tabela 3.12 - Classificação da resistência à penetração de cloretos em função do coeficiente de difusão/migração no regime não estacionário (NILSSON; NGO; GJØRV, 1998 <i>apud</i> GJØRV, 2015). .....	108
Tabela 3.13 - Critérios de avaliação do potencial de corrosão da ASTM C 1202, considerando as medidas com o eletrodo de calomelano saturado - ECS (mV). .....	111
Tabela 4.1 - Resistência à compressão média dos concretos nas diferentes idades analisadas.....	115

Tabela 4.2 - Resultado da ANOVA realizada para os dados de resistência à compressão, considerando como variáveis independentes a adição mineral, a relação ag/lig e a idade dos concretos. ....	116
Tabela 4.3 - Teste de Duncan (agrupamento de médias) para a resistência à compressão, levando-se em consideração o efeito das adições minerais. ....	117
Tabela 4.4 - Teste de Duncan para a resistência à compressão levando-se em consideração o efeito da idade. ....	120
Tabela 4.5 - Valores médios de módulo de elasticidade para os diversos concretos estudados. ....	122
Tabela 4.6 - Resultado da ANOVA realizada com os dados de módulo de elasticidade, considerando como variáveis independentes a adição mineral, a relação ag/lig e a idade dos concretos. ....	123
Tabela 4.7 - Comparação dos valores de carga passante dos concretos de relação ag/lig = 0,6 em relação aos de relação ag/lig = 0,4. ....	128
Tabela 4.8 - Resultado da ANOVA realizada com os dados do ensaio de penetrabilidade de cloretos. ....	129
Tabela 4.9 - Análise de variância (ANOVA) para os dados de coeficiente de difusão/migração de cloretos no estado não estacionário. ....	134
Tabela 4.10 - Resultados médios globais da pesquisa para todas as propriedades estudadas. Os melhores resultados estão sombreados de verde e de azul, respectivamente para as relações ag/lig iguais a 0,4 e 0,6. ....	147
Tabela 5.1 – Valores de resistência à compressão por amostra, média, desvio padrão e coeficiente de variação. ....	162
Tabela 5.2 - Valores de módulo de elasticidade por amostra, média, desvio padrão e coeficiente de variação. ....	164

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ag/lig	Relação água/ligante
ABEEólica	Associação Brasileira de Energia Eólica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise estatística de variância
ASTM	American Society for Testing and Materials
BET	Brunauer, Emmett e Teller – método de adsorção de nitrogênio
CP	Corpo de prova
CP II-F-40	Cimento Portland Composto, com fíler, classe 40
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sergio de Salvo Brito
CEB	Comite euro internacional du beton
DCT.C	Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas
DP	Desvio Padrão
EECA	Escola de Engenharia Civil e Ambiental
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Fcal	Parâmetro de Snedecor calculado, na análise de variância
Ftab	Parâmetro de Snedecor tabelado, na análise de variância
GL	Graus de liberdade, na análise de variância
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
IAE	Agência Internacional de Energia
IPCC	Intergovernamental de Mudanças Climática
LABITECC	Laboratório em Inovação Tecnológica em Construção Civil
MQ	Média dos quadrados, na análise de variância
NBR	Norma Brasileira Registrada
NM	Norma Mercosul
pH	Potencial Hidrogeniônico
PPG/GECON	Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Renováveis de Energia Elétrica
UFG	Universidade Federal de Goiás

## NOTAÇÃO DA QUÍMICA DO CIMENTO

Tradicionalmente, os compostos relacionados à química do cimento são escritos na forma de soma de óxidos.

◆ Óxidos:

C – CaO

S – SiO<sub>2</sub>

A – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

F – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

K – K<sub>2</sub>O

Na – Na<sub>2</sub>O

M – MgO

S – SO<sub>3</sub>

H – H<sub>2</sub>O

◆ Compostos do clínquer de cimento Portland:

C<sub>3</sub>S - 3CaO.SiO<sub>2</sub> – Silicato tricálcico ou Alita

C<sub>2</sub>S - 2CaO.SiO<sub>2</sub> – Silicato dicálcico ou Belita

C<sub>3</sub>A - 3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Aluminato tricálcico ou Celita

C<sub>4</sub>AF - 4CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Ferroaluminato tetracálcico ou Brownmillerita

◆ Principais compostos da hidratação do clínquer e de reações pozolânicas:

CH - Ca(OH)<sub>2</sub> – Hidróxido de cálcio ou portlandita

C-S-H - 3CaO.2SiO<sub>2</sub>.3H<sub>2</sub>O\* – Silicato de cálcio hidratado

C<sub>6</sub>A $\bar{S}$ <sub>3</sub>H<sub>32</sub> - 3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.3CaSO<sub>4</sub>.32H<sub>2</sub>O – Trissulfoaluminato de cálcio hidratado ou etringita

C<sub>4</sub>A $\bar{S}$ H<sub>18</sub> - 3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.CaSO<sub>4</sub>.18H<sub>2</sub>O – Monosulfoaluminato de cálcio hidratado ou monossulfato

C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub> - 3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O – Aluminato de cálcio hidratado ou Hidrogranada

C<sub>2</sub>ASH<sub>8</sub> - 2CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.SiO<sub>2</sub>.8H<sub>2</sub>O – Silicoaluminato de cálcio hidratado ou gehlenita hidratada ou stratlingita

\*A fórmula representa uma composição teórica, de acordo com o balanço estequiométrico da reação de hidratação, a relação Ca/Si pode ser diferente.

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>22</b>
<b>1.1. JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TEMA .....</b>	<b>23</b>
<b>1.2. OBJETIVOS.....</b>	<b>26</b>
<b>1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO.....</b>	<b>27</b>
<b>CAPÍTULO 2 REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>28</b>
<b>2.1. DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO .....</b>	<b>28</b>
<b>2.2. MICROESTRUTURA DO CONCRETO .....</b>	<b>31</b>
<b>2.3. MECANISMOS DE TRANSPORTE DE CLORETOS.....</b>	<b>34</b>
<b>2.3.1. Absorção capilar .....</b>	<b>35</b>
<b>2.3.2. Difusão .....</b>	<b>36</b>
<b>2.3.3. Migração iônica.....</b>	<b>37</b>
<b>2.4. CORROSÃO DAS ARMADURAS .....</b>	<b>38</b>
<b>2.4.1. Camada passivadora das armaduras.....</b>	<b>41</b>
<b>2.4.2. Processo eletroquímico da corrosão.....</b>	<b>42</b>
<b>2.4.3. Os cloretos no concreto .....</b>	<b>44</b>
<b>2.4.3.1. Corrosão induzida por cloretos .....</b>	<b>45</b>
<b>2.5. TÉCNICAS PARA AVALIAR A CORROSÃO DAS ARMADURAS.....</b>	<b>48</b>
<b>2.5.1. Resistividade elétrica.....</b>	<b>48</b>
<b>2.5.2. Potencial de corrosão.....</b>	<b>51</b>
<b>2.6. A INFLUÊNCIA DAS ADIÇÕES MINERAIS NA DURABILIDADE DO CONCRETO .....</b>	<b>53</b>
<b>2.6.1. Sílica ativa.....</b>	<b>55</b>
<b>2.6.1.1. Efeitos da adição de sílica ativa na resistência à compressão .....</b>	<b>56</b>
<b>2.6.1.2. Efeitos da adição de sílica ativa nas propriedades ligadas ao transporte de cloretos .....</b>	<b>58</b>
<b>2.6.1.3. Efeitos da adição de sílica ativa na corrosão das armaduras .....</b>	<b>63</b>
<b>2.6.2. Metacaulim.....</b>	<b>65</b>
<b>2.6.2.1. Efeitos da adição de metacaulim na resistência à compressão.....</b>	<b>65</b>

2.6.2.2.	Efeitos da adição de metacaulim nas propriedades ligadas ao transporte de cloretos .....	68
2.6.2.3.	Efeitos da adição de metacaulim na corrosão das armaduras .....	71
<b>2.6.3.</b>	<b>Nanossílica .....</b>	<b>73</b>
2.6.3.1.	Efeitos da adição de nanossílica na resistência à compressão .....	75
2.6.3.2.	Efeitos da adição de nanossílica no transporte de cloretos .....	78
2.6.3.3.	Efeitos da adição de nanossílica na corrosão das armaduras .....	79
<b>CAPÍTULO 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>		<b>82</b>
<b>3.1.</b>	<b>VARIÁVEIS ESTUDADAS.....</b>	<b>83</b>
3.1.1.	Relação ag/lig .....	83
3.1.2.	Adição mineral .....	83
<b>3.2.</b>	<b>CONDIÇÕES FIXAS DA PESQUISA .....</b>	<b>85</b>
3.2.1.	Procedimento de cura.....	85
3.2.2.	Idade do concreto ensaiado.....	85
<b>3.3.</b>	<b>MATERIAIS EMPREGADOS.....</b>	<b>86</b>
3.3.1.	Cimento.....	86
3.3.2.	Agregados .....	87
3.3.3.	Adições minerais .....	89
3.3.4.	Aço.....	91
<b>3.4.</b>	<b>CONCRETOS ESTUDADOS.....</b>	<b>92</b>
<b>3.5.</b>	<b>CORPOS DE PROVA .....</b>	<b>94</b>
3.5.1.	Protótipos de Viga.....	94
3.5.2.	CP's cúbicos .....	96
3.5.2.1.	Preparação das barras de aço.....	97
3.5.3.	Fôrmas .....	98
3.5.4.	Produção dos concretos e moldagem dos corpos de prova .....	99
<b>3.6.</b>	<b>MÉTODOS .....</b>	<b>100</b>
3.6.1.	Avaliação das propriedades mecânicas e da rigidez dos concretos.....	101
3.6.1.1.	Resistência à compressão .....	101
3.6.1.2.	Módulo de elasticidade.....	101
3.6.2.	Caracterização dos concretos no estado fresco .....	102

<b>3.6.3.</b>	<b>Métodos associados ao transporte de cloretos .....</b>	<b>102</b>
3.6.3.1.	Penetrabilidade de cloretos pela ASTM C 1202 .....	102
3.6.3.2.	Ensaio de difusão de cloretos - NT BUILD 492 .....	105
<b>3.6.4.</b>	<b>Método de indução da corrosão - ensaio acelerado de molhagem e secagem em solução de cloretos.....</b>	<b>108</b>
<b>3.6.5.</b>	<b>Métodos de monitoramento da corrosão .....</b>	<b>109</b>
3.6.5.1.	Resistividade elétrica superficial do concreto .....	109
3.6.5.2.	Potencial de corrosão .....	110
<b>3.7.</b>	<b>PANORAMA GERAL DO PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>112</b>
<b>3.8.</b>	<b>PROCEDIMENTO ESTATÍSTICO PARA ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>112</b>
<b>CAPÍTULO 4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>		<b>114</b>
<b>4.1.</b>	<b>RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....</b>	<b>114</b>
4.1.1.	Influência da adição mineral .....	117
4.1.2.	Influência da relação ag/lig.....	118
4.1.3.	Influência da idade .....	120
<b>4.2.</b>	<b>MÓDULO DE ELASTICIDADE .....</b>	<b>122</b>
4.2.1.	Influência da adição mineral .....	124
4.2.2.	Influência da relação ag/lig.....	125
4.2.3.	Influência da idade .....	125
<b>4.3.</b>	<b>PENETRABILIDADE DE CLORETOS.....</b>	<b>126</b>
4.3.1.	Efeito da relação ag/lig e das adições minerais na penetrabilidade de cloretos.....	128
4.3.1.1.	Influência da relação ag/lig .....	129
4.3.1.2.	Influência da adição mineral .....	130
<b>4.4.</b>	<b>DIFUSÃO DE CLORETOS.....</b>	<b>132</b>
4.4.1.	Efeito da relação ag/lig e das adições minerais na difusão de cloretos .....	134
4.4.1.1.	Influência da relação ag/lig .....	134
4.4.1.2.	Influência da adição mineral .....	135
<b>4.5.</b>	<b>RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL DO CONCRETO.....</b>	<b>136</b>
<b>4.6.</b>	<b>POTENCIAL DE CORROSÃO .....</b>	<b>140</b>

<b>4.7. DISCUSSÃO GLOBAL DOS RESULTADOS .....</b>	<b>142</b>
<b>CAPÍTULO 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>148</b>
<b>5.1. CONCLUSÕES.....</b>	<b>148</b>
<b>5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>150</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>151</b>
<b>APÊNDICE .....</b>	<b>162</b>

# CAPÍTULO 1

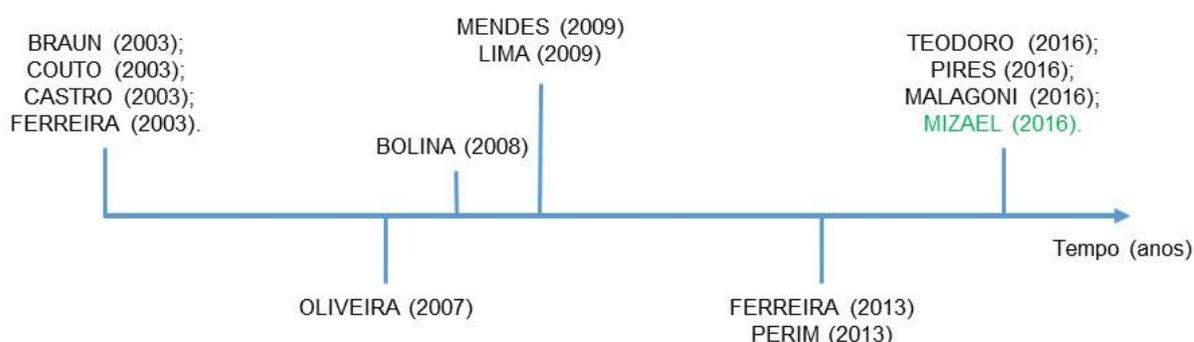
## INTRODUÇÃO

Este trabalho tem suas origens em um projeto de colaboração entre Furnas Centrais Elétricas e a Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás (UFG), sob orientação dos professores Dr. Oswaldo Cascudo e Dr<sup>a</sup>. Helena Carasek e a participação dos alunos de mestrado Alex Mizael, Marina Augusta Malagoni e Plínio Pires. O assunto geral abordado neste trabalho é a durabilidade do concreto, com vistas a contribuir, dentre várias finalidades e aplicações, para a especificação de concretos duráveis voltados às torres de parques eólicos, que são estratégicos sob o ponto de vista da política energética do Brasil. O projeto desenvolvido trata da durabilidade do concreto de forma geral (transporte de cloretos, carbonatação e mecanismos de transporte), tendo como variáveis o tipo e o teor de adições minerais e a relação água/ligante (ag/lig). Em sua fase atual, o projeto mencionado divide-se em três segmentos, que correspondem a três dissertações de mestrado: uma que trata dos mecanismos de transporte de massa (absorção e permeabilidade) na estrutura do concreto (MALAGONI, 2016), outra que estuda concretos submetidos a quatorze anos de carbonatação natural (PIRES, 2016) e esta que disserta sobre o fenômeno da difusão e penetrabilidade de cloretos na estrutura do concreto e o efeito deste na corrosão das armaduras.

É importante ressaltar que esse projeto de pesquisa se desenvolve há cerca de 15 anos, tendo suas origens em 2001, e apresentando como tema geral à época a durabilidade do concreto de cobrimento e como variáveis as adições minerais, os procedimentos de cura e a relação água/ligante. Ao todo já foram desenvolvidas 14 dissertações de mestrado ligadas ao projeto, cujos temas englobam a influência das condições de moldagem na camada de cobrimento (BRAUN, 2003), a influência das condições de cura nas características do cobrimento (COUTO, 2003), a influência das adições minerais e seu efeito na corrosão de armaduras induzidas por cloreto (FERREIRA, 2003), a influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito à carbonatação (CASTRO, 2003), a avaliação do desempenho de concretos com adições minerais quanto à corrosão das armaduras induzida por cloretos (OLIVEIRA, 2007), inibidores de corrosão: avaliação do desempenho frente a corrosão do aço induzida por carbonatação e cloretos (BOLINA, 2008), a avaliação das propriedades de transporte de massa em concretos contendo adições minerais (MENDES, 2009), a avaliação da

capacidade de proteção contra a corrosão da armadura induzida por cloretos de concretos com adições minerais e inibidores de corrosão (LIMA, 2009), a carbonatação natural de concretos com diferentes adições minerais após 10 anos de exposição (FERREIRA, 2013), a influência do metacaulim na durabilidade de concretos usuais de mercado sujeitos à carbonatação acelerada (PERIM, 2013) e o desempenho de concretos com metacaulim de alta reatividade (TEODORO, 2016). A Figura 1.1 apresenta, em ordem cronológica, as dissertações desenvolvidas até o presente momento, neste projeto de pesquisa.

Figura 1.1 - Ordem cronológica das 14 dissertações desenvolvidas, até o presente momento, neste projeto de pesquisa.



## 1.1. JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TEMA

As atuais diretrizes energéticas do mundo são pautadas, em sua maior parte, por fontes não renováveis de energia, tais como: petróleo, carvão mineral, gás natural, entre outros, cuja utilização implica em alguns problemas, principalmente relacionados ao meio ambiente como, por exemplo, os altos teores de gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) emitidos à atmosfera, os quais são altamente prejudiciais à camada de ozônio. Em 2014, o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2014) divulgou um relatório que expôs o quanto as emissões deste gás estão prejudicando o planeta, alertando para que as fontes de energia poluidoras sejam rapidamente substituídas, com um ônus de consequências irreversíveis caso isso não seja realizado. Além do desgaste gerado ao meio ambiente, as fontes não renováveis são esgotáveis. Desta forma, haverá inevitavelmente, um dia em que sua exploração irá cessar.

As fontes não renováveis de energia são, portanto, prejudiciais ao meio ambiente e limitadas, no sentido quantitativo. Em paralelo a isso, os conceitos do desenvolvimento sustentável têm fomentado uma busca, cada vez mais frequente, por fontes renováveis de energia, tais como a energia solar, a biomassa e a energia eólica, entre outras. Dentre as fontes de energia sustentável

que são comercialmente exploradas no mundo, a energia eólica tem ganhado bastante destaque no cenário energético nacional e internacional.

Evans *et al.* (2009) procederam a um levantamento na literatura mundial sobre as vantagens e desvantagens de várias fontes de energia, ressaltando, desse estudo, sete tipos de indicadores, a saber: preço, emissão de CO<sub>2</sub>, tecnologia disponível, eficiência, impactos sociais, consumo de água e uso de espaço físico. Com base em um sistema de pontos que varia de um a quatro, em que um é a melhor nota e quatro a pior, os autores concluíram que a energia eólica é a mais sustentável. A Tabela 1.1 apresenta a classificação das fontes de energia estudadas pelos referidos autores.

Tabela 1.1 - Classificação das energias em razão de sua avaliação por meio de indicadores de sustentabilidade (EVANS *et al.*, 2009)

	Fotovoltaica	Eólica	Hidrelétrica	Geotérmica
Preço	4	3	1	2
<b>Emissões de CO<sub>2</sub></b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>4</b>
Limitações tecnológicas	4	2	1	3
<b>Eficiência</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>3</b>
Uso de espaço físico	1	3	4	2
<b>Consumo de água</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Impactos sociais	2	1	4	3
<b>TOTAL</b>	<b>20</b>	<b>13</b>	<b>16</b>	<b>21</b>

De acordo com Melo (2014), a utilização desta fonte energética para a produção de energia elétrica, em escala comercial, teve início na década de 1970, quando se acentuou a primeira crise mundial do petróleo, com o intuito de minimizar a dependência dessa fonte. No Brasil, a energia eólica ganhou destaque em 2004, quando o governo federal criou o PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Renováveis de Energia Elétrica), visando o fomento de fontes sustentáveis de energia no Brasil, em especial a energia eólica.

A fonte eólica representa uma importante estratégia para a complementação da matriz energética nacional. Segundo o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (CRESESB, 2014), o potencial eólico brasileiro é de aproximadamente 143 GW, sendo as regiões litorâneas as mais contempladas. Contudo, esse potencial ainda é pouco explorado. A Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica, 2016) ressalta que a energia eólica representa aproximadamente 6,2% da matriz energética nacional com previsão de chegar a 10%

em 2018 mediante a implantação de parques eólicos em regiões costeiras. Mesmo com o baixo aproveitamento de seu potencial eólico, o Brasil completou o ano de 2015 em décimo lugar no *ranking* mundial de parques instalados, o que demonstra o elevado potencial de produção eólica no país.

As torres eólicas são compostas basicamente por fundação, fuste e hélices. Nos últimos anos o fuste tem sido preferencialmente constituído de anéis de concreto protendido. Este processo construtivo dá-se principalmente pela facilidade de se montar centrais de concreto próximas ao local da construção das torres (CHASTRE; LÚCIO, 2014). As estruturas desses fustes são expostas a diversos ambientes muito agressivos e têm que resistir e funcionar de forma adequada durante toda a vida útil de projeto (VUP) das torres.

Os parques eólicos são comissionados em regiões onde há regularidade de ventos, pois são locais viáveis para a geração de energia elétrica, portanto, em regiões de alto-mar (*offshore*) e regiões costeiras (*onshore*). A atmosfera marinha contém muitos agentes deletérios no ar, entre eles destacam-se os íons cloro (cloretos), que representam um grande problema, não ao concreto em si, mas à armadura de aço que está em seu interior. Uma vez que os cloretos atingem a camada passivadora da armadura, superando teores críticos, inicia-se o processo de corrosão, que é extremamente patológico e causa prejuízos muito importantes à estrutura. Essa ação deletéria diminui consideravelmente a durabilidade do concreto e assim, reduz sua vida útil. A corrosão das armaduras é considerada uma das manifestações patológicas mais graves que afeta as estruturas de concreto. Ela gera danos estruturais de alto impacto, além de transtornos consideráveis aos usuários, causando enormes prejuízos em vários países (CASCUDO, 1997).

Quando os íons cloro atingem a superfície do aço, eles começam a alterar sua película passivadora, deixando-o exposto à corrosão. Esse processo gerado pelos cloretos produz um tipo de corrosão metálica muito perigosa, uma vez que causa destruição puntiforme da armadura (pites), que pode evoluir para a estricção total da seção das armaduras, acompanhada de perda de sua capacidade portante, podendo levar a estrutura ao colapso. Dessa forma, impedir a entrada deste agente no concreto e, principalmente, impedir que ele alcance a profundidade das armaduras, constitui papel fundamental ao desenvolvimento de concretos mais duráveis.

Para estruturas de concreto que estão inseridas em ambientes ricos em cloretos, a penetração destes íons no concreto dá-se de duas formas principais, a saber: absorção capilar e difusão (CASCUDO, 1997; GJORV, 2009). A concepção de concretos duráveis basicamente resume-

se na capacidade que eles têm de impedir ou de retardar a penetração dos agentes deletérios em seu interior. Para tanto, deve-se atentar para a composição (proporcionamento) deste material, a fim de tornar sua estrutura mais impermeável, reduzindo a possibilidade de mobilidade de íons, como o cloreto por exemplo, no interior de seus poros.

Para avaliar a penetração de cloretos no concreto é necessário considerar diversos fatores, tais como: a relação ag/lig, o tipo de cimento empregado e, também, a composição com adições minerais. O efeito das adições minerais pode, inclusive, ser maior que o da relação ag/lig em alguns casos (GJORV, 2009). Assim, adições minerais como a sílica ativa, cinza volante, escória de alto forno e metacaulim, entre outras, podem conferir ao concreto elevada resistência à penetração de cloretos.

As adições minerais são materiais utilizados em substituição parcial à massa de cimento Portland e os teores de substituição dependem da natureza da adição. Elas, em geral, trazem benefícios ao concreto, como uma densificação da matriz cimentícia, reduzindo com isso sua porosidade, retardando a mobilidade dos cloretos. Dessa maneira, as adições minerais também têm papel fundamental na preservação das armaduras do concreto, evitando sua corrosão.

Em face do exposto, fica evidenciada a importância de um estudo que se aprofunde e que explore melhor a temática do desempenho de sistemas estruturais em concreto em meio a atmosferas ricas em cloretos, avaliando a questão do transporte e da penetrabilidade de cloretos no concreto, bem como a contribuição das adições minerais dentro desse contexto. Com isso, espera-se prestar uma contribuição importante à temática global da durabilidade de estruturas de concreto.

## **1.2. OBJETIVOS**

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a influência de adições minerais pozolânicas de alto desempenho (sílica ativa, nanossílica, metacaulim) nas propriedades mecânicas e nos mecanismos de transporte de cloretos que ocorrem no interior do concreto, e também avaliar o desempenho desses diferentes concretos com adições minerais em relação à corrosão das armaduras. Como objetivos específicos do trabalho, têm-se:

- avaliar de que modo as adições minerais e a relação ag/lig afetam a corrosão das armaduras, as propriedades de transporte de cloretos e a resistividade elétrica do concreto.
- propor, ao nível da ciência dos materiais, os principais argumentos que respaldam os resultados gerais obtidos, associados à durabilidade, para os concretos com as diferentes adições minerais.

### **1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO**

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos. O capítulo 1 aborda a introdução e a justificativa do tema, além dos objetivos e estruturação do trabalho.

No capítulo 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre os principais conceitos relativos à corrosão de armaduras, seus aspectos cinéticos e termodinâmicos. Também são feitas considerações sobre a ação dos cloretos na despassivação das armaduras e no início do processo corrosivo. Além disso, são apresentados resultados de desempenho quanto à durabilidade de concretos com a incorporação de adições minerais.

O capítulo 3 apresenta o programa experimental realizado neste trabalho, no qual estão descritas as variáveis, os materiais e os métodos empregados, além dos proporcionamentos dos concretos e corpos de prova utilizados.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos nesta pesquisa, além da análise estatística à qual os dados foram submetidos e as respectivas discussões. Também é apresentada a discussão global dos resultados e as principais correlações obtidas.

Por fim, no capítulo 5, apresentam-se as considerações finais do trabalho, contendo as conclusões, e as sugestões para novas pesquisas desenvolvidas acerca do tema em estudo.

## **CAPÍTULO 2**

### **REVISÃO DA LITERATURA**

Este capítulo tem por objetivo apresentar uma revisão da literatura sobre o transporte de cloretos no interior do concreto, ressaltando, para tanto, a estrutura porosa desse material, os mecanismos de transporte destes íons e o efeito das adições minerais nas propriedades do concreto. Também são feitas considerações sobre os mecanismos e técnicas para avaliar a corrosão das armaduras.

#### **2.1. DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO**

A durabilidade é o requisito mais desejado em estruturas de concreto armado posteriormente aos requisitos mecânicos, que são características triviais na engenharia (APOSTOLOPOULOS; PAPADAKIS, 2008). Ela é um conceito que está relacionado com a composição dos materiais constituintes do concreto armado, tais como o cimento e o aço e com o comportamento desse material quando exposto ao ambiente. De acordo com a NRB 15575-1 (ABNT, 2013), durabilidade é a capacidade das edificações em desempenhar suas funções, ao longo do tempo e sob condições de uso e manutenção especificadas.

O conceito de durabilidade está ligado à vida útil do concreto. Enquanto o primeiro é uma medida qualitativa do desempenho das estruturas, o segundo representa quantitativamente o seu desempenho. Em resumo, a vida útil quantifica a durabilidade do concreto, ou seja, ela corresponde ao tempo em que a estrutura consegue atender às exigências pré-estabelecidas, contado desde o início da sua operação.

A vida útil das estruturas de concreto armado está diretamente relacionada à sua porosidade e com o meio ambiente ao qual estão expostas, uma vez que estão, constantemente, sob a ação de agentes agressivos presentes nestes meios. O tipo, tamanho e distribuição dos poros, controlam os mecanismos de transporte através do concreto (CEB, 1993). Assim, sua durabilidade será maior quanto maior for a dificuldade de entrada de agentes agressivos pela rede de poros do concreto. Isso acontece quanto menor for a interconexão entre eles

(OLLIVIER; TORRENTI, 2014). O transporte de umidade e agentes agressivos provenientes do meio em que o concreto está exposto, através de sua estrutura porosa, pode produzir várias manifestações patológicas que deterioram o concreto em si e também suas armaduras, podendo comprometer seu desempenho e sua durabilidade, ou seja, diminuir sua vida útil. Dentre as várias manifestações patológicas, a corrosão do aço no concreto representa o caso mais comum de deterioração das estruturas de concreto armado, comprometendo sua durabilidade (APOSTOLOPOULOS; PAPADAKIS, 2008). Sendo assim, sua preservação é primordial para garantir um concreto durável.

As armaduras que reforçam o concreto são protegidas por ele tanto pela barreira física, quanto pela barreira química. A barreira física é representada pelo cobrimento e quanto maior ele for, mais tempo levará para que os agentes agressivos alcancem as armaduras, aumentando desse modo, a vida útil do concreto armado. Já a barreira química é representada pela camada passivadora que cobre as armaduras. A NBR 6118 (ABNT, 2014) estabelece critérios mínimos de cobrimento das armaduras de acordo com a agressividade do meio em que a estrutura será exposta, os quais visam à maior durabilidade das edificações. A Tabela 2.1 apresenta esses critérios.

Tabela 2.1 - Cobrimento mínimo de acordo com a classe de agressividade ambiental (NBR 6118, 2014).

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Laje	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Concreto protendido	Todos	30	35	45	55

Na Tabela 2.1, a classe de agressividade ambiental, representada pelos algarismos romanos I, II, III e IV, expressa ambientes de agressividade fraca, moderada, forte e muito forte, respectivamente.

Os critérios de espessura mínima do cobrimento especificados pela referida norma têm por objetivo guiar a execução de estruturas de concreto armado para garantir seu bom desempenho e uma boa durabilidade. Desde que seja bem executado, o cobrimento protege as armaduras da ação de agentes agressivos, devido a impermeabilidade que ele confere ao meio (HELENE, 1993). Uma vez que o cobrimento não respeita os critérios mínimos de espessura ou é mal

executado, torna-se incapaz de exercer sua função protetora, deixando o concreto livre à ação deletéria de agentes como o cloreto.

A corrosão é a manifestação patológica que causa os mais severos colapsos das estruturas e tem gerado bastante discussão entre o meio técnico e científico, devido à sua frequência e custos elevados de recuperação.

Vários países têm dispensado tempo e dinheiro para analisar essa patologia a fim de diminuir os prejuízos causados por ela. Os Estados Unidos consideram que 15% das suas 586.000 pontes estão estruturalmente comprometidas, principalmente devido à corrosão das armaduras, e gastam bilhões de dólares anualmente com a manutenção dessas estruturas (MANCIO; ZHANG; MONTEIRO, 2004). Já no Canadá, mais de 40% das pontes necessitam de reparo ou substituição devido à corrosão e geram gastos na ordem de 10 bilhões de dólares (CUSSON; ISGOR, 2004). A Tabela 2.2 mostra alguns problemas relacionados à corrosão que ocorreram em diversos países.

Tabela 2.2 - Problemas relacionados à corrosão das armaduras ocorridos em diversos países  
(CONCIATORI, 2005<sup>1</sup> *apud* OLLIVIER; TORRENTI, 2014).

Eventos	Local	Ano de ocorrência	Vida útil de serviço
Desabamento da ponte Silver	Vírginia (Estados Unidos)	1967	39 anos
Colapso do saguão do congresso em Berlim Ocidental	Berlim Ocidental (Alemanha)	1980	23 anos
Desabamento da ponte Mianus River	Massachusetts (Estados Unidos)	1983	26 anos
Demolição do Viaduto Elmenruti	Cantão de Uri (Suíça)	1984	14 anos
Desabamento do teto da piscina de Uster	Cantão de Zurich (Suíça)	1985	13 anos
Colapso de parte de um estacionamento na Universidade de Syracuse	Nova Iorque (Estados Unidos)	1995	-
Desabamento da ponte Walnut Street	Harrisburg, Pensilvânia (Estados Unidos)	1996	96 anos
Colapso de uma laje de estacionamento	Minnessota (Estados Unidos)	-	-
Colapso de uma laje no pátio de uma escola	Yverdon (Suíça)	2005	30 anos

Conhecer e entender os problemas relacionados ao processo corrosivo das armaduras é fundamental para minimizar as catástrofes como as apresentadas na Tabela 2.2 e também diminuir o prejuízo econômico que ele acarreta. Assim, a durabilidade das estruturas de concreto está intimamente relacionada à prevenção da corrosão das armaduras, sendo tanto maior a vida útil do concreto quanto maior for o tempo de iniciação da corrosão.

## 2.2. MICROESTRUTURA DO CONCRETO

O concreto é um material compósito formado, principalmente, pela mistura de agregados, cimento e água, podendo ser adicionados à mistura adições e aditivos (MEHTA; MONTEIRO, 2014; OLLIVIER; TORRENTI, 2014; NEVILLE 2016). A mistura de todos esses ingredientes

<sup>1</sup> Conciatori D. - *Effet du microclimat sur l'initiation de la corrosion des aciers d'armature dans les ouvrages en béton armé*, thèse n° 3408, EPFL, Lausanne, Suisse, 2006.

proporciona ao concreto, no estado endurecido, a formação de três fases, uma fase líquida, uma sólida e uma gasosa. A fase sólida é formada pelos agregados e pela pasta de cimento hidratada. A fase líquida é constituída pela solução intersticial do poro e a fase gasosa é uma mistura de ar e vapor de água (OLLIVIER; TORRENTI, 2014).

Na fase sólida, os agregados transferem ao concreto propriedades como o módulo de elasticidade e a pasta de cimento é responsável pela compacidade. A pasta de cimento é composta pelos produtos hidratados do cimento e partículas anidras. Os principais produtos hidratados que a formam são os silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) e os Hidróxidos de cálcio (CH). O C-S-H representa entre 50 e 60% do volume de sólidos da pasta e os CH entre 20 e 25%. O restante é composto por outros produtos, tais como os sulfoaluminatos e partículas não hidratadas. O C-S-H é o principal responsável pela resistência mecânica, pois exerce o papel de densificação da matriz cimentícia, já o CH exerce menos este papel e é menos estável (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

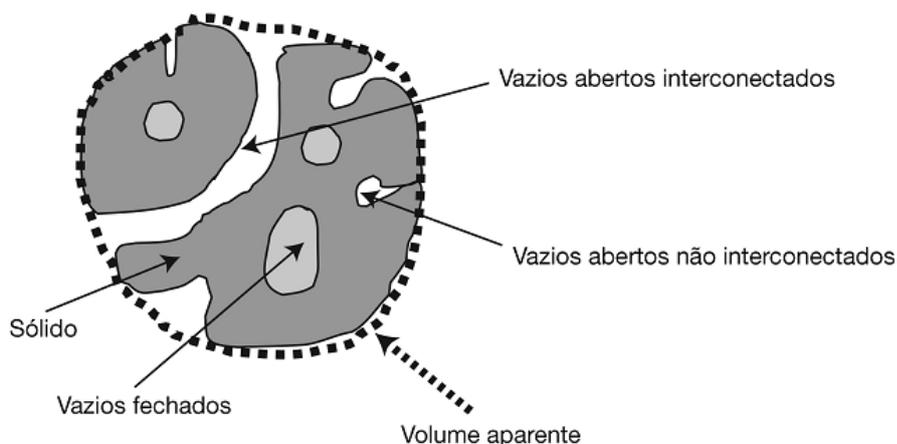
Além dos produtos hidratados do cimento, a matriz cimentícia também possui poros, que são responsáveis por diversas patologias do concreto. A porosidade do concreto deve-se, entre outros fatores, ao excesso de água adicionada à mistura para produzi-lo. De acordo com a teoria de *Power's* de 1948<sup>2</sup>, seria necessária uma relação ag/lig de 0,23 para hidratar todo o cimento, o que é impraticável. Ainda de acordo com essa teoria, seria necessária uma relação ag/lig de no mínimo 0,42 para gerar a hidratação completa do cimento, isso em ambiente selado, onde deste total, 0,23 reagiria com o cimento e formaria os produtos hidratados, gel sólido, e 0,19 ficaria fisicamente adsorvida na superfície deste gel.

Além disso, é necessário adicionar água extra ao sistema para garantir a trabalhabilidade do concreto. Toda água sobressalente adicionada ao sistema pode, durante o período de secagem do concreto, desencadear a formação de uma rede de poros no material. Isso acontece em maior escala em concretos não curados ou mal curados. Também podem existir no concreto vazios advindos de ar aprisionado ou incorporado ao sistema, além daqueles oriundos de agregados porosos. A soma de todos esses poros forma a porosidade global do concreto. De acordo com Ollivier e Torrenti (2014), a porosidade do concreto é composta basicamente por vazios abertos, vazios fechados e vazios abertos interconectados, conforme apresentado na Figura 2.1.

---

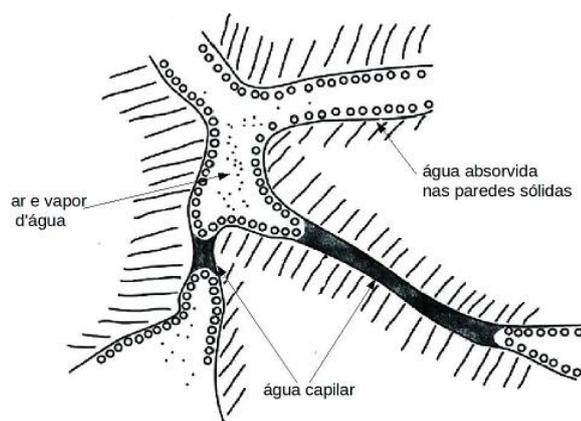
<sup>2</sup> Powers TC, Brownyard TL. **Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste**. Bulletin 22. Chicago: Research and Development Laboratories of the Portland Cement Association; 1948.

Figura 2.1 - Esquema da estrutura interna do concreto (OLLIVIER; TORRENTI, 2014).



Dentre os diferentes tipos de vazios mostrados na Figura 2.1, os vazios interconectados representam um grande perigo à durabilidade do concreto. Cascudo (1997), afirma que em relação à durabilidade do concreto, esses são os vazios mais relevantes uma vez que a água livre que preenche os capilares interconectados, como os apresentados na Figura 2.2, representam um caminho livre e fácil para a infiltração de agentes agressivos, como os cloretos, ao interior do concreto armado.

Figura 2.2 - Disposição da água em capilares do concreto (FUSCO, 2008).



A quantidade, tamanho e distribuição dos poros influenciam os diversos mecanismos de transporte de massa no concreto (CEB, 1993). A porosidade aberta, ou seja, os poros interconectados possibilitam o transporte de massa, de qualquer natureza. Já a distribuição dos poros determina a taxa de transporte, ou seja, a velocidade com que ele acontece (CEB, 1992). É importante ressaltar que o transporte de espécies iônicas acontece se, e somente se, existir

água ou umidade disponível nos poros, pois precisa existir um eletrólito para que essas espécies se difundam. No próximo item serão apresentados alguns destes mecanismos.

### 2.3. MECANISMOS DE TRANSPORTE DE CLORETOS

Conforme apresentado no item 2.2, o concreto é um material poroso e seus poros são de vários tipos e tamanhos. O transporte de agentes agressivos, na forma líquida, gasosa ou iônica, através dessa estrutura porosa, é extremamente deletério para o concreto, sendo um indicador da sua durabilidade e, portanto, importante para a previsão de vida útil. O fluxo destes agentes não depende somente da porosidade, mas também do tamanho e da continuidade dos poros (DOMONE; ILLSTON, 2010; OLLIVIER; TORRENTI, 2014). A interação dos agentes deletérios, que se movimentam no interior do concreto, com seus componentes, tal como a solução dos poros e os produtos hidratados, pode desencadear várias reações, que a longo prazo, conduzem à deterioração do concreto.

Existem vários agentes agressivos que levam à deterioração do concreto, dentre eles destacam-se, os sulfatos e os ácidos presentes, por exemplo, nas tubulações de esgoto e armazéns de fertilizantes; o CO<sub>2</sub> presente em atmosferas de grandes cidades; e os cloretos, encontrados principalmente em ambientes marinhos. Cada uma dessas espécies é transportada de maneira diferente pelo interior do concreto, e esse transporte ocorre, entre outros fatores, devido à presença de umidade, variações de temperatura, pressão diferencial no material e diferenças de concentração das soluções no interior do concreto. São esses fatores que determinam os principais mecanismos de transporte de uma espécie no concreto que, em suma, se distinguem por três principais processos, a saber, permeabilidade, absorção e difusão (BASHEER *et al.*, 2001). Na prática, todos esses mecanismos podem acontecer concomitantemente. Contudo, é comum adotar-se um mecanismo predominante nos estudos de durabilidade das estruturas.

Os principais mecanismos de transporte de cloretos no interior do concreto são a absorção e a difusão (CASCUDO, 1997). Em condições de saturação parcial, a absorção ocorre nas camadas mais superficiais e, em seguida, a difusão prepondera-se na condução dos cloretos. Já em condições de saturação total, a difusão é o único mecanismo que atua no transporte desta espécie iônica (ANDRADE, 1993). Esses mecanismos de transporte de massa serão apresentados mais detalhadamente a seguir.

### 2.3.1. Absorção capilar

Conhece-se por absorção capilar o movimento dos fluidos em capilares abertos ao meio ambiente, que acontece imediatamente após o contato com a superfície do material. É um fenômeno extremamente dependente das características do meio poroso e também das características do fluido que se desloca neste meio.

Para que exista a absorção capilar deve existir, necessariamente, uma rede de poros. Quando há uma interconexão entre os poros capilares, acontece o transporte de substâncias através do concreto devido a esse fenômeno. É importante ressaltar que a presença de água nos poros é condição fundamental para que ocorra o transporte. O fenômeno da ascensão capilar é representado pela lei de *Jurin*, apresentada na Equação 2.1.

$$h_c = \frac{2T_s}{\gamma r} \quad 2.1$$

Em que:

$h_c$  é a altura da ascensão no capilar (m);  
 $T_s$  é a tensão superficial do líquido (N/m);  
 $\gamma$  é massa específica do líquido (N/m<sup>3</sup>);  
 $r$  é o raio do capilar (m).

A relação da lei de *Jurin* mostra que a ascensão capilar é inversamente proporcional ao raio do poro, ou seja, ela toma valores tão maiores quanto menores forem os raios dos poros. Isso acontece porque em capilares de menor raio a água fica mais próxima às paredes dos poros e, conseqüentemente, fica mais suscetível às forças de adsorção. A água adsorve-se aos poros por meio da interação entre suas moléculas polares e as cargas opostas presentes nas paredes destes poros. Isso faz com que poros menores fiquem totalmente preenchidos com água e poros maiores não.

A absorção capilar de substâncias deletérias como, por exemplo, as ricas em cloretos, tal como é a névoa salina, representa o primeiro passo para a contaminação das estruturas de concreto armado. Tal fenômeno acontece imediatamente após o contato do fluido com a superfície do concreto (CASCUDO, 1997).

### 2.3.2. Difusão

A difusão iônica de cloretos caracteriza-se pelo movimento destes íons no interior do concreto. Isso acontece necessariamente, em condições saturadas, ou seja, quando há umidade, pois, os íons de forma geral necessitam de um meio líquido para se difundirem. Não havendo umidade no concreto, não há riscos de ataque por íons, pois estes ficarão na sua forma de cristais (sólida) e não se difundirão.

Segundo Ollivier e Torrenti (2014), o processo de difusão acontece em um meio onde há diferença de concentração, no sentido da maior para a menor. Havendo essa diferença de concentração, acontece um processo global dentro da massa de concreto que se finda com o equilíbrio da concentração do meio.

A difusão dos cloretos no concreto é medida pelo coeficiente de difusão. Ele pode ser efetivo (regime estacionário) ou aparente (regime não estacionário). Ambos são de difícil determinação e são calculados por meio da aplicação da primeira e da segunda lei de *Fick* para o regime estacionário e não estacionário, respectivamente (ANDRADE, 1993).

A primeira lei de *Fick*, Equação 2.2, aplicada ao transporte de cloretos, estabelece que o fluxo através da unidade de área de uma dada seção é diretamente proporcional ao gradiente de concentração e ao seu coeficiente de difusão. Esta lei aplica-se apenas a regimes estacionários, ou seja, quando o perfil de concentração não se altera com o decorrer do tempo.

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad 2.2$$

Em que:

$J$  é o fluxo através da seção (kg/m<sup>2</sup>.s);

$D$  é o coeficiente de difusão efetivo (m<sup>2</sup>/s);

$\partial C / \partial x$  é o gradiente de concentração (kg/m<sup>4</sup>);

Cabe ressaltar que, nesta equação, o sinal negativo indica que o fluxo ocorre no sentido oposto àquele do aumento da concentração.

A segunda lei de *Fick* aplicada ao transporte de cloretos estabelece parâmetros mais reais, pois é aplicada a regimes não estacionários, ou seja, a concentração varia com o tempo em um volume infinitesimal de concreto. Essa lei descreve, de forma mais fidedigna que a primeira lei,

o comportamento real do movimento destas espécies no interior do concreto. A Equação 2.3 apresenta a segunda lei de *Fick*.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad 2.3$$

Em que:

$C$  é a concentração de íons a uma profundidade  $x$  no tempo  $t$  (kg/m<sup>3</sup>);

$t$  é o tempo (s);

$D$  é o coeficiente de difusão aparente (m<sup>2</sup>/s);

$x$  é a profundidade (m);

De forma geral, o coeficiente de difusão depende de vários parâmetros tais como, o tempo, temperatura e composição do concreto, concentração da solução, entre outros. Interações entre os íons cloro e os componentes da matriz cimentícia, como por exemplo os aluminatos, ocorrem simultaneamente ao processo de difusão e devem ser considerados, uma vez que retardam o processo. Tais interações resultam nos chamados sais de *Friedel*. Essas reações não alteram o valor do coeficiente de difusão efetivo, contudo atrasam a obtenção do estado estacionário (HAN, 2007; SONG *et al.*, 2008; YUAN *et al.*, 2009).

### 2.3.3. Migração iônica

Migração iônica também é um processo que se caracteriza pelo transporte de íons pelo concreto. Contudo, diferentemente da difusão, neste processo o movimento dos íons ocorre sob a ação de um campo elétrico que pode ser gerado pela corrente elétrica do próprio processo eletroquímico ou pode ser aplicado de uma fonte externa (CASCUDO, 1997).

Quando o campo elétrico se instala no concreto, o movimento dos íons é forçado e para que se mantenha o equilíbrio (eletroneutralidade), os íons positivos se deslocam para o ânodo e os negativos para o cátodo. Nesse processo todos os íons, e não somente os cloretos, contribuem com a corrente passante (ANDRADE, 1993).

As leis de *Fick* não são aplicáveis ao processo de migração uma vez que não consideram o campo elétrico aplicado ao sistema. Ao fenômeno da migração no concreto é aplicável a equação simplificada de *Nernst-Planck*, que é apresentada a seguir.

$$J(x) = \frac{z \cdot F(x)}{R \cdot T} D \cdot c \frac{\partial E(x)}{\partial x} \quad 2.4$$

Em que:

$J(x)$  é o fluxo unidirecional (mol/cm<sup>2</sup>.s);

$D$  é o coeficiente de difusão (cm<sup>2</sup>/s);

$\partial x$  é a variação da distância (cm);

$z$  é a carga elétrica;

$T$  é a temperatura absoluta (K);

$c$  é a concentração (mol/cm<sup>3</sup>);

$R$  é a constante dos gases (cal/V);

$F$  é a constante de *Faraday* (96. 493 C);

$\partial E$  é a variação do potencial elétrico (V);

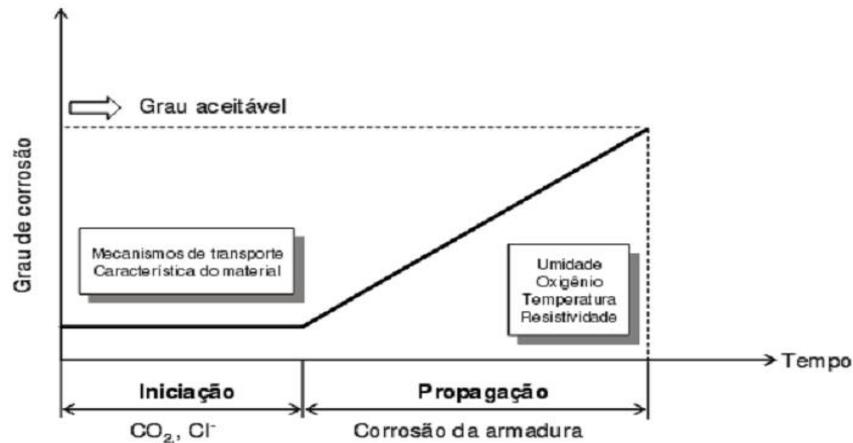
Os métodos que utilizam os processos de migração são largamente utilizados para determinar o coeficiente de difusão, por se tratar de um processo que utiliza o campo elétrico como catalisador do fluxo de cloretos, possibilitando a obtenção de resultados em poucos dias, ou até mesmo em poucas horas, dependendo da voltagem aplicada ao sistema.

## 2.4. CORROSÃO DAS ARMADURAS

As armaduras utilizadas no concreto constituem-se de uma liga de ferro e pequenas porções de carbono, que é conhecida como aço. No processo de fabricação deste material, utiliza-se uma grande quantidade de energia para fundir seus componentes, conferindo a eles um nível de energia muito instável. Como na natureza os materiais tendem a evoluir para um nível energético mais baixo, o aço tende a voltar à sua forma original, que é constituída basicamente por óxidos. Esse processo, inverso ao metalúrgico, é chamado de corrosão (GENTIL, 1996). Sendo assim, o processo corrosivo é natural e espontâneo.

A corrosão das armaduras tem sido alvo de vários estudos que tentam modelar a vida útil das estruturas, relacionados com essa manifestação patológica. Um dos primeiros modelos que surgiu com essa proposta foi o modelo de Tuutti (1982). Tal modelo é bastante simplificado e prediz um grau de aceitação até o qual as armaduras podem corroer, sem comprometer o desempenho da estrutura, conforme apresentado na Figura 2.3.

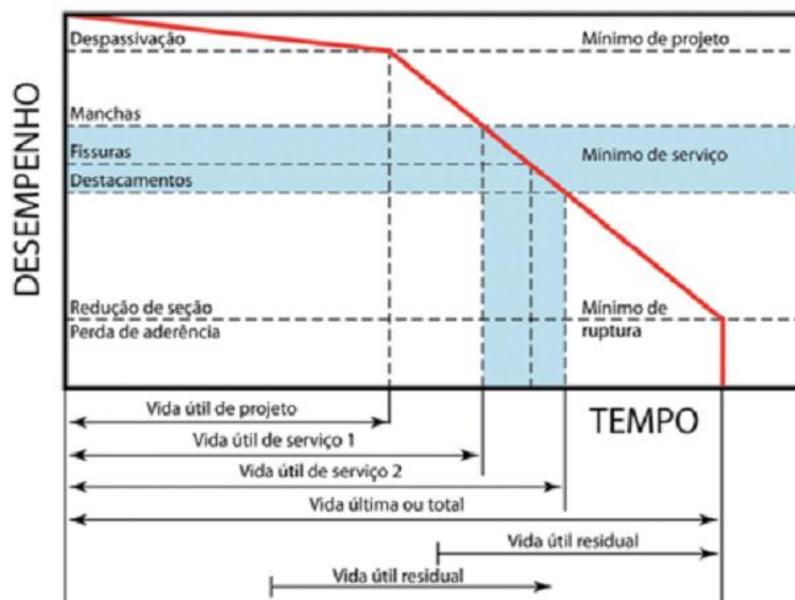
Figura 2.3 - Modelo de vida útil proposto por Tuutti (1982)



Podemos observar que a corrosão dá-se em dois principais estágios, a saber: iniciação e propagação. O período de iniciação ocorre pela ação de vários agentes deletérios, presentes em ambientes agressivos, tal como o  $\text{CO}_2$ , que levam à corrosão pela carbonatação do concreto, e os cloretos, que causam a corrosão pela ação direta na camada química protetora das armaduras. Este último mecanismo será detalhado mais adiante, em um item específico.

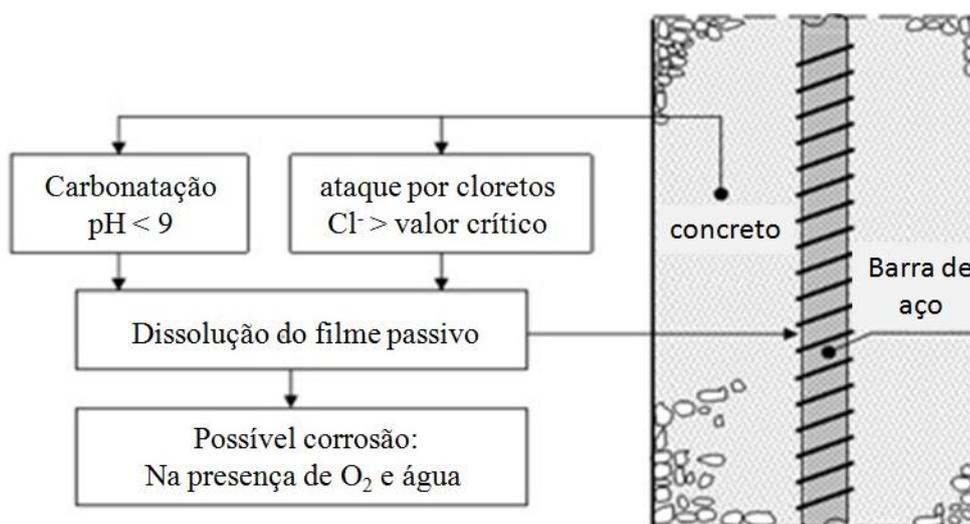
Helene (1993) propôs um modelo baseado na iniciação e propagação da corrosão das armaduras, o qual expressa a vida útil das estruturas de concreto armado em função das patologias causadas pela corrosão, conforme apresentado na Figura 2.4.

Figura 2.4 - Vida útil das estruturas de concreto armado com base na corrosão das armaduras (HELENE, 1993)



Observa-se na Figura 2.4 que a vida útil de projeto das estruturas termina com a despassivação das armaduras, ou seja, com a descaracterização da camada química protetora e são acompanhadas de outras manifestações patológicas que são consequências da corrosão, tais como fissuras, manchas e destacamento do concreto das armaduras. A despassivação compreende o período de iniciação da corrosão mostrado anteriormente na Figura 2.3. Os principais mecanismos que iniciam a corrosão das armaduras estão apresentados na Figura 2.5.

Figura 2.5 - Mecanismos de iniciação da corrosão das armaduras (APOSTOLOPOULOS; PAPADAKIS, 2008) - modificado pelo autor.



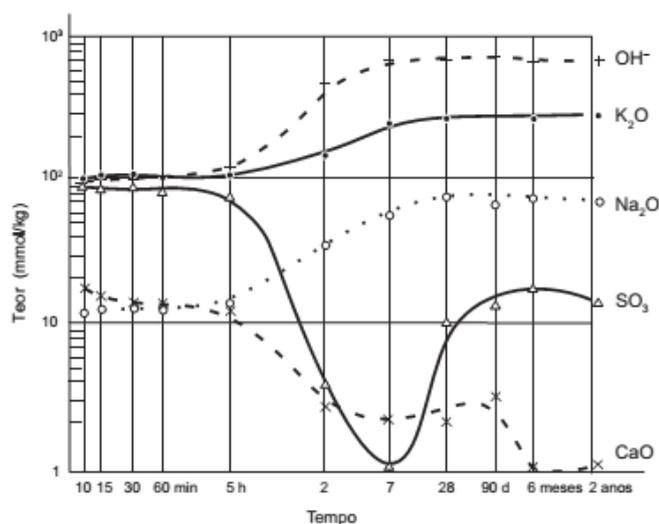
A corrosão das armaduras pode ser de natureza química ou eletroquímica. A primeira é caracterizada apenas pelas reações químicas que deterioram o concreto, trata-se de um processo corrosivo lento, que não traz sérios prejuízos à armadura. Já a segunda é um processo mais complexo e rápido que envolve, além de reações químicas, a condução de corrente elétrica no material, que caracteriza uma pilha. Este é o processo que representa maior risco às obras civis em geral (CASCUDO, 1997).

Para que esses processos eletroquímicos se iniciem, é necessária a dissolução do filme óxido sobre as armaduras, como mostrado na Figura 2.5. Portanto, conhecer a natureza do filme óxido, bem como os mecanismos de transporte, é fundamental para frear o processo corrosivo. A seguir são feitas considerações a respeito da camada de proteção das armaduras no interior do concreto.

### 2.4.1. Camada passivadora das armaduras

As armaduras de aço introduzidas no concreto são protegidas pela alta alcalinidade do sistema, garantida pela solução intersticial dos poros. Esta solução é formada pela hidratação dos compostos do cimento, tais como os silicatos, silicatos tricálcico (C<sub>3</sub>S) e dicálcico (C<sub>2</sub>S), e aluminatos tricálcico (C<sub>3</sub>A) e ferro-aluminato tetracálcico (C<sub>4</sub>AF). A hidratação destes compostos forma o C-S-H (silicato de cálcio hidratado) e o CH (portlandita), dentre outros produtos. A portlandita reage com alguns sulfatos alcalinos e produz hidróxidos, os quais liberam íons hidroxilas (OH) ao meio e são os principais responsáveis pelo alto pH da solução dos poros. A alcalinidade mantém-se graças à formação de bases alcalinas na solução intersticial dos poros (LONGUET *et al.*, 1973<sup>3</sup> *apud* BAROGHEL-BOUNY *et al.*, 2014). A Figura 2.6 apresenta a composição da solução intersticial dos poros ao longo do tempo.

Figura 2.6 - Evolução da composição da solução intersticial de uma pasta de cimento ao longo do tempo (LONGUET *et al.*, 1973 *apud* BAROGHEL-BOUNY *et al.*, 2014)

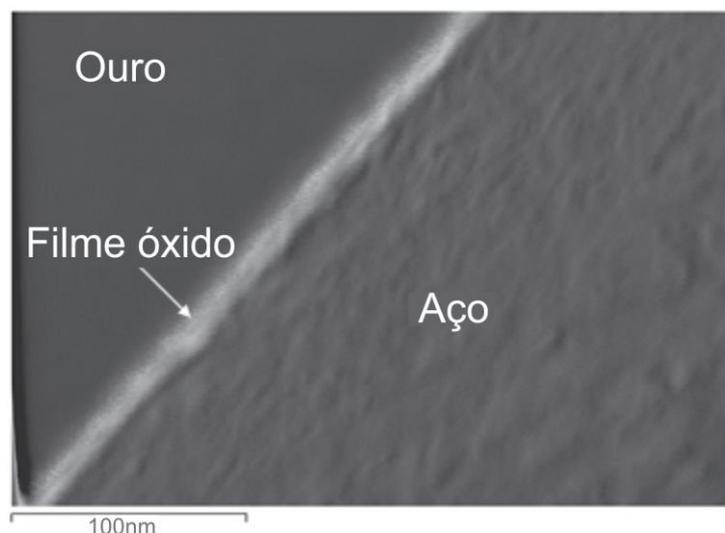


A elevada alcalinidade do concreto (pH > 13) em conjunto com o oxigênio disponível, proporciona uma corrosão “benéfica” das armaduras, possibilitando a formação de um filme óxido que corresponde à uma densa, delgada e transparente camada passiva sobre a armadura (SAREMI; MAHALLATI, 2002; GJORV, 2009; ANGST, 2011; GHODS *et al.*, 2012). Esse filme óxido, com espessura entre 5 a 10 nanômetros (GHODS *et al.*, 2012), funciona como uma barreira cinética, e confere às armaduras resistência à corrosão (NATISHAN; GRADY, 2014).

<sup>3</sup> Longuet P., Burglen L., Zelwer A. - La phase liquide du ciment hydraté, **Rev. Matér. Constr.**, 1973, 676, pp. 35-41.

Gjorv (2009) ressalta que, quanto menos espessa é a camada, menor será a qualidade da proteção ao aço. A Figura 2.7 apresenta a camada de óxidos sobre a superfície do aço.

Figura 2.7 - Camada protetora (filme óxido) do aço (GHODS *et al.*, 2012) - modificado pelo autor.



O filme protetor das armaduras é formado por vários óxidos como, por exemplo, FeO e Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Gunay *et al.* (2013) verificou por meio da técnica de Espectroscopia de Perda de Energia de Elétrons (EELS), que a camada mais interna do filme óxido é composta principalmente pelo FeO e, as camadas externas e intermediária são compostas, principalmente, por Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Ghods *et al.* (2011) também observaram essa mesma composição utilizando Espectroscopia de Fotoelétrons de raios X (XPS). Ainda segundo os mesmos autores, a camada mais interna é instável na presença de cloretos.

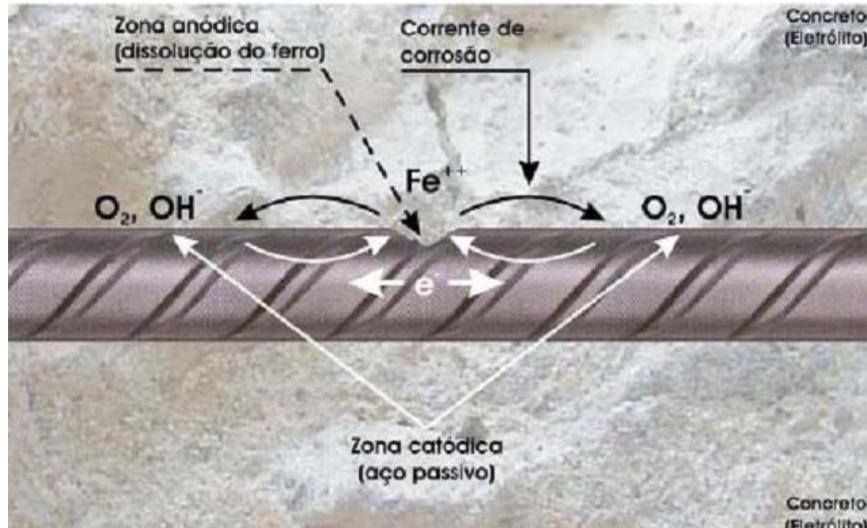
O processo corrosivo, como já foi mencionado, inicia-se com a descaracterização do filme óxido. Ao passo que acontece esse fenômeno, se inicia uma série de reações eletroquímicas que podem desencadear uma série de manifestações patológicas tais como, a perda de massa das barras de aço pela oxidação, expansão e consequente fissuração do concreto, podendo levar ao colapso da estrutura.

#### 2.4.2. Processo eletroquímico da corrosão

A corrosão é, na maioria das vezes, um processo eletroquímico que se caracteriza pelo movimento de partículas com cargas elétricas na presença de um eletrólito condutor e de uma diferença de potencial (GENTIL, 1996; CASCUDO, 1997). O movimento dos elétrons resulta

em uma pilha eletroquímica, onde se tem uma região anódica e outra catódica, como é mostrado na Figura 2.8.

Figura 2.8 - Pilha eletroquímica no concreto armado (CASCUDO, 1997).



No ânodo ocorre a fuga dos elétrons do metal, que corresponde à reação de oxidação, onde há perda de massa. Já no cátodo há a captura dos elétrons oriundos da reação de oxidação, caracterizando uma reação de redução, onde há acréscimo de massa. As reações parciais que ocorrem no ânodo e no cátodo estão representadas nas Equações 2.5 e 2.6, respectivamente.



Os íons  $Fe^{2+}$  e  $OH^-$ , resultantes das zonas anódicas e catódicas, respectivamente, reagem e precipitam na forma de hidróxido ferroso e, na presença de oxigênio, este pode precipitar na forma de outros produtos oriundos da corrosão (CASCUDO, 1997).

Conforme dito anteriormente, o processo eletroquímico ocorre necessariamente na presença de um eletrólito, pois este possibilita a passagem da corrente iônica. Quando há pouco eletrólito a corrosão é atrasada. Isso ocorre, por exemplo, em regiões com umidade baixa. Já em regiões com umidade elevada a corrosão é acelerada pela presença de eletrólito em abundância. Assim, controlar a umidade significa controlar a corrosão.

Outro fator que viabiliza a corrosão é a presença de oxigênio próximo à superfície da armadura, pois ele é necessário para que ocorram as reações catódicas. Pouco oxigênio significa retardo no processo corrosivo e muito oxigênio o acelera. A ação de agentes agressivos tal como é o cloreto também acelera o processo corrosivo, uma vez que a camada passivadora é instável em sua presença.

### 2.4.3. Os cloretos no concreto

A corrosão das armaduras pela ação de cloretos é a maior causa da degradação das estruturas de concreto armado (ARYA; XU, 1995; PAPADAKIS, 2000; ANGST *et al.*, 2009). Os íons cloro podem ser oriundos tanto de fontes externas, como introduzidos diretamente na composição do concreto. A Tabela 2.3 mostra algumas das fontes de cloretos que degradam as estruturas de concreto armado.

Tabela 2.3 - Fontes de cloretos (CASCUDO, 1997).

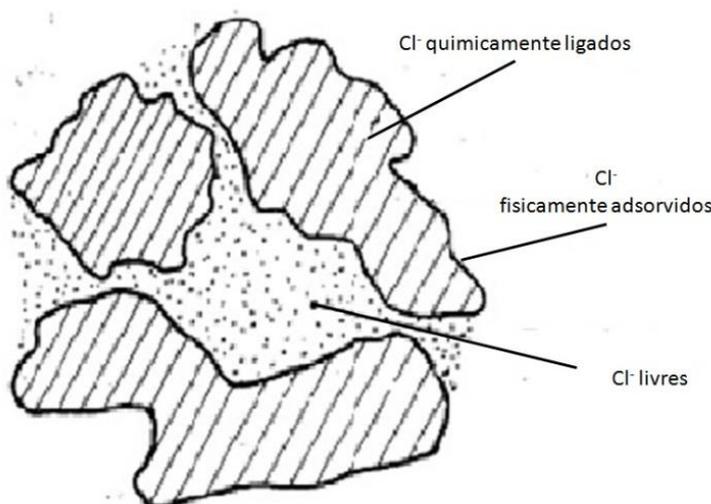
Fontes externas	Incorporados à massa de concreto
Maresia ou névoa de ambiente marinho	Aditivos aceleradores de pega e endurecimento
Água do mar (zonas de respingo e variação de maré)	
Sais de degelo	Água de amassamento contaminada
Processos industriais	
Solos contaminados	Agregado contaminado
Lavagens com ácido muriático	

Os cloretos são agentes agressivos tão perigosos para as estruturas de concreto armado que a norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014) proíbe o uso de aditivos que contenham cloretos em sua formulação na composição de concretos. Dessa maneira, as fontes externas, como os ambientes marinhos, são as que, de fato, contribuem com a ação dos cloretos em concretos.

Ambientes marinhos e regiões que usam sais de degelo são as que apresentam maiores concentrações de cloretos e, portanto, são as que representam maior perigo ao concreto armado. Estruturas expostas a esse tipo de ambiente, onde a presença de íons cloro é abundante, são severamente atacadas, o que pode conduzir a danos irreversíveis e comprometer o seu desempenho.

Uma vez que os cloretos estejam presentes na massa do concreto, eles se apresentam de três formas (Figura 2.9), são elas: cloretos quimicamente ligados, na forma de sais de *Friedel*; cloretos fisicamente adsorvidos nas superfícies dos poros e cloretos livres na solução dos poros. Existe um equilíbrio complexo entre essas três formas de ocorrência, ou seja, se a concentração de cloretos livres aumentar, a de cloretos quimicamente ligados, bem como a de cloretos adsorvidos também aumentará (TUUTTI, 1982; GJORV, 2009).

Figura 2.9 - Formas de ocorrência de cloretos no concreto (TUUTTI, 1982).



A forma de ocorrência mais perigosa ao concreto são os cloretos livres na solução dos poros, pois estes são os que se movimentam pelos poros interconectados e, quando atinge uma concentração crítica próxima à superfície das armaduras, inicia-se o processo de corrosão. O processo corrosivo das armaduras iniciado pelos cloretos é explicado a seguir.

#### 2.4.3.1. Corrosão induzida por cloretos

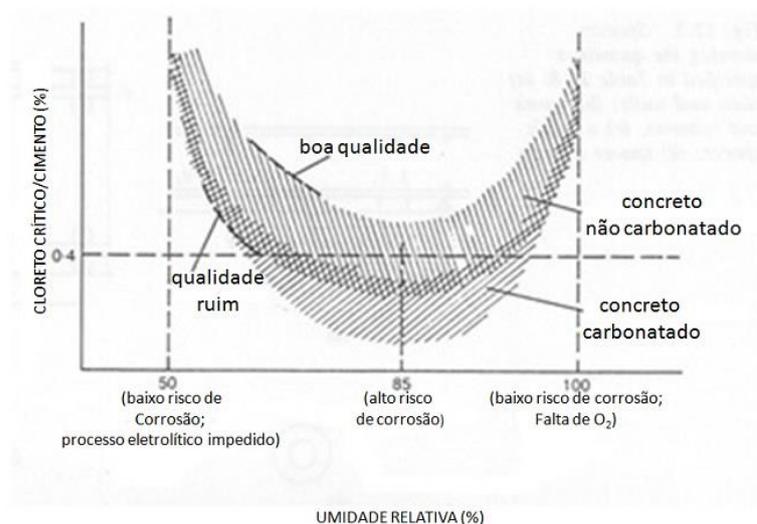
O processo corrosivo começa quando o teor de cloretos ao redor das armaduras atinge certo limite, chamado de teor crítico (TUUTTI, 1982). O valor deste limite ainda não é consenso no meio científico, apesar de existirem muitos estudos que tentam determinar esse parâmetro. Angst e Vennesland (2009) realizaram um trabalho de revisão da literatura, com aproximadamente 40 referências, reportando a gama de valores de teor crítico de cloretos assumidos em todo o mundo. Os autores encontraram valores que variaram de 0,02% até 3,08% em relação à massa do ligante. Os teores críticos de cloretos adotados no Brasil para o início do processo corrosivo são apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Teores máximos de íons cloreto para proteção das armaduras do concreto (ABNT NBR 12655, 2015).

Tipo de estrutura	Teor máximo de íons cloreto (Cl) no concreto % sobre a massa de cimento
Concreto protendido	0,05
Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,15
Concreto armado em condições de exposição não severas (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura)	0,40
Outros tipos de construção com concreto armado	0,30

O valor limite do teor de cloretos no concreto depende de uma série de fatores tais como, tipo de cimento, relação ag/lig, presença de adições minerais, entre outros (CASCUDO, 1997). Por isso, não existe um valor exato para todos os concretos. Assim, existirão concretos que terão problemas com baixos teores e outros que apresentarão problemas apenas sob teores mais elevados. A Figura 2.10 expressa de maneira mais realista a respeito do teor crítico de cloretos como sendo função da qualidade do concreto e do ambiente.

Figura 2.10 - Variação de teor crítico de cloretos em função da qualidade do concreto (CEB 183, 1992).



Outra maneira de expressar o valor crítico de cloretos no concreto é a relação entre a concentração destes íons e a concentração dos íons hidroxilas. Hausmann (1967) estabelece que

a relação crítica,  $[Cl^-]/[OH^-]$  para o início do processo corrosivo é 0,6, acima deste valor a passivação já não consegue mais proteger o aço da ação dos íons cloro. Os íons  $OH^-$  funcionam como inibidores da corrosão e sua concentração é tão mais elevada quanto maior for o pH da solução dos poros (GOUDA, 1970).

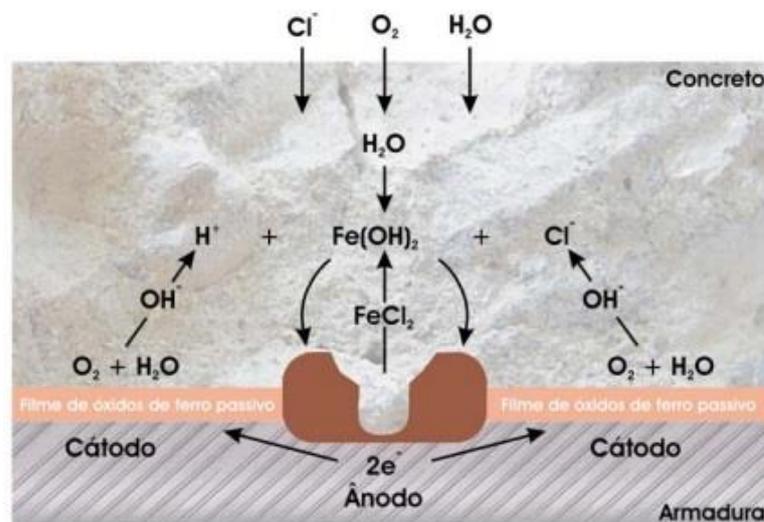
Uma vez que se atinge o valor limite da concentração de cloretos próximo às armaduras do concreto, estes íons agem iniciando o processo da corrosão e também participam da sua propagação. Segundo o relatório do comitê 222 do ACI, existem três teorias para explicar o comportamento dos cloretos na corrosão das armaduras, a saber: a teoria do filme de óxido, teoria de adsorção e a teoria do complexo transitório. Sendo a primeira diretamente ligada à iniciação da corrosão, pois age no sentido de desintegrar a camada de passivação e as outras duas ligadas à propagação do processo corrosivo, como explica-se a seguir mais detalhadamente.

**Teoria do Filme de Óxido:** os íons penetram no filme passivante sobre o aço, através de poros ou defeitos, mais facilmente do que penetram outros íons, por exemplo, o sulfato ( $SO_4^{2-}$ ). Alternadamente os cloretos podem dispersar-se coloidalmente no filme de óxido, facilitando a sua dissolução (CASCUDO, 1997, p46).

**Teoria da Adsorção:** os íons  $Cl^-$  são adsorvidos na superfície metálica em competição com o oxigênio dissolvido ou com íons hidroxila. O cloreto promove a hidratação dos íons metálicos, facilitando a sua dissolução (CASCUDO, 1997, p46).

**Teoria do Complexo Transitório:** os íons  $Cl^-$  competem com os íons hidroxila ( $OH^-$ ) para a produção de íons ferrosos pela corrosão. Forma-se então um complexo solúvel de cloreto de ferro. Este pode difundir-se a partir das áreas anódicas destruindo a camada protetora de  $Fe(OH)_2$  e permitindo a continuação do processo corrosivo. A certa distância do eletrodo o complexo é rompido, precipita o hidróxido de ferro e o íon cloreto fica livre para transportar mais íons de ferro que continuam a migrar dentro do concreto, a partir do ponto de corrosão, e reagem também com o oxigênio para formar óxidos mais altos que induzem a um volume quatro vezes maior, causando tensões internas e fissuras no concreto. A formação de complexo de cloreto de ferro pode também conduzir a forças internas que levem à fissuração e à desagregação do concreto (CASCUDO, 1997, p46). O processo é mostrado na Figura 2.11.

Figura 2.11 - Esquema do complexo transitório causado por cloreto, causando corrosão por pites (TREADAWAY *et al.*, 1988<sup>4</sup> *apud* CASCUDO, 1997).



## 2.5. TÉCNICAS PARA AVALIAR A CORROSÃO DAS ARMADURAS

As diversas técnicas utilizadas para monitorar e avaliar a corrosão das armaduras são de grande importância, pois fornecem dados qualitativos e quantitativos da atividade corrosiva, possibilitando assim, analisar a durabilidade do concreto armado. Dentre essas técnicas podemos citar a resistividade elétrica e o potencial de corrosão.

Essas técnicas foram bastante usadas nos estudos de corrosão de diversos trabalhos, como por exemplo, ode Maslehuddin *et al.* (1990) e Okeniyi *et al.* (2014), que utilizaram o potencial de corrosão; Farias e Tezuka (1992), Lataste *et al.* (2003) e Karhunen *et al.* (2010) que utilizaram a resistividade elétrica. Os próximos itens abordarão e detalharão essas duas técnicas.

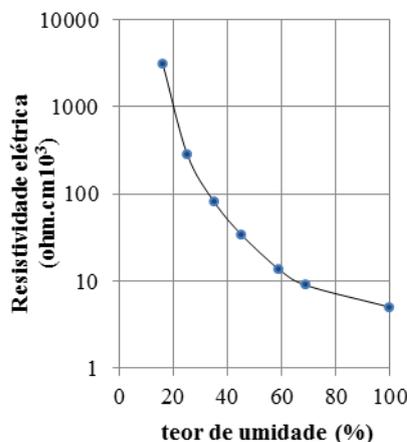
### 2.5.1. Resistividade elétrica

Depois de iniciada a corrosão das armaduras, ou seja, da despassivação destas, sua continuação depende basicamente da disponibilidade de oxigênio próximo à superfície das barras de aço e da condutividade elétrica do concreto, ou de forma oposta a esta, sua resistividade elétrica (HANSSON, 1984). Esta última, por sua vez, depende da permeabilidade e da umidade, que controlam a quantidade de solução nos poros do concreto e a concentração iônica nesta solução

<sup>4</sup> TREADAWAY, K. **Corrosion period**. In: SCHILESSL, P., ed. **Corrosion of steel in concrete**. London, Chapman and Hall, 1988. Cap. 4, p. 56-69.

(GJORV, 2009). A Figura 2.12 apresenta a influência do teor de umidade na resistividade do concreto.

Figura 2.12 - Efeito da umidade na resistividade elétrica do concreto (GJORV *et al.*, 1977<sup>5</sup> *apud* GJORV, 2009).

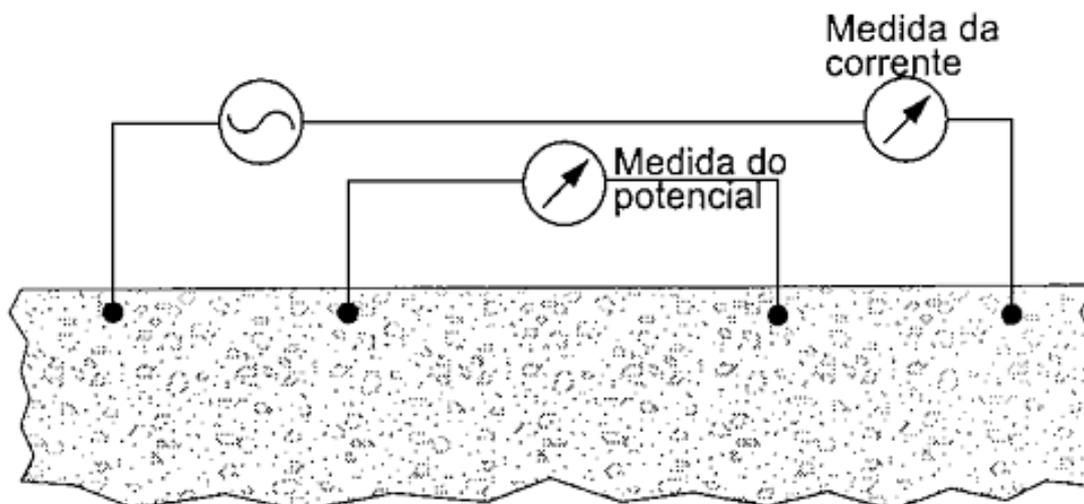


A resistividade elétrica é um importante indicador da qualidade do concreto e também um importante parâmetro para avaliar as taxas de corrosão nas armaduras, uma vez que a velocidade desse fenômeno está diretamente relacionada com os teores de umidade no concreto sendo que, quanto maior seu teor, menor será a sua resistividade(FARIAS; TEZUKA, 1992), como foi apresentado na Figura 2.12.

A medida da resistividade elétrica pode ser realizada por vários métodos, entre os quais o método de dois, o de três, e o de quatro eletrodos (o chamado método Wenner). Este último é muito utilizado em vários trabalhos, assim como será utilizado neste, e é normalizado pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM G 57). Na Figura 2.13 é apresentada esquematicamente a aplicação do método Wenner.

<sup>5</sup> GJORV, O. E.; VENNESLAND, O.; EL-BUSAIDY, A.H.S. (1977a) Electrical Resistivity of concrete in the Ocean, In: *Proceedings...., Ninth Annual Offshore Technology Conference*, OTC Paper 2803, Houston, pp. 581-588.

Figura 2.13 - Esquema do ensaio de resistividade elétrica, método dos quatro eletrodos (PULLAR, 1978).



Para a realização do ensaio de resistividade elétrica são necessárias algumas precauções tal como controlar condições de umidade e temperatura uma vez que elas afetam as medições. Além disso, a superfície do concreto que ficará em contato com o aparelho deve ser limpa, isso se deve à necessidade de se manter um bom contato entre a base e o dispositivo. Também há de se ter o cuidado com a base de apoio do corpo de prova para evitar a fuga de corrente durante o ensaio (GJORV, 2009).

A relação entre a corrente elétrica aplicada pelos eletrodos do dispositivo Wenner e o potencial gerado nos eletrodos internos do concreto é expressa pela Equação 2.7. Por meio desta relação são apresentados os resultados da resistividade elétrica.

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I} \quad 2.7$$

Em que:

$\rho$  é a resistividade elétrica do concreto ( $\Omega \cdot \text{cm}$ );

$a$  é o espaçamento entre os eletrodos (cm);

$V$  é o potencial medido entre os eletrodos internos (Volts);

$I$  é a corrente aplicada aos eletrodos externos (Ampère).

De acordo com os resultados obtidos com essa técnica e por meio da aplicação da Equação 2.7 tem-se a avaliação do concreto. Existem vários critérios para avaliar a resistividade desse material, sendo um dos mais aceitos o do CEB-192 (1989), apresentado na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Critérios de avaliação da resistividade elétrica do CEB 192 (1989).

Resistividade Elétrica do Concreto (K $\Omega$ .cm)	Indicação da Probabilidade de Corrosão
> 20	Desprezível
10 a 20	Baixa
5 a 10	Alta
< 5	Muito alta

Depreende-se da Tabela 2.5 que, na medida em que a resistividade elétrica do concreto aumenta, a probabilidade de corrosão torna-se desprezível; em outras palavras, quando a resistividade se torna suficientemente pequena ou desprezível, a corrosão é facilitada (GJORV, 2009). Este mesmo autor cita um trabalho realizado por Gewertz *et. al.* (1958<sup>6</sup>) na ponte San Mateo-Hayward, nos EUA, no qual foram relatados valores de resistividade entre 50 a 70 kohms e somente pequenas taxas de corrosão foram observadas.

Morris *et al.* (2002) deduziram em seu trabalho que para resistividades no concreto abaixo de 10 kohms as armaduras estão suscetíveis a apresentar um comportamento ativo quanto a corrosão. Por outro lado, para resistividades acima de 30 kohms, as armaduras tendem a apresentar um comportamento passivo.

Apesar de serem muitas as variações quanto ao limite para caracterização no estado passivo e ativo nas armaduras, é de comum acordo na comunidade científica que a resistividade elétrica é um parâmetro que pode ser usado para avaliar o risco de corrosão das armaduras do concreto, em particular quando esta é induzida por cloretos (MORRIS *et al.*, 2004), além de ser um bom indicador da qualidade do concreto (MORRIS *et al.*, 2002).

### 2.5.2. Potencial de corrosão

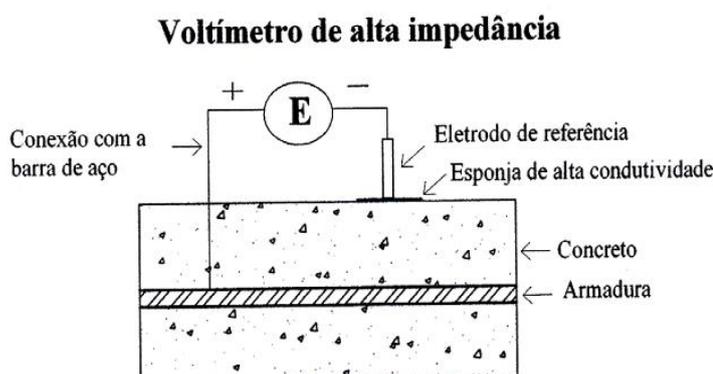
Essa técnica eletroquímica é uma das mais utilizadas para inspecionar a corrosão em estruturas de concreto armado, servindo como uma primeira abordagem a esse fenômeno (MONTEMOR; SIMÕES; FERREIRA, 2003).

<sup>6</sup> GEWERTZ, M. W.; TREMPER, B.; BEATON, J. L.; STRATFULL, R. F. (1958) Causes and repair of deterioration to a California bridge due to corrosion of reinforcing steel in a marine environment, **Highway Research Board Bulletin 182**, National Academy of Science-National Research Council Publication 546, Washington, DC.

Segundo Hansson (1984), o potencial elétrico é a facilidade com que a carga elétrica se transfere entre a armadura e a solução dos poros do concreto, desta forma, é uma propriedade conjunta entre o aço e o concreto, e não exclusivamente do aço. O potencial de corrosão de um eletrodo metálico é o potencial medido por meio de um eletrodo de referência (CASCUDO, 1997).

A rigor, o que se mede nessa técnica é a diferença de potencial entre as semicélulas aço/eletrólito e a semicélula estável que é um eletrodo padrão de referência, como é ilustrado na Figura 2.14. Portanto, o que se mede é um potencial relativo e não absoluto àquele metal usado no aço. Geralmente, usa-se como eletrodo de referência os de calomelano saturado, com potencial de redução padrão em relação ao hidrogênio igual a +0,242 a 25°C e o de cobre/sulfato de cobre, abordado na ASTM C876, com potencial igual a +0,316 a 25°C (CASCUDO, 1997).

Figura 2.14 - Esquema para a medida dos potenciais de corrosão (MCKENZIE 1987<sup>7</sup> apud CASCUDO, 1997).



Deduz-se da Figura 2.14 que para a realização do ensaio de potencial de corrosão é necessário um voltímetro, um eletrodo de referência, a fiação para fazer a conexão elétrica entre a barra de aço do concreto e o voltímetro e também entre o eletrodo de referência ao mesmo voltímetro e uma esponja de baixa resistência elétrica. Essa esponja tem o objetivo de estabelecer uma ponte líquida entre o eletrodo de referência e a superfície do concreto. Para tanto, ela deve estar umedecida com solução condutora.

O eletrodo de referência é móvel, assim, pode ser colocado em qualquer parte da superfície do concreto no decorrer do ensaio e os valores dos potenciais para estas respectivas posições em relação à armadura do concreto devem ser anotados (CASCUDO, 1997). Assim, os resultados

<sup>7</sup> MCKENZIE, S.G. Techniques for monitoring corrosion of steel in concrete. **Corrosion Prevention & control**, n. 1, p. 7-11, Feb. 1987.

dos potenciais resultam em linhas equipotenciais as quais denunciam regiões favoráveis e desfavoráveis ao processo corrosivo.

Os resultados do potencial de corrosão são interpretados de acordo com critérios estabelecidos pela ASTM C876. Esses critérios são apresentados na Tabela 2.6 e são avaliados em relação ao eletrodo de referência cobre/sulfato de cobre.

Tabela 2.6 - Critério de avaliação do potencial de corrosão (ASTM C876, 2009).

Potencial de Corrosão (mV)	Probabilidade de Corrosão
< -350	> 90%
-200 a -350	Incerta
> -200	< 10%

Os critérios mostrados na Tabela 2.6 são questionáveis uma vez que são vários os fatores que influenciam nas medidas, tais como a umidade do concreto, o cobrimento da armadura, tipo de cimento, adições, penetração de cloretos no concreto, entre outros (MASLEHUDDIN *et al.*, 1990).

Os valores de potencial de corrosão fornecem informações qualitativas que orientam a respeito de regiões mais vulneráveis à corrosão. Desta forma, os dados obtidos de potencial eletroquímico não devem ser tomados para avaliar a cinética do processo corrosivo, pois, para um mesmo potencial pode haver taxas de corrosão diferentes. Apesar disso, o viés qualitativo desta técnica a torna bastante utilizável, uma vez que apresenta possíveis regiões da estrutura com problemas de corrosão das armaduras.

## 2.6. A INFLUÊNCIA DAS ADIÇÕES MINERAIS NA DURABILIDADE DO CONCRETO

As adições minerais são bastante utilizadas na composição de concretos e argamassas, em substituição parcial ou em adição ao cimento, pois melhoram consideravelmente várias de suas propriedades tais como, resistência à compressão e resistência à penetração de cloretos. As melhorias causadas por estes materiais vêm da capacidade que eles têm em refinar poros, proporcionando uma pasta de cimento mais densa e compacta, além de densificar a zona de transição.

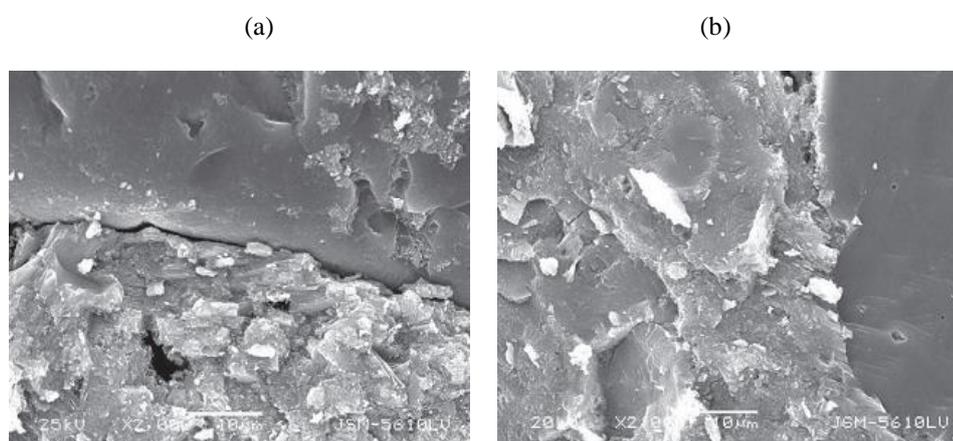
Esses materiais podem ser divididos basicamente em dois grupos, a saber, os pozolânicos e não pozolânicos ou hidráulicos. Esses últimos são adições que reagem com a água e tem propriedades aglomerantes parecidas com as do cimento, é o caso, por exemplo, da escória de alto forno. O comportamento deste material é regido por sua hidraulicidade.

As adições pozolânicas são materiais silicosos ou silico aluminosos que não possuem propriedades aglomerantes, por exemplo, sílica ativa e metacaulim. Esses materiais reagem, principalmente, com o CH da pasta de cimento para formar compostos menos solúveis e mais resistentes e compactos como o C-S-H. Essas são as reações pozolânicas que necessitam de tempo e cura apropriada para que aconteçam completamente. Além dessa ação química, esses materiais também podem proporcionar uma ação física (efeito fíler), pelo preenchimento da matriz cimentícia (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

As melhorias que essas adições minerais logram às propriedades dos concretos estão intimamente ligadas à redução da porosidade, densificação da matriz cimentícia e melhoria da zona de transição. Diversos pesquisadores têm estudado os efeitos da incorporação das adições minerais no concreto tais como Hassan *et al.* (2000), Duan *et al.* (2013), Camacho *et al.* (2014), Mardani-Aghabaglou *et al.* (2014) entre vários outros.

Duan *et al.* (2013) estudaram o efeito da adição de 10% de metacaulim, sílica ativa e escória na microestrutura do concreto. Foram realizados ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e porosimetria por intrusão de mercúrio. Os autores observaram melhorias significativas na microestrutura do concreto, na distribuição e tamanho dos poros, bem como na zona de transição em relação ao traço de referência, conforme apresentado na Figura 2.15.

Figura 2.15 - Efeito da adição mineral na morfologia da zona de transição aos 28 dias: (a) sem adição; (b) 10% de sílica ativa em relação à massa de cimento (DUAN *et al.*, 2013).



Uma melhora na morfologia dos compostos da matriz cimentícia também foi observada por Mardani-Aghabaglou *et al.* (2014), os quais também realizaram um estudo em concretos com teor de substituição de 10% de sílica ativa em relação à massa de cimento. Nos concretos com a adição observou-se a formação da etringita de forma esférica, de caráter não expansivo, apenas no interior dos poros. Em contrapartida, em concretos sem adição foi observada etringita em forma de agulhas, de caráter expansivo, tanto no interior quanto no exterior dos poros.

A melhoria na microestrutura do concreto, como já mencionado, está intimamente ligada às melhorias na resistência ao transporte de agentes agressivos no concreto tal como é o cloreto (OLLIVIER; TORRENTI, 2014). Assim, as melhorias na microestrutura observadas pelos autores citados acima contribuem para o retardo do ingresso de cloretos ao concreto. Além de estudar a influência das adições minerais na estrutura porosa, vários autores estudaram a influência que elas causam diretamente na resistência à penetração de cloretos no concreto.

Nos subitens a seguir são apresentados os conceitos e algumas propriedades da sílica ativa, nanossílica e metacaulim, bem como a influência dessas adições minerais em algumas propriedades do concreto ligadas à durabilidade e à corrosão das armaduras.

### **2.6.1. Sílica ativa**

A sílica ativa é um subproduto industrial obtido a partir da redução do quartzo com o carvão natural e adições de ferro em fornos a arco e de indução na produção de silício metálico e outros produtos de silício. A redução de quartzo a silício em temperaturas de até 2000°C produz vapor de óxido de silício (SiO) que oxida e condensa em zonas de baixa temperatura, na forma de partículas esféricas minúsculas constituídas de sílica não cristalina (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016).

As partículas de sílica ativa são extremamente finas e a maior parte delas tem diâmetro entre 0,03 e 0,3 µm com diâmetro médio geralmente menor do que 0,1 µm. Como o seu manuseio é difícil e caro (justamente por ser extremamente fina), ela é disponibilizada densificada, na forma de micropéletes, que são aglomerados de partículas individuais produzidos por aeração com massa unitária entre 500 e 700 kg/m<sup>3</sup> (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016).

A sílica ativa é um material de elevada pureza, com alta amorficidade, sendo constituída de teores de SiO acima de 90%. O material possui coloração variando de cinza claro ao cinza escuro, dependendo do teor de carbono presente.

Esse material é usado como adição mineral na dosagem de concretos, em substituição parcial ou em adição à massa de cimento e proporciona diversas melhorias nas suas propriedades, as quais se dão devido ao efeito fíler, ocasionado pela alta superfície específica, bem como pelo efeito químico que é causado pelo alto grau de pureza (amorficidade) deste material. Na literatura são encontrados vários teores de substituição da sílica em relação a massa de cimento, comumente variando entre 5 e 15%.

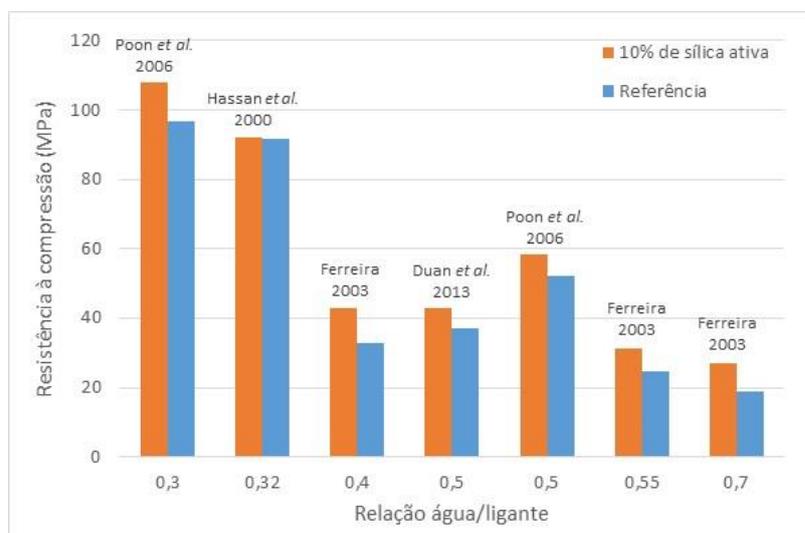
A seguir serão abordados os efeitos da sílica ativa em algumas propriedades do concreto, a saber, as mecânicas e as ligadas à durabilidade e também seus efeitos na corrosão das armaduras.

#### 2.6.1.1. Efeitos da adição de sílica ativa na resistência à compressão

A resistência à compressão é a propriedade mais representativa e importante do concreto estrutural, sendo o parâmetro mínimo de controle deste material. Sabe-se que esse parâmetro é influenciado principalmente pela relação ag/lig do concreto, por meio da lei de Abrams. A NBR 6118 (ABNT, 2014) estabelece os valores mínimos exigidos de resistência característica à compressão para o concreto, dependendo da classe de agressividade ambiental a que ele esteja submetido.

Na Figura 2.16 apresenta-se uma compilação de diversos trabalhos nos quais os autores estudaram concretos contendo 10% de sílica ativa em substituição parcial ao cimento. Depreende-se do gráfico apresentado que a relação ag/lig exerce um papel fundamental na resistência à compressão, no sentido de que quanto menor essa relação, maior é o valor da resistência à compressão.

Figura 2.16 - Dados de resistência à compressão, aos 28 dias de idade, de concretos estudados por vários autores, os quais usaram 10% de sílica ativa em substituição parcial ao cimento.



Pode ser visto na Figura 2.16 que os resultados de Ferreira (2003) com relação ag/lig 0,4 são menores que os resultados obtidos por Poon *et al.* (2006) e Duan *et al.* (2013), ambos com relação ag/lig igual a 0,5, o que contradiz o que foi dito no parágrafo anterior. Esses resultados, que fugiram à regra, podem estar relacionados com qualidade do cimento utilizado e à cura feita nos corpos de prova, por cada autor em suas respectivas pesquisas. Contudo, se forem observados apenas os resultados de Ferreira (2003), é nítido o comportamento inversamente proporcional entre a relação ag/lig e a resistência à compressão.

Observa-se no mesmo gráfico que, além da influência da relação ag/lig, tem-se também a influência da presença da sílica ativa na resistência à compressão, visto que em todos os casos apresentados, os concretos que contém a adição mineral apresentaram resultados melhores em comparação ao concreto de referência.

O teor de substituição abordado até o presente momento foi de 10%, contudo, há pesquisas reportadas na literatura nas quais se utilizou teores variáveis de substituição de sílica ativa em relação à massa de cimento, como é caso do trabalho de Hassan *et al.* (2012) no qual os autores utilizaram teores de substituição que variaram entre 3% e 11% e obtiveram o melhor desempenho, em relação à resistência à compressão, nos concretos com 8% de sílica ativa.

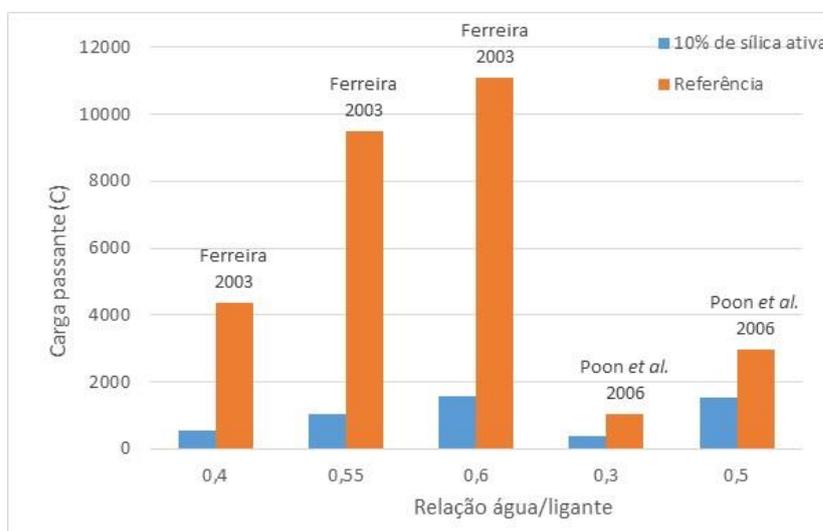
### 2.6.1.2. Efeitos da adição de sílica ativa nas propriedades ligadas ao transporte de cloretos

No que tange à sílica ativa, o seu uso na formulação dos concretos é extremamente benéfico, uma vez que contribui para a densificação e a compactação da microestrutura do concreto, dificultando, dessa forma, a entrada e o transporte de agentes deletérios, principalmente os cloretos, impedindo ou minimizando sua difusão. Em relação à melhoria da microestrutura, esse tem sido tema base de vários trabalhos que buscam contribuir para o entendimento do real efeito das adições na estrutura interna dos concretos. Nessa área podemos citar os trabalhos de Wee *et al.* (1995), Hassan *et al.* (2000), Duan *et al.* (2004), Mardani-Aghabaglou *et al.* (2014) e Camacho *et al.* (2014), entre outros. A seguir são apresentados os efeitos da incorporação de sílica ativa na penetrabilidade e na difusão/migração de cloretos, respectivamente.

## a) Penetrabilidade de cloretos

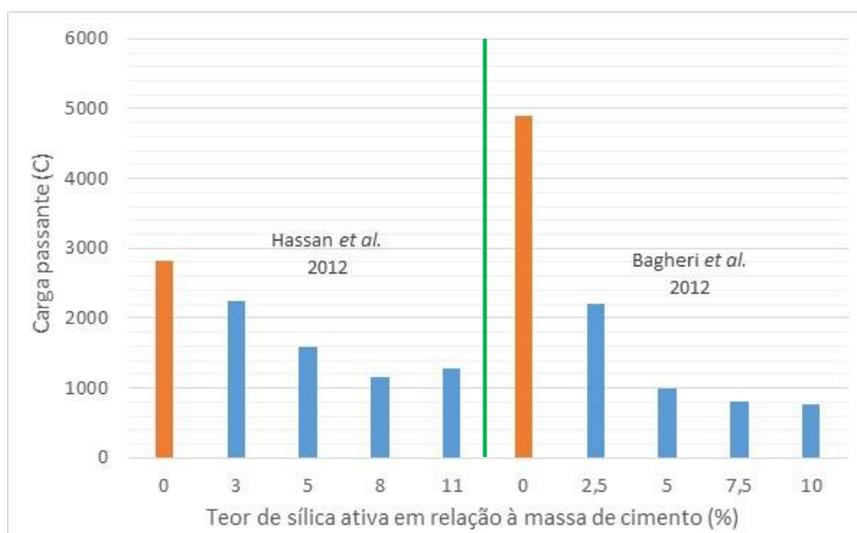
O uso da sílica ativa como material suplementar em concretos no combate à penetrabilidade de cloretos tem sido objeto de estudo de vários autores. É consenso na literatura que a substituição do cimento por este material aumenta a capacidade do concreto de impedir a entrada de cloretos em seu interior. O gráfico da Figura 2.17 apresenta resultados do trabalho de Ferreira (2003) e de Poon *et al.* (2006). Observa-se que, em ambos os casos, os concretos com adição de sílica ativa, num teor de 10%, obtiveram maior resistência à penetrabilidade de cloretos que os respectivos concretos de referência, independentemente da relação ag/lig.

Figura 2.17 - Dados de avaliação da penetrabilidade de cloretos, aos 28 dias de idade, dado pela ASTM C1202, em concretos com 10% de sílica ativa para diferentes relações água/ligante.



Outros pesquisadores também encontraram resultados que vão ao encontro dos resultados obtidos por Ferreira (2003) e Poon *et al.* (2006), ou seja, a sílica ativa contribui positivamente na resistência à penetração de cloretos. Dentre estes podemos citar os trabalhos de Mendes (2009), Chung *et al.* (2010), Hassan *et al.* (2012) e Bagheri *et al.* (2013). A Figura 2.18 apresenta os dados obtidos nos trabalhos de Hassan *et al.* (2012) e Bagheri *et al.* (2013), esses pesquisadores utilizaram relações ag/lig muito próximas (0,4 para o primeiro e 0,38 para o segundo) e diferentes teores de sílica ativa. Hassan *et al.* (2012) encontraram que os concretos com teores de 8% de sílica ativa foram os que apresentaram melhor desempenho, já Bagheri *et al.* (2013) obtiveram melhores desempenho nos concretos com 10% de sílica ativa.

Figura 2.18 - Dados de avaliação da penetração de cloretos, aos 91 dias de idade, em concretos com diferentes teores de sílica ativa.

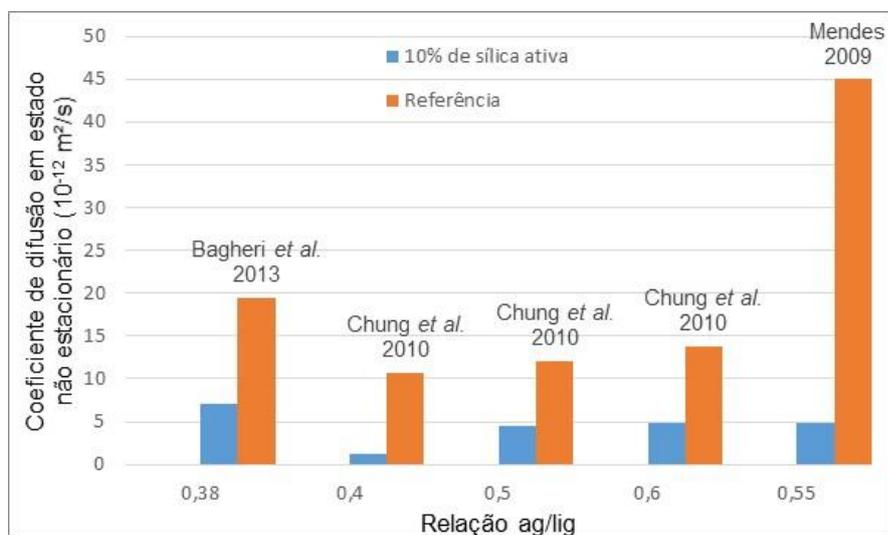


Observa-se na Figura 2.18 que teores próximos a 10% são os que mais contribuem com o desempenho do concreto em relação à penetração de cloretos. Contudo, mesmo em proporções muito pequenas, concretos com sílica ativa conseguem desenvolver um desempenho superior aos concretos sem adição deste material.

#### b) Difusão/migração de cloretos

A difusão de cloretos é um mecanismo que desenvolve grandes problemas no concreto armado, pois, uma vez que os íons cloro atingem a armadura, eles iniciam um processo para desintegrar a camada passivadora e, posteriormente, tem início a corrosão, conforme explicado no item 2.4.3.1. Por ser um agente muito prejudicial às armaduras do concreto, seu principal mecanismo de transporte é alvo de várias pesquisas no campo da durabilidade, podendo ser citados os trabalhos de Hoffmann (2001), Mendes (2009), Chung *et al.* (2010), Bagheri *et al.* (2013), entre outros. A Figura 2.19 apresenta dados sobre o coeficiente de difusão em estado não estacionário, dos trabalhos de Mendes (2009), Chung *et al.* (2010) e Bagheri *et al.* (2013). O coeficiente de difusão não estacionário é obtido por meio de ensaios acelerados, nos quais se aplica uma diferença de potencial para forçar a passagem dos íons cloro na massa do concreto.

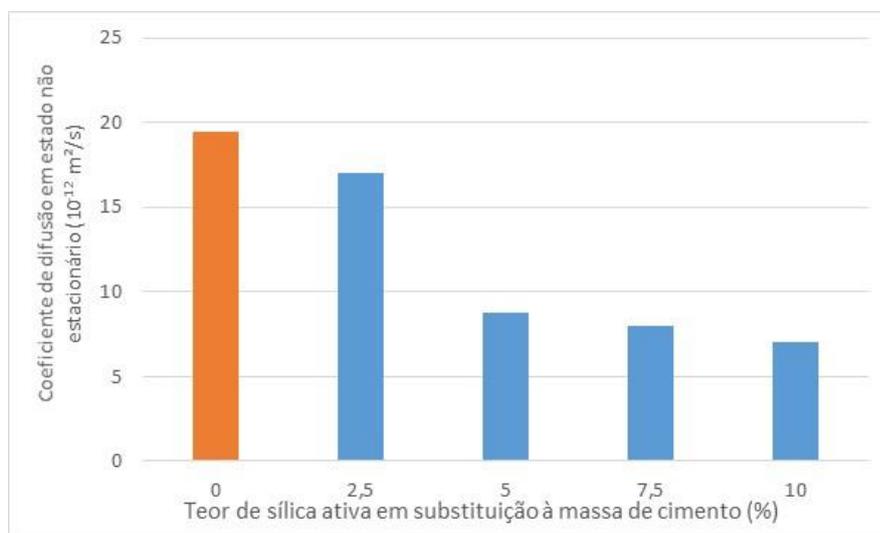
Figura 2.19 - Dados de coeficiente de difusão em estado não estacionário, aos 28 dias de idade, em concretos com 10% de sílica ativa.



Depreende-se da Figura 2.19 que os concretos com sílica ativa possuem maior resistência à penetração de cloretos em relação aos concretos que não possuem adição. Em alguns casos, como o da pesquisa de Mendes (2009), a redução do coeficiente de difusão chega a quase 90%, comparando os concretos com sílica e os de referência.

Alguns estudos levam em conta a variação do teor de sílica ativa na composição dos concretos, comprovando que há diminuição da penetração de cloretos na medida em que se aumenta o teor de substituição do cimento por sílica ativa. O gráfico da Figura 2.20 apresenta dados do trabalho de Bagheri *et al.* (2013) que apontam para um comportamento inversamente proporcional entre o coeficiente de difusão de cloretos e o teor de sílica ativa nos concretos, ou seja, o coeficiente diminui à medida que o teor de sílica ativa aumenta, até um limite de 10% de substituição. Observa-se que houve uma redução de quase 50% no coeficiente de difusão de cloretos quando se avalia os concretos sem adição e os concretos com adição de 2,5% de sílica, já quando se compara os concretos com 2,5% e os concretos com 10% de sílica, observa-se que houve uma redução de 45% nesse coeficiente.

Figura 2.20 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos em função do teor de sílica ativa (BAGHERI *et al.*, 2013).



No campo de estudo dos mecanismos de transporte de cloretos, há ainda trabalhos que buscam avaliar a difusão dos cloretos na massa do concreto de forma mais fidedigna, investigando a difusão de forma natural, ou seja, não forçando a penetração de cloretos no concreto por meio de diferença de potencial. Nesta linha podemos citar, por exemplo, os trabalhos de Shekarchi *et al.* (2009), Valipour *et al.* (2013a) Valipour *et al.* (2013b). Shekarchi *et al.* (2009) estudaram concretos com 5,0%, 7,5%, 10,0% e 12,0% de sílica ativa. Os autores deixaram os concretos curando por trinta e seis meses na região do golfo pérsico e, ao final deste período, realizaram os ensaios e constataram que concretos com sílica ativa apresentaram maiores resistências à penetração de cloretos, ou seja, apresentaram coeficiente de difusão menores, sendo que as melhorias mais significativas se deram para os concretos com 7,5% de sílica ativa.

Valipour *et al.* (2013b) realizaram trabalho na mesma linha de Shekarchi *et al.* (2009). Eles utilizaram um teor fixo de 5% de sílica ativa, deixaram os concretos curando por nove meses na região do golfo pérsico e, ao final, realizaram seus ensaios. Assim como Shekarchi *et al.* (2009), os autores constataram que os concretos com adição de sílica ativa apresentaram coeficientes de difusão 70% menores em relação aos concretos de referência.

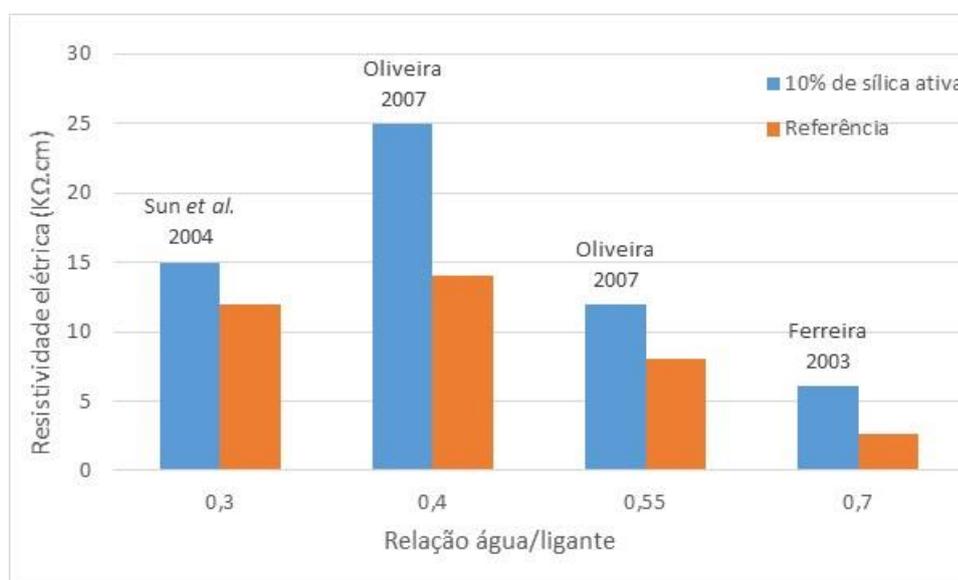
### 2.6.1.3. Efeitos da adição de sílica ativa na corrosão das armaduras

#### a) Resistividade elétrica

A resistividade elétrica é um parâmetro intrínseco ao concreto e indica a vulnerabilidade deste à entrada de agentes agressivos, o que pode, muitas vezes, acarretar a corrosão das armaduras. Esse parâmetro vem sendo estudado por diversos pesquisadores, como é o caso de Morris *et al.* (2002), os quais constataram que os cloretos diminuem bastante a resistividade elétrica do concreto e o deixa mais propenso à corrosão das armaduras.

Muitas pesquisas têm avaliado o comportamento dos concretos com sílica ativa em relação à resistividade elétrica. Podemos citar os trabalhos de Ferreira (2003), Sun *et al.* (2004), Oliveira (2007), entre outros. Os resultados encontrados na literatura apontam que a incorporação de sílica ativa ao concreto logra melhorias na resistividade elétrica, diminuindo a probabilidade de corrosão. A Figura 2.21 apresenta dados dos trabalhos citados que corroboram a eficácia da sílica ativa no incremento da resistividade elétrica. A relação ag/lig exerce um papel fundamental para essa propriedade, sendo que a resistividade aumenta à medida que a relação ag/lig diminui.

Figura 2.21 - Dados dos trabalhos de Ferreira (2003), Sun *et al.* (2004) e Oliveira (2007) avaliam a resistividade elétrica em concretos contendo 10% de substituição de sílica ativa.



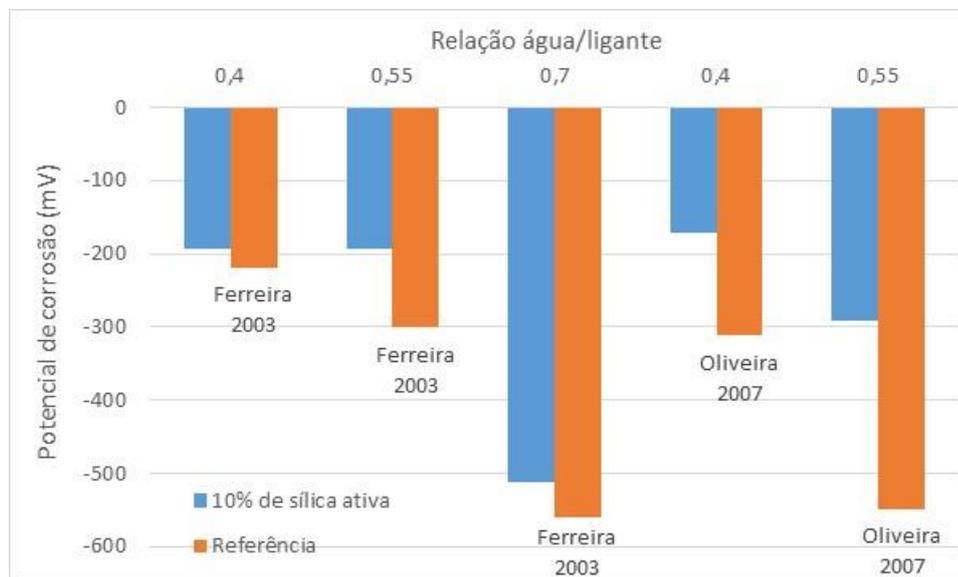
Outras pesquisas, como a de Sabet *et al.* (2013), corroboram os dados da Figura 2.21, no que tange a melhoria que a sílica ativa desenvolve em relação à resistividade elétrica. Estes autores

comprovaram que a adição de sílica ativa aumenta a resistividade elétrica do concreto. É importante destacar-se que o referido trabalho também demonstrou que as melhorias causadas pela adição de sílica ativa no concreto só são significativas até a idade de 91 dias.

#### b) Potencial de corrosão

Assim como a resistividade elétrica do concreto, o potencial de corrosão também é afetado pela presença de agentes agressivos, tal como os cloretos, na solução dos poros, pois aumentam consideravelmente a condutividade e tornam o potencial de corrosão mais eletronegativo. O gráfico da Figura 2.22 apresenta resultados de ensaios de potencial de corrosão realizados por Ferreira (2003) e Oliveira (2007). Os resultados mostram que os concretos com adição de sílica ativa têm menor probabilidade de corrosão do que aqueles sem adição, independentemente da relação água/ligante. Contudo, estes concretos ainda apresentaram uma incerteza quanto a probabilidade de corrosão, segundo os critérios da ASTM C876 apresentados anteriormente na Tabela 2.6.

Figura 2.22 - Dados, dos trabalhos de Ferreira (2003) e Oliveira (2007), que mostram a influência da sílica ativa no potencial de corrosão.



Dados de outras pesquisas concordam com os apresentados na Figura 2.22 e podem ser citados Dotto *et al.* (2004), Kayali e Zhu (2005) e Dehwah (2012). Todos esses autores avaliaram o comportamento de concretos com sílica ativa em relação ao potencial de corrosão e constataram que os concretos com adição de sílica ativa apresentaram potenciais de corrosão menos eletronegativos em relação aos concretos de referência, entretanto, depois de vários ciclos de

ataque com cloretos, mesmo os concretos com sílica ativa apresentaram desempenho ruim, com potenciais de corrosão na faixa de incerteza.

## 2.6.2. Metacaulim

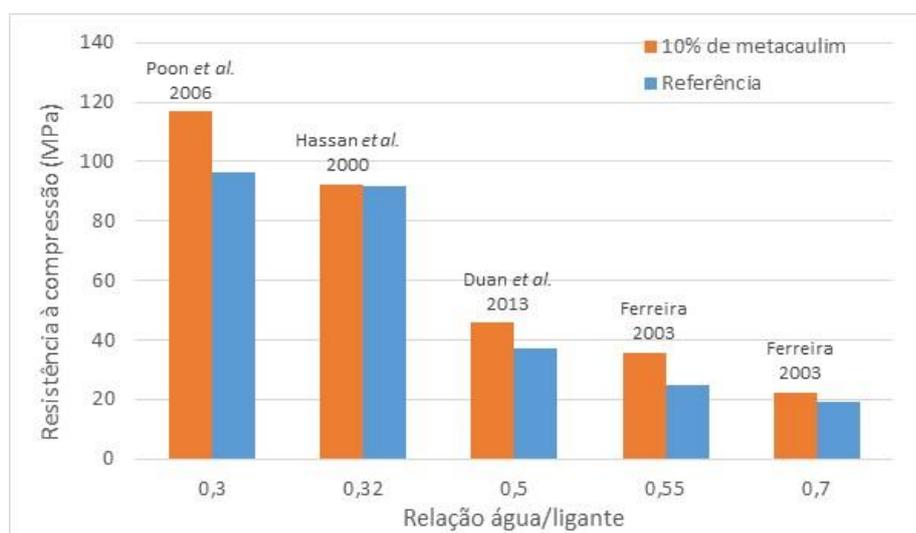
O metacaulim é uma pozolana de alta reatividade obtida a partir da calcinação de argilas essencialmente constituídas por caulinita. Basicamente, existem duas fontes de matéria-prima para a obtenção da caulinita, uma delas é a extração de depósitos de argilas caulínicas e/ou de caulins de alta pureza, a outra é por meio da utilização dos resíduos caulínicos da indústria de branqueamento de papel, que, por sua vez, utiliza o caulim como matéria-prima.

Em linhas gerais, qualquer argila caulínica calcinada pode ser designada como metacaulim. No entanto, existem metacaulins de diferentes reatividades, que dependem de sua composição química, mineralogia e características físicas (DAL MOLIN, 2011).

### 2.6.2.1. Efeitos da adição de metacaulim na resistência à compressão

Assim como a sílica ativa, o metacaulim também incrementa de forma considerável a resistência à compressão do concreto em relação aos concretos sem adições minerais. Esse aumento pode ser observado na Figura 2.23, a qual apresenta os resultados dos trabalhos de Ferreira (2003), Hassan *et al.* (2000), Poon *et al.* (2006) e Duan *et al.* (2012).

Figura 2.23 - Dados de resistência à compressão, aos 28 dias de idade, dos concretos estudados por vários autores, os quais usaram 10 % de substituição de metacaulim em relação à massa de cimento.



Observa-se na Figura 2.23 que os concretos com metacaulim, exceto os de Hassan *et al.* (2000), apresentaram resistência à compressão consideravelmente maiores que os respectivos concretos de referência. Observa-se também que a relação água/ligante é um fator que em muito contribui para esse aumento de resistência.

Alguns autores também estudaram a influência da variação do teor de metacaulim no concreto, como é o caso de Hassan *et al.* (2012). Eles estudaram teores de metacaulim variando de 3% a 25% e observaram que a resistência à compressão crescia com o aumento do teor de metacaulim, tendo seu maior valor para o concreto com 25% de substituição em relação à massa de cimento. Por outro lado, Poon *et al.* (2006) também estudaram teores variáveis de metacaulim, em faixas entre 5% e 20%, encontraram que o teor ótimo de substituição é de 10%.

É consenso geral entre as pesquisas que a resistência à compressão é aumentada com a adição de metacaulim, sobretudo em idades mais avançadas. No entanto, também é possível conseguir um aumento na resistência nas primeiras idades com o seu uso (SABIR; WILD; BAI, 2001).

Teodoro *et al.* (2016a) e Teodoro *et al.* (2016b) estudaram concretos contendo 10% de substituição em massa de Metacaulim HP XW (MX) e Metacaulim HP MAX (MM). O Metacaulim HP XW é uma adição mineral mais grossa, em termos da dimensão dos grãos e da finura, porém apresenta baixo teor de impurezas químicas. Já o Metacaulim HP MAX é uma adição extremamente fina, propondo-se ser altamente reativa. Os autores encontraram incrementos na resistência à compressão da ordem de 17,8% e 20,6%, respectivamente, em relação ao concreto de referência considerando-se globalmente todas as idades analisadas em ambas as relações ag/lig estudadas, a saber: 0,40 e 0,60.

Em um estudo realizado por Li e Ding (2003), o concreto de relação ag/lig 0,44 e 10% de substituição em massa do cimento por metacaulim, alcançou resistência, aos 28 dias, superior ao concreto de referência em cerca de 8 MPa (equivalente a 14,5%). No programa experimental desenvolvido pelos autores a adição de metacaulim elevou consideravelmente a resistência à compressão do concreto, do mesmo modo, outros pesquisadores já relataram comportamento semelhante, dentre eles Bai e Wild (2002) e Caldarone *et al.* (1994).

Souza (2003) analisou concretos contendo de 5% a 20% de metacaulim, aos 28 dias de idade, e obteve ganhos de cerca de 15% na resistência à compressão com relação ao

concreto de referência, sendo que os ganhos foram maiores com o aumento do teor da adição. Nos concretos analisados por Oliveira (2007) a resistência também aumentou em cerca de 15%, de acordo com o aumento do teor de metacaulim, no entanto essa observação só é válida para as idades de 28 e 91 dias. Para as idades de 3, 7 e 14 dias ocorreu o oposto, fazendo com que a resistência diminuísse com o aumento do teor de metacaulim.

Na pesquisa de Wild, Khatib e Jones (1996), os concretos com teores de 20, 25 e 30% de metacaulim obtiveram uma menor resistência à compressão com 1 dia de idade, por outro lado, com 90 dias de idade o concreto com 5% de metacaulim obteve uma resistência à compressão menor que a do concreto de referência. Nos estudos de Güneyisi *et al.* (2012), em concretos com 5% e 15% da adição mineral, os resultados nas primeiras idades foram superiores ao concreto de referência e ao concreto com sílica ativa com os mesmos teores de substituição.

Nos estudos desenvolvidos por Poon, Kou e Lam (2006) a resistência à compressão dos concretos com 5%, 10% e 20% de metacaulim foi superior ao concreto referência em todas as idades analisadas: 3, 7, 28 e 90 dias.

Hassan *et al.* (2012) estudaram a influência da adição de metacaulim em concretos autoadensáveis. Os autores concluíram que a resistência à compressão desses concretos aumenta na medida em que o teor de metacaulim é incrementado em teores entre 0% e 25% em substituição parcial do cimento. A título de comparação os autores também analisaram concretos autoadensáveis contendo sílica ativa cuja resistência máxima foi obtida para teores de substituição de 8%. Nesse estudo, as resistências dos concretos contendo 8% de sílica ativa e 8% de metacaulim foram similares, ambas aumentaram em torno de 14% em relação ao traço de referência (sem adições). Porém, ao elevar-se o teor de metacaulim de 8% para 25%, a resistência à compressão aumentou apenas 7%.

Paiva *et al.* (2012) obtiveram aumentos na resistência à compressão de concretos com adição de 10%, 20% e 30% de metacaulim na presença de aditivos superplastificantes. É importante ressaltar que os autores também analisaram traços sem aditivo dispersante e, nesses casos, a resistência dos concretos foi reduzida na medida em que se elevou o teor da adição. Essa redução é atribuída ao fato de as partículas de metacaulim serem muito pequenas e com elevada energia superficial o que faz com elas tendam a se aglomerar. Essas aglomerações de partículas apresentam baixa reatividade, justificando a redução da

resistência, além disso, há um aumento da quantidade de água na mistura quando da adição de metacaulim.

Ferreira (2003) obteve acréscimos médios de 28% na resistência à compressão de concretos contendo 10% de metacaulim, para as seguintes relações água aglomerante: 0,40; 0,55 e 0,70.

De maneira geral, o aumento do teor de metacaulim de alta reatividade, é seguido de um aumento na resistência à compressão do concreto. No entanto, deve-se ressaltar que como o metacaulim de alta reatividade é um material muito fino, maiores teores irão demandar um aumento significativo na quantidade de água e/ou aditivo para que o abatimento seja mantido.

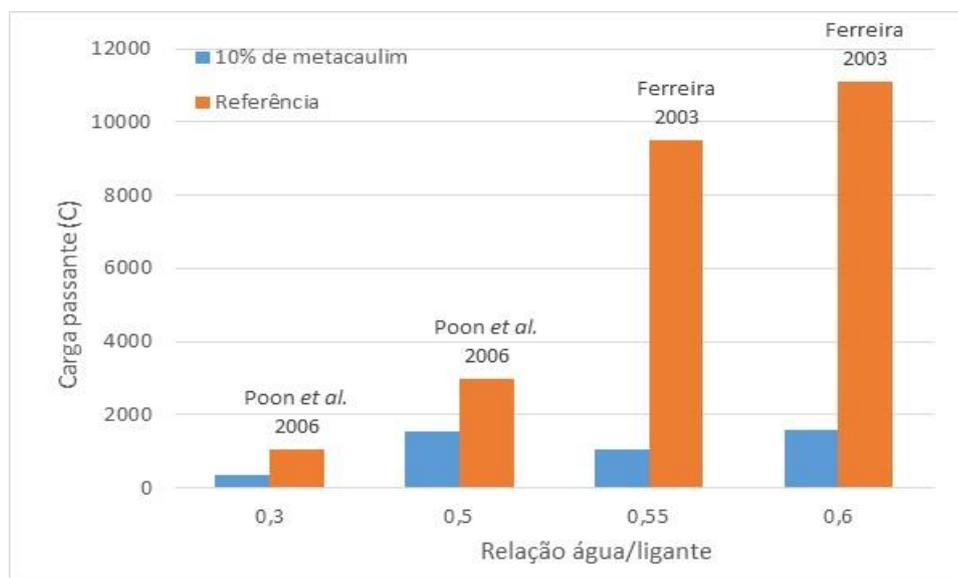
#### 2.6.2.2. Efeitos da adição de metacaulim nas propriedades ligadas ao transporte de cloretos

É encontrado na literatura que o metacaulim tem influência significativa nas propriedades de transporte do concreto, em especial, o transporte de cloretos. Esse material suplementar age tanto no sentido de densificar a estrutura interna do concreto, diminuindo a porosidade, que corresponde à ação física, quanto pela ação química, na qual os aluminatos presentes na sua composição reagem com os cloretos formando os sais de *Friedel*, não deixando os cloretos livres para agir de forma deletéria.

##### a) Penetrabilidade de cloretos

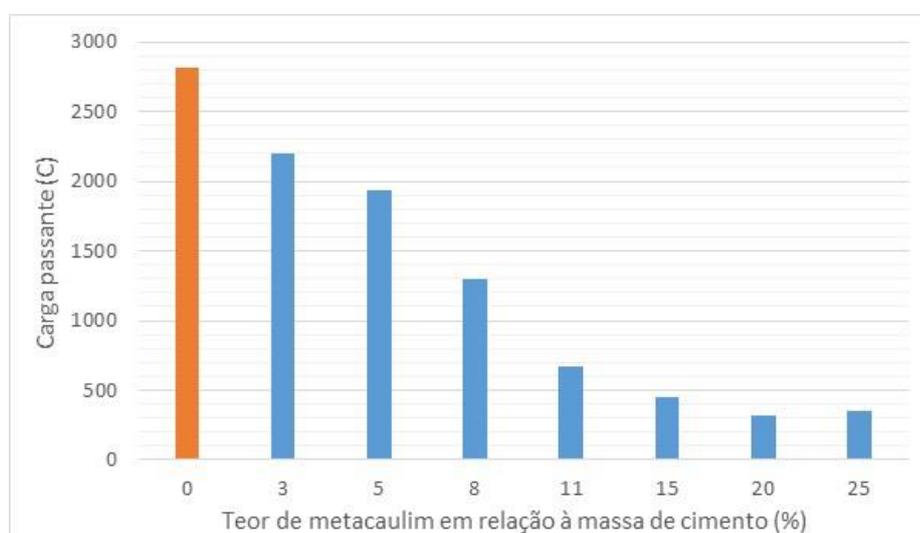
Assim como ocorre no comportamento dos concretos com sílica ativa, os concretos com adição de metacaulim também apresentam maiores resistências à penetrabilidade de cloretos em relação aos concretos de referência. Esse comportamento dá-se para todas as relações ag/lig, contudo, para relações ag/lig maiores, a resistência à penetrabilidade é mais acentuada. Tal comportamento pode ser observado na Figura 2.24, a qual apresenta dados dos trabalhos de Ferreira (2003) e Poon *et al.* (2006).

Figura 2.24 - Dados de avaliação da penetrabilidade de cloretos, aos 28 dias de idade, de acordo com a ASTM C1202, em concretos com substituição de 10% de metacaulim e diferentes relações água/ligante.



Hassan *et al.* (2012) estudaram a penetrabilidade de cloretos em concretos que continham teores de metacaulim variando de 3% a 25% e observaram um comportamento proporcional entre o teor de incorporação de metacaulim e a resistência à penetração de cloretos, ou seja, a resistência aumenta com o aumento do teor de cloretos até o limite de 20% de substituição deste material em relação à massa de cimento. Esse comportamento pode ser observado na Figura 2.25, na qual nota-se que a redução da carga passante no concreto sem metacaulim em relação ao concreto com 20% de metacaulim chega a quase 90%.

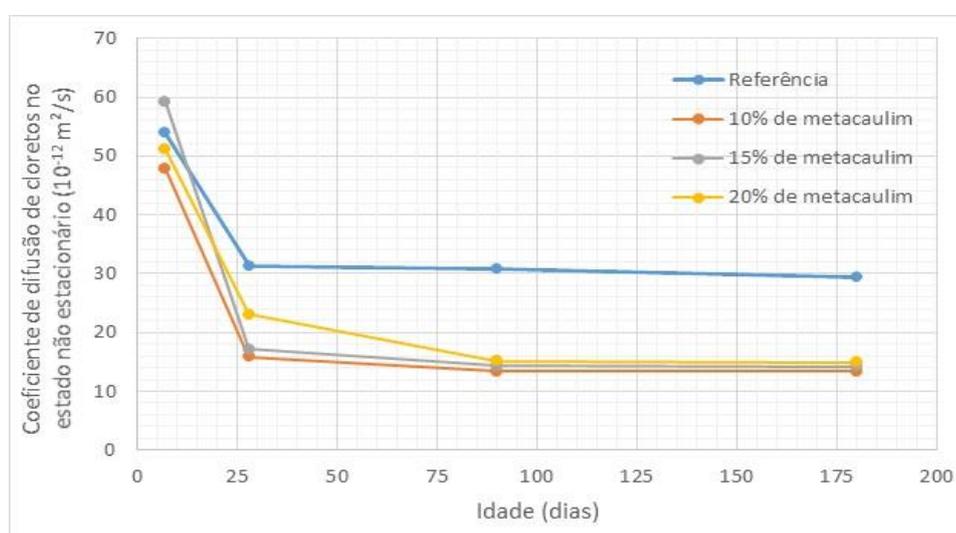
Figura 2.25 - Dados de avaliação da penetração de cloretos, aos 91 dias de idade, em concretos com diferentes teores de substituição em massa de metacaulim (HASSAN *et al.*, 2012).



## b) Difusão de cloretos

O coeficiente de difusão de cloretos é um parâmetro intrinsecamente relacionado à durabilidade do concreto e tem sido estudado por vários autores tal como Ferreira *et al.* (2015). Esses estudaram a influência que o metacaulim exerce na resistência à penetração de cloretos por meio de ensaios acelerados, de acordo com NT BUILD 492, e não acelerados em concretos com relação ag/lig 0,60. Alguns dados do trabalho de Ferreira *et al.* (2015), em relação a difusão de cloretos, estão apresentados na Figura 2.26.

Figura 2.26 - Coeficiente de difusão no estado não estacionário, de concretos com metacaulim, em função da idade (FERREIRA *et al.*, 2015).



Percebe-se que em idades precoces os concretos com metacaulim não apresentam resultados tão melhores que os de referência, contudo, em idades mais avançadas, seu desempenho é significativamente melhor. Isso deve-se ao fato de que as adições pozolânicas têm seu efeito químico integral após os noventa dias.

Utilizando o mesmo método adotado por Ferreira *et al.* (2015), Li *et al.* (2015) também realizaram uma pesquisa com concretos de ag/lig 0,45 e diferentes teores de substituição de metacaulim, variando de 0 a 6% em relação à massa de cimento. Eles constataram que o coeficiente de difusão, em regime não estacionário, decrescia na medida que se aumentava o teor de metacaulim. Foi observada uma redução de quase 200% em relação ao coeficiente de difusão de cloretos do concreto de referência para o concreto com 6% de metacaulim. Além disso, os autores também constataram que o teor crítico de cloretos, adotado como 0,6% em relação à massa de cimento, em concretos com metacaulim, se deu em camadas mais próximas a superfície quando comparado com os concretos de referência.

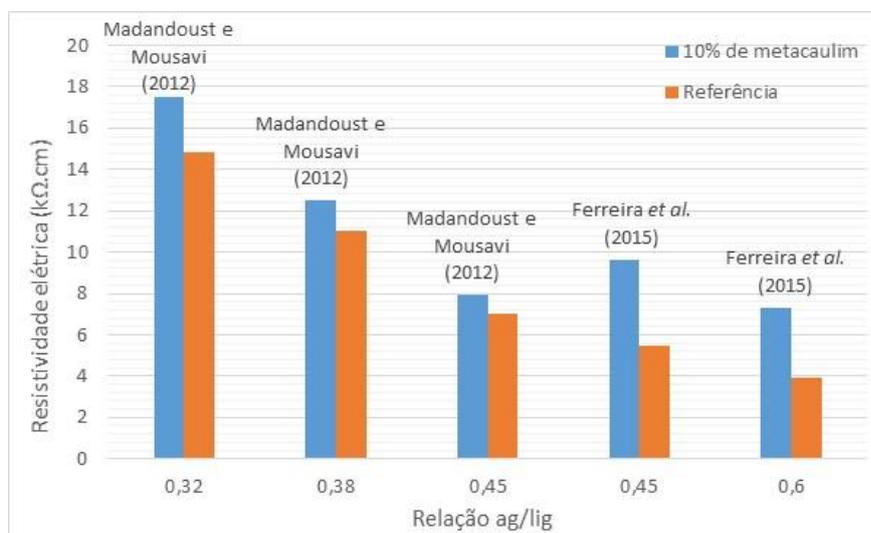
### 2.6.2.3. Efeitos da adição de metacaulim na corrosão das armaduras

#### a) Resistividade elétrica

O metacaulim é uma adição mineral bastante benéfica para os concretos em termos da resistividade elétrica. Nesse campo há várias pesquisas que mostram de fato que essa adição logra melhorias a esta propriedade como, por exemplo, o trabalho de Shekarchi *et al.* (2010). Estes autores avaliaram a resistividade elétrica em concretos de relação ag/lig 0,38, com diferentes teores de substituição em massa de metacaulim (5, 10 e 15%) tendo como referência um concreto com substituição de 10% de sílica ativa e um sem nenhuma adição. Foi observado que todas as adições obtiveram melhor desempenho que o concreto de referência em relação à resistividade elétrica aos 28 dias. Em particular, os concretos com sílica ativa obtiveram desempenho superior aos concretos com 5 e 10% de metacaulim, porém, concretos com 15% desta adição obtiveram o melhor desempenho global, sendo 5,5 vezes maior que a referência e 29% maior que os concretos contendo sílica ativa.

Outros pesquisadores também estudaram a influência do metacaulim na resistividade elétrica do concreto, podendo ser citados os trabalhos de Broddy *et al.* (2001), Madandoust e Mousavi (2012) e Ferreira *et al.* (2015) que estudaram concretos com diferentes teores de metacaulim. Nestes dois últimos trabalhos foi observado que os concretos com 10% de metacaulim, em substituição a massa de cimento, foram os que apresentaram o melhor desempenho no que tange a resistividade elétrica. A Figura 2.27 apresenta alguns dados dos trabalhos dos autores citados neste parágrafo.

Figura 2.27 - Resistência elétrica de concretos de relação ag/lig 0,45 com 10% de substituição em massa de metacaulim (MADANDOUST; MOUSAVI, 2012; FERREIRA *et al.*, 2015).



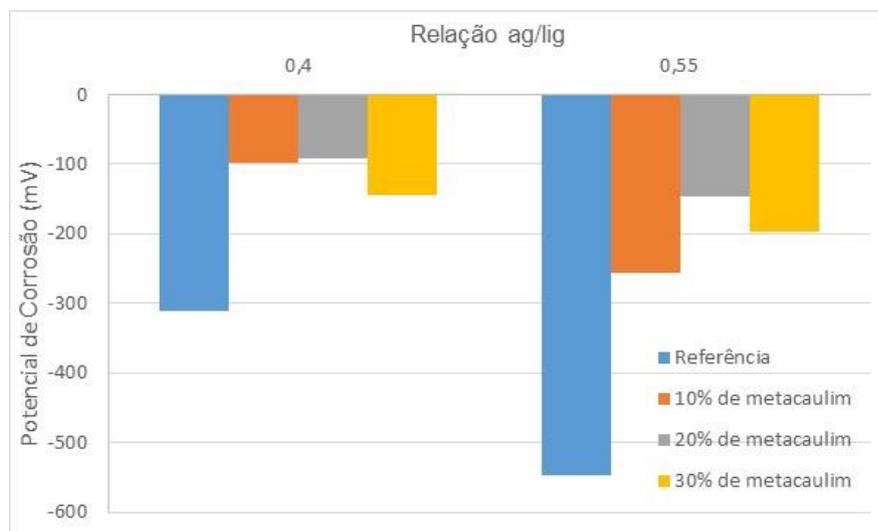
Observa-se na Figura 2.27 que todos os concretos com metacaulim apresentaram desempenho superior ao seu respectivo concreto de referência. Além disso, nota-se que a resistência elétrica diminui na medida em que a relação ag/lig aumenta.

#### b) Potencial de corrosão

Ferreira (2003) estudou concretos com diferentes relações ag/lig (0,40; 0,55; 0,70) contendo 10% de substituição em massa de metacaulim. O autor avaliou o comportamento desses concretos quanto à probabilidade de corrosão das armaduras por meio da técnica de potencial de corrosão. Os concretos com relação ag/lig igual a 0,4 foram os que apresentaram melhor desempenho, ou seja, foram menos eletronegativos.

Os resultados de Oliveira (2007) corroboram os de Ferreira (2003). A autora avaliou o potencial de corrosão em concretos com relação ag/lig 0,4 e 0,55, com 10%, 20% e 30% de metacaulim em substituição à massa de cimento. Os resultados da referida pesquisa estão apresentados na Figura 2.28.

Figura 2.28 - Valores médios do potencial de corrosão (OLIVEIRA, 2007).



Observa-se na Figura 2.28 que o concreto que apresentou melhor desempenho foi o de relação ag/lig 0,4 com 20% de metacaulim. Nota-se também que há um considerável aumento da eletronegatividade com a redução da relação ag/lig e que todos os concretos com adição de metacaulim, independentemente da quantidade, apresentaram potenciais consideravelmente maiores que os concretos de referência.

Ainda nessa mesma linha de pesquisa, Kelestemur e Demirel (2015) estudaram a influência de vários teores de metacaulim no combate à corrosão das armaduras, em concretos com relação ag/lig igual a 0,48. Para tanto eles utilizaram, entre outras, a técnica do potencial de corrosão determinada pela ASTM C876. Os autores aceleraram a corrosão dos concretos submergindo-os em solução de cloretos durante 90 dias. Foi constatado que os concretos com 10% e 15% de metacaulim obtiveram potenciais de corrosão menos eletronegativos que os demais concretos, ficando na faixa de incerteza. Já os concretos com 5% e 20% de metacaulim e o de referência apresentaram desempenho inadequado, tendo potenciais de corrosão que ficaram na faixa de alta probabilidade de corrosão.

### 2.6.3. Nanossílica

Nos últimos anos vem crescendo o número de pesquisas sobre o uso da nanotecnologia aplicada ao concreto. Uma dessas tecnologias é o uso de nanopartículas de sílica ou nanossílica, como tem sido denominada. Este material propõe-se a ser uma adição mineral de desempenho superior, sobretudo em razão de sua elevada finura, aliada à sua composição química essencialmente silicosa e alto grau de amorficidade. Já é possível encontrá-la no

mercado na forma de dispersão aquosa. O processo de obtenção da nanossílica é consideravelmente mais caro do que o da sílica ativa. Enquanto essa é um subproduto do processo de produção de ligas de silício metálico, aquela é obtida a partir de um processo sintético de precipitação de soluções de silicato de sódio (KONTOLEONTOS *et al.*, 2012).

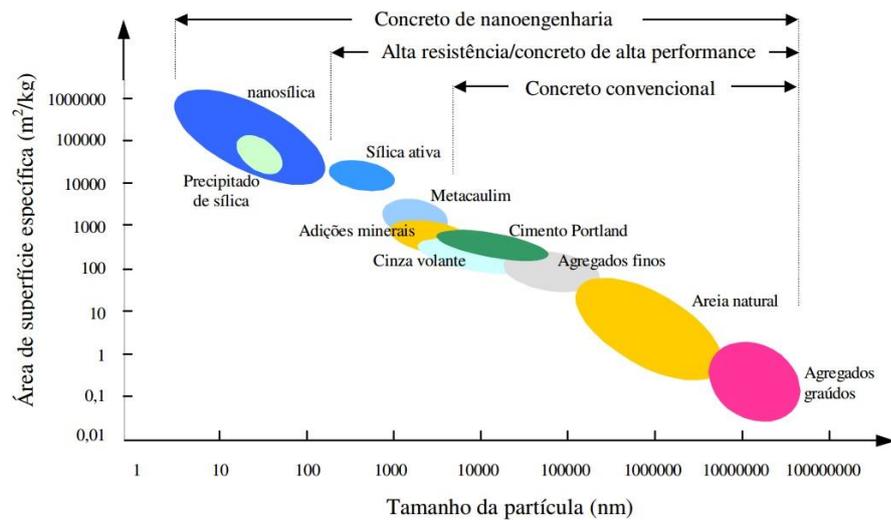
As nanopartículas de SiO<sub>2</sub> podem ser obtidas por processos diversos e, dependendo desse processo e das condições de obtenção, podem variar as propriedades da nanossílica como tamanho de partícula e reatividade, refletindo assim na sua eficiência.

A nanossílica coloidal, por exemplo, corresponde a uma dispersão estável de sílica amorfa em escala nanométrica (geralmente entre 1 e 100 nm), não porosa e partículas normalmente esféricas. Uma dispersão estável de partículas coloidais nesse caso significa que as partículas sólidas não se aglomeram e não sofrem sedimentação a uma taxa significativa (BERGNA, 2006).

As dispersões de nanossílica são possíveis, pois na superfície da partícula de nanossílica existem hidroxilas que lhe conferem polaridade e fazem com que seja possível estabelecer ligações de hidrogênio com a água. Um dos aspectos relevantes para a estabilidade das nanocargas no meio aquoso da solução coloidal é o pH da suspensão. As hidroxilas do meio básico abstraem o hidrogênio do grupo silanol (Si-OH), formando água, a superfície da nanocargas apresenta grupos Si-O<sup>-</sup> com carga negativa que evitam a aglomeração e precipitação das nanopartículas.

As nanopartículas possuem uma grande área de superfície quando comparadas com as matérias-primas tradicionais, conforme mostrado na Figura 2.29. Essa característica é responsável pela alteração das propriedades do concreto no estado fresco e endurecido quando comparado com as adições convencionais. Nesse sentido, a adição de nanopartículas em substituição parcial do cimento tem adquirido atenção crescente nos últimos anos (SOBOLEV; GUTIÉRREZ, 2005).

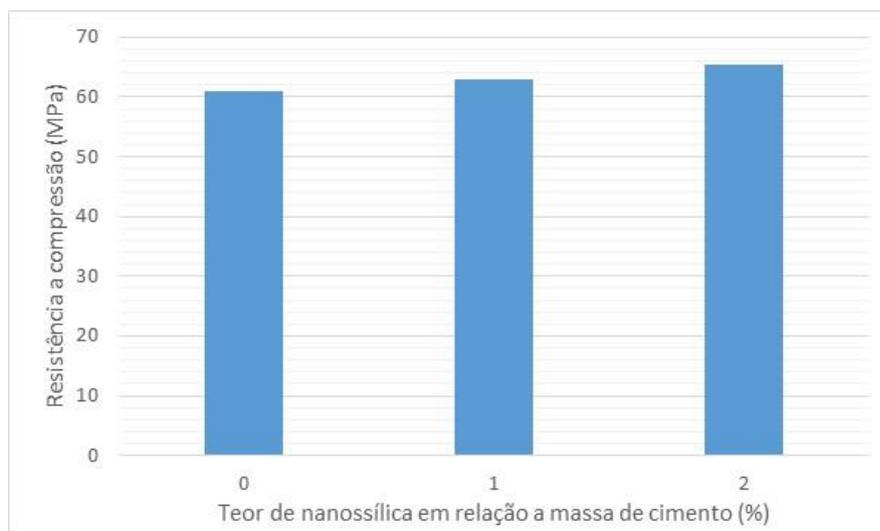
Figura 2.29 - Relação entre o tamanho e a área superficial da partícula (SOBOLEV; GUTIÉRREZ, 2005) -  
modificado pelo autor.



A nanossílica é considerada uma adição pozolânica altamente reativa que, em substituição ao cimento, logra melhorias na resistência dos materiais cimentícios, bem como o aumento da resistência à penetração de água, o que influencia fortemente na durabilidade. Segundo Gleize (2011), a nanossílica demonstra ser mais eficiente no ganho de resistência do que a sílica ativa. Além de proporcionar o efeito fíler para melhorar a microestrutura de concretos, também funciona como um ativador para a reação pozolânica, além de proporcionar a formação de pontos de nucleação, contribuindo para a hidratação do cimento. Esse comportamento leva a uma melhora na microestrutura com refinamento dos poros, conseqüentemente melhorando as propriedades mecânicas do concreto, conforme é discutido nos itens a seguir.

### 2.6.3.1. Efeitos da adição de nanossílica na resistência à compressão

A incorporação de nanossílica ao concreto, mesmo que em quantidades muito pequenas, melhora sua resistência à compressão. Nessa linha, podemos citar o trabalho de Du *et al.* (2015) que estudaram concretos com 1% e 2% de nanossílica em substituição a massa de cimento, além do concreto de referência. Os autores observaram um desempenho levemente superior para os concretos com essa adição mineral em relação ao concreto de referência, como pode ser observado na Figura 2.30.

Figura 2.30 - Resistência à compressão de concretos com nanossílica aos 28 dias de idade (DU *et al.*, 2015).

Zhang *et al.* (2012) realizaram um trabalho com concretos com relação ag/lig fixa em 0,45 e contendo alto teor de escória de alto forno (50%) como referência, e adicionaram a estes concretos 2% de sílica ativa e 2% de nanossílica, em relação à massa de material cimentício. Os autores constataram que os concretos com nanossílica obtiveram melhor desempenho em relação a resistência à compressão.

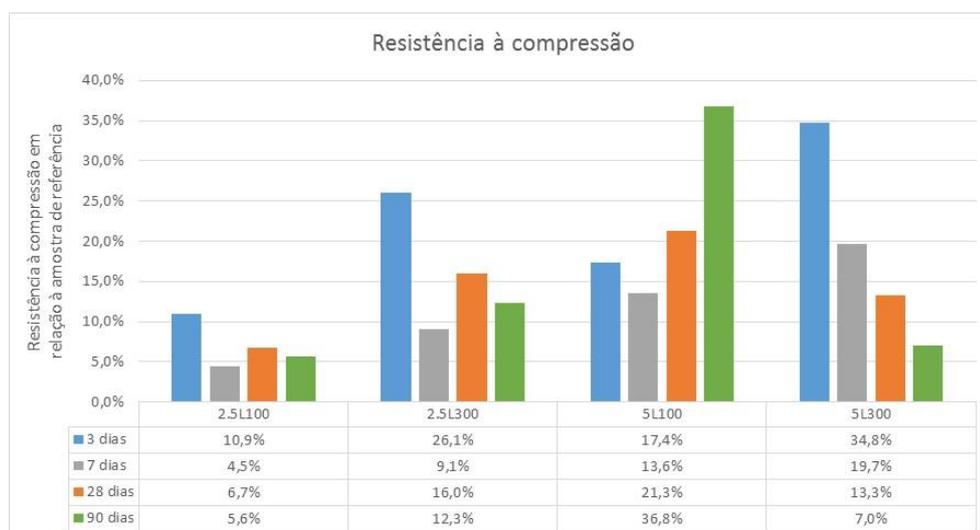
Muito tem sido estudado sobre as propriedades mecânicas de concretos com adição de nanossílica. Singh *et al.* (2012) estudaram pastas de cimento contendo diferentes teores de nanossílica, a saber, 0,25%, 0,5%, 1,0%, 2,5% e 5,0%. Os autores concluíram que a resistência à compressão (avaliada aos 1, 3, 7 e 28 dias) das pastas aumenta na medida em que se aumenta o teor da adição. Para as pastas contendo 5% de nanossílica, a resistência à compressão obtida foi 64% maior para as pastas analisadas com 1 dia e 35% maior para as pastas analisadas aos 28 dias em relação à pasta de referência (sem adições).

Outros autores também observaram incrementos na resistência à compressão em concretos com incorporação de nanossílica. Khanzadi *et al.* (2010) obtiveram maiores valores de resistência à compressão (7, 28 e 91 dias) para concretos com substituição de cerca de 1,5% de nanossílica. Aos 91 dias, o concreto de referência apresentou resistência de aproximadamente 49 MPa, enquanto que o concreto com adição apresentou resistência de cerca de 56 MPa, aproximadamente 14% maiores.

Seguindo a mesma linha de pesquisa, Zahedi *et al.* (2015) estudaram argamassas contendo adição de dois tipos diferentes de nanossílica. O primeiro tipo (100/40) apresenta área específica de 100 m<sup>2</sup>/g, diâmetro médio das partículas igual a 36,2 nm e 40% de concentração em massa

na dispersão de nanossílica. Já o segundo tipo (300/25) apresenta área específica de 300 m<sup>2</sup>/g, diâmetro médio das partículas igual a 12,9 nm e 25% de concentração em massa. Todas as misturas estudadas por esses pesquisadores apresentaram relação ag/lig constante e igual a 0,485. Os autores formularam, para cada tipo de nanossílica utilizado, dois proporcionamentos distintos, sendo um com 2,5% de substituição em massa e o outro com 5%, perfazendo um total de quatro misturas estudadas, sendo elas: 2.5L100, 2.5L300, 5L100 e 5L300, nas quais o número que antecede a letra “L” representa a porcentagem de nanossílica, e o último número representa o tipo de nanossílica que foi empregado. O ensaio de resistência à compressão foi realizado aos 3, 7, 28 e 90 dias de idade e para cada idade analisada foram rompidos três corpos de prova cúbicos de 50 cm de aresta. Na Figura 2.31 são apresentados os resultados obtidos, em relação ao proporcionamento de referência (sem incorporação de nanossílica).

Figura 2.31 - Resistência à compressão das argamassas contendo nanossílica estudadas por Zahedi *et al.* (2015) - modificado pelo autor.



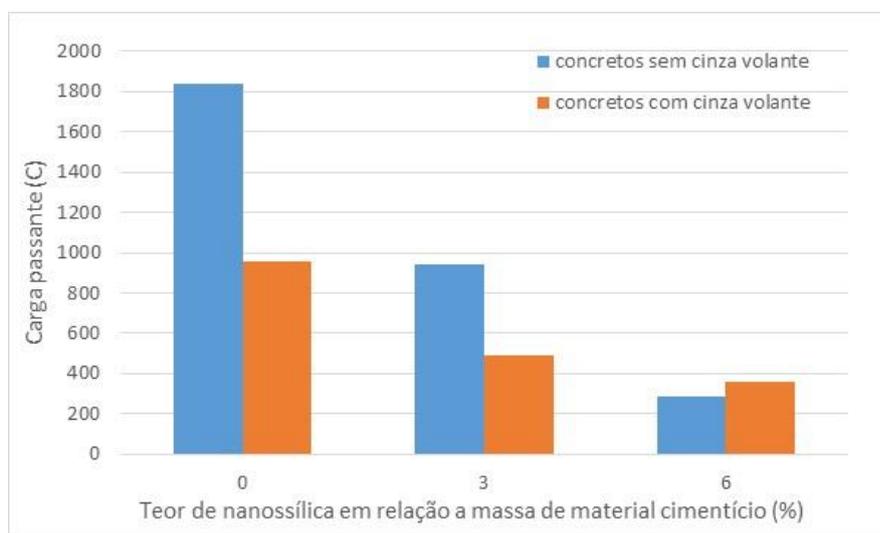
Observa-se na Figura 2.31 que todos os proporcionamentos com incorporação de nanossílica apresentaram resistências à compressão superiores ao proporcionamento de referência. O elevado aprimoramento obtido nas argamassas contendo a mesma proporção de substituição em nanossílica do tipo 300/25 em relação à 100/40 é devido à sua elevada superfície específica e reatividade. O rápido consumo de portlandita, especialmente nas idades iniciais, melhorou bastante a resistência das argamassas com incorporação de nanossílica 300/25. Entretanto, com o progresso da hidratação, o incremento de resistência devido à incorporação dessas nanopartículas é diminuído e as argamassas com incorporação de nanossílica 100/40 acabam sendo mais eficientes em idades avançadas.

### 2.6.3.2. Efeitos da adição de nanossílica no transporte de cloretos

A influência da nanossílica nas propriedades de transporte do concreto tem sido objeto de estudo de diversos trabalhos. Nesse contexto podemos citar o trabalho de Ghafari *et al.* (2014), que estudaram o efeito da nanossílica em concretos de baixa relação ag/lig (0,16), tendo sido utilizados teores de 1, 2, 3 e 4%, em relação à massa de cimento. Foi constatado que o concreto com teor de 3% apresentou melhor resultado em relação às propriedades de transporte estudadas, a saber, absorção capilar, permeabilidade ao gás e absorção de água.

Abrangendo um ramo específico das propriedades de transporte do concreto, a saber, o transporte de cloretos, Said *et al.* (2012) avaliaram a penetrabilidade de cloretos, por meio do método da ASTM C1202, em concretos sem nenhum tipo de adição, concretos com nanossílica e concretos com adição combinada de cinza volante e nanossílica. Os autores constataram que os concretos com adição de nanossílica obtiveram os melhores resultados, apresentando menores cargas passantes em relação aos concretos de referência. Esses resultados estão apresentados na Figura 2.32.

Figura 2.32 - Avaliação da penetrabilidade de cloretos em concretos com adição de nanossílica e relação ag/lig igual a 0,4 (SAID *et al.*, 2012).



Observa-se na Figura 2.32 que os concretos que obtiveram melhor desempenho foram aqueles com composição ternária (cimento, cinza volante e nanossílica), apresentando redução de quase 80% da carga passante em relação aos concretos sem nenhum tipo de adição.

Também utilizando o método da ASTM C 1202, Zhang *et al.* (2012) avaliaram a penetrabilidade de cloretos em concretos. Eles fixaram a relação ag/lig em 0,45 e produziram

concretos contendo alto teor de escória de alto forno (50%) como referência e adicionaram a estes concretos 2% de sílica ativa e 2% de nanossílica, em relação a massa de material cimentício. Os autores constataram que os concretos com nanossílica obtiveram melhor desempenho em tendo uma redução de 25% para o concreto de referência e 20% para o concreto com adição de sílica ativa.

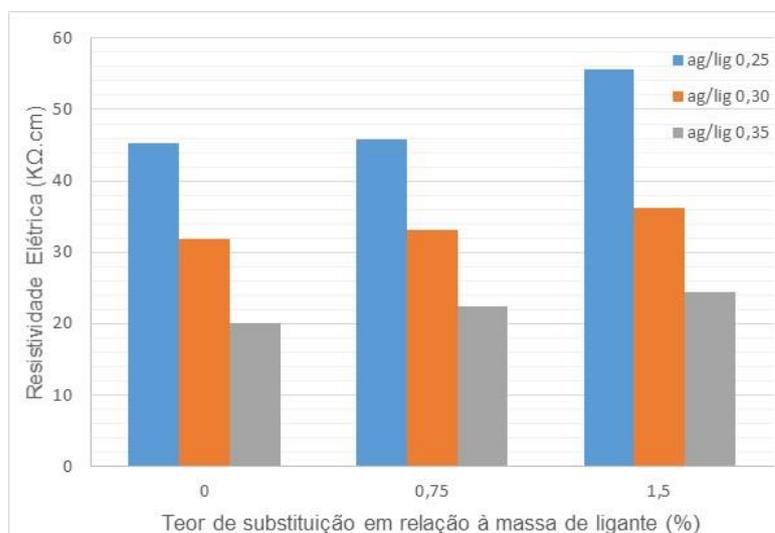
Du *et al.* (2015) realizaram um trabalho no qual foram elaborados concretos com relação ag/lig fixa de 0,42. Os autores avaliaram a penetrabilidade de cloretos em concretos sem adição mineral, com adição de nanossílica (1 e 2%) e com adição combinada de escória de alto forno e nanossílica. Eles constataram, assim como Zhang *et al.* (2012), que os concretos com nanossílica e escória de alto forno apresentaram maior resistência à penetração de cloretos que os concretos de referência e obtiveram uma redução de 23% na penetrabilidade de cloretos. Os autores também avaliaram a difusão de cloretos e observaram comportamento semelhante à penetrabilidade de cloretos. Foi observado que os concretos ternários (cimento, escória de alto forno e nanossílica) com 2% de nanossílica apresentaram redução de quase 80% em relação aos concretos sem nenhum tipo de adição.

Madani *et al.* (2014) estudaram o efeito de vários tipos de nanossílica tendo como referência concretos sem adição mineral e concretos com diferentes teores de sílica ativa, na penetrabilidade e difusão de cloretos. Os autores observaram que os concretos com adição de nanossílica apresentam desempenho superior aos concretos sem adição mineral e os com sílica ativa nas primeiras idades. Contudo, em idades mais avançadas, os concretos com sílica ativa são os que apresentam melhor desempenho, isso pode ser explicado pela reação pozolânica da sílica ativa que ocorre de forma gradativa com o passar do tempo.

### 2.6.3.3. Efeitos da adição de nanossílica na corrosão das armaduras

O efeito sobre a corrosão das armaduras, gerado pela incorporação da nanossílica em concretos, ainda é pouco estudado. Na literatura, são poucos os trabalhos que abordam esse tema, dentre estes destacam-se os trabalhos de Khaloo *et al.* (2016) e Madani *et al.* (2014). Khaloo *et al.* (2016) estudaram concretos com diferentes relações ag/lig (0,25; 0,30; 0,35) e diferentes teores de nanossílica em substituição parcial à massa de cimento. Os autores avaliaram o comportamento destes concretos em relação às propriedades ligadas à durabilidade, em especial a resistividade elétrica. Os resultados deste trabalho estão apresentados na Figura 2.33.

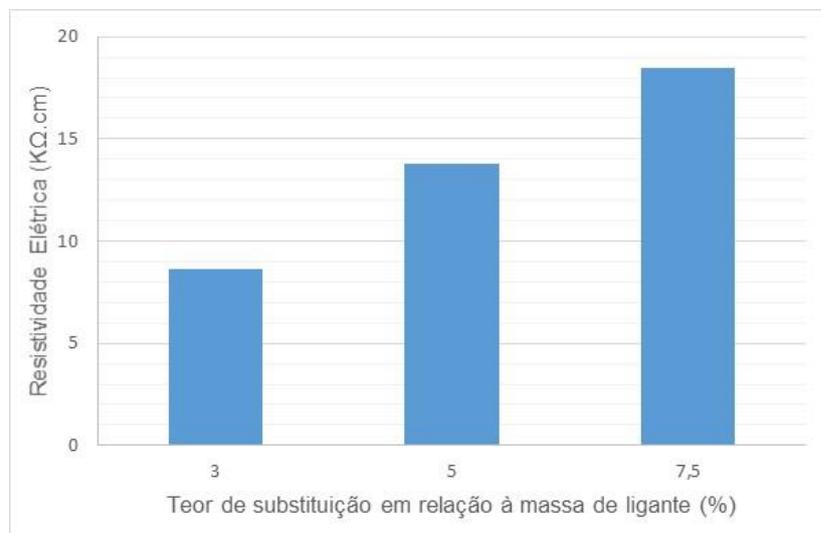
Figura 2.33 - Resistividade elétrica de concretos com diferentes teores de nanossílica, aos 91 dias de idade (KHALOO *et al.*, 2016).



Verifica-se na Figura 2.33 que a resistividade elétrica aumenta na medida que se diminui a relação ag/lig, sendo observado o melhor comportamento para os concretos com relação ag/lig igual a 0,25. Observa-se também que a resistividade aumenta com o aumento do teor de nanossílica incorporada, sendo constatadas maiores resistividades para concretos com 1,5% de nanossílica. De maneira geral, o melhor concreto foi o de relação ag/lig 0,25 com adição de 1,5% de nanossílica, apresentando valores de resistividade elétrica 23% maiores que os do concreto de mesma relação água/ligante e sem nanossílica incorporada.

Madani *et al.* (2014) estudaram concretos com relação ag/lig fixa (0,45) porém, com diferentes teores de nanossílica (3%, 5% e 7,5%). Os autores observaram que os concretos que continham maiores teores de nanossílica apresentaram maiores valores de resistividade elétrica. A Figura 2.34 apresenta os resultados desta pesquisa.

Figura 2.34 - Resistividade elétrica de concretos com diferentes teores de nanossílica, aos 91 dias de idade (MADANI *et al.*, 2014).



Observa-se na Figura 2.34 que o concreto com adição de 7,5% de nanossílica apresentou resistividade 34% maior que a do concreto com 5% e 115% maior que o concreto com adição de 3% de nanossílica.

Em relação a resistividade, o comportamento dos concretos com nanossílica pode ser explicado pela melhoria gerada por essa adição na matriz cimentícia devido à diminuição da dimensão dos poros bem como de sua conectividade.

## **CAPÍTULO 3**

### **PROGRAMA EXPERIMENTAL**

O programa experimental desta dissertação foi elaborado para avaliar o desempenho de concretos com adições minerais em relação à penetração de cloretos e à corrosão das armaduras induzida por estes íons. Isso foi possível por meio de ensaios ligados à durabilidade do concreto e à corrosão das armaduras. Os ensaios relacionados à durabilidade foram o de penetrabilidade de cloretos, regido pela ASTM C 1202, o de difusão/migração de cloretos, segundo o método NT Build 492 e o de determinação da resistividade elétrica do concreto, prescrito pela ASTM G 57. A avaliação da corrosão das armaduras foi realizada pela determinação e monitoramento dos potenciais de corrosão, ensaio este descrito pela ASTM C 876. Além disso, ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade foram realizados para caracterizar mecanicamente os concretos estudados.

Os testes foram conduzidos em dois laboratórios: os ensaios de durabilidade e corrosão foram realizados no Laboratório de Inovação Tecnológica em Construção Civil (LABITECC) da Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás; as dosagens e os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade foram conduzidos nos Laboratórios do setor de Gerência de Pesquisa, Serviços e Inovação Tecnológica de Furnas Centrais Elétricas S. A.

Neste capítulo é apresentada toda a metodologia adotada, desde os estudos de dosagem dos concretos e realização dos ensaios até o tratamento estatístico dos dados, abordando as seguintes partes do programa experimental: variáveis de estudo, caracterização dos materiais utilizados, etapa de definição dos concretos e concretagem, obtenção das amostras de ensaio e, por fim, os métodos de ensaio.

### 3.1. VARIÁVEIS ESTUDADAS

Este programa experimental teve como variáveis a relação ag/lig e o tipo de adição mineral empregada na formulação dos concretos. A seguir são feitas considerações sobre cada uma das variáveis independentes do trabalho.

#### 3.1.1. Relação ag/lig

Foram utilizadas duas relações ag/lig, a saber: 0,4 e 0,6. Ambas estão de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014). A primeira foi utilizada por se tratar de uma baixa relação ag/lig, que confere ao concreto qualidade superior com estrutura interna densa e compacta. Já a outra foi utilizada pelo fato de ser praticada por muitas empresas da área da construção civil e por estar no limite dos parâmetros para a classe de agressividade ambiental II (CAA II), representativa das atmosferas urbanas. É importante destacar-se que os concretos com e sem adição mineral serão comparados sob uma mesma relação ag/lig, bem como se avaliará o efeito desta variável nos concretos com adições minerais pozolânicas e de referência.

#### 3.1.2. Adição mineral

Para o desenvolvimento do programa experimental foram elaboradas misturas binárias e ternárias, além de um traço de referência. As adições foram utilizadas em substituição parcial ao cimento Portland, com teores percentuais em massa. Os teores de substituição foram embasados tanto pela literatura quanto pelas recomendações dos produtores de adições minerais.

Foram utilizados quatro tipos de adições minerais, a saber: sílica ativa, nanossílica, metacaulim HP Max e metacaulim HP XW<sup>8</sup>. O Metacaulim HP MAX apresenta área específica cerca de cinco vezes mais elevada que o Metacaulim HP XW. Apesar de as características físicas serem de grande relevância para a atividade pozolânica das adições minerais, bem como para sua ação como fíler, outras características também contribuem para a consolidação do alto desempenho que se espera para esses materiais. Ambos os metacaulins estudados apresentam teores de sílica da ordem de 50%, além disso, o metacaulim HP MAX apresenta maior índice de atividade

---

<sup>8</sup> Em relação aos metacaulins, optou-se por manter no trabalho as designações comerciais desses materiais, por não haver designações precisas e didáticas que bem caracterizem e diferenciem os dois tipos de metacaulim.

pozolânica (1440 mg Ca(OH)<sub>2</sub>/g – método Chapèlle) em relação ao Metacaulim HP XW (1027 mg Ca(OH)<sub>2</sub>/g – método Chapèlle).

Na Tabela 3.1 está apresentado o código de chamada para as adições minerais que será utilizado doravante nesta dissertação.

Tabela 3.1 - Código de chamada das adições minerais.

Adição Mineral	Código de chamada
Sílica Ativa	SA
Nanossílica	NS
Metacaulim HP MAX	MM
Metacaulim HP XW	MX

É importante frisar que as adições minerais foram usadas para as duas relações ag/lig citadas no item 3.1.1 (em combinações binárias e ternárias com o cimento, como se tem na Tabela 3.2), o que gerou oito traços de concretos diferentes. A Tabela 3.2 apresenta o resumo dos traços que foram estudados nesta pesquisa.

Tabela 3.2 - Traços de concreto desenvolvidos no programa experimental.

Concreto	ag/lig	Código	SA	NS	MM	MX
			Teor de substituição (%)			
REFERÊNCIA	0,4	REF4	0	0	0	0
SA+NS	0,4	SN4	9	1	0	0
MM	0,4	MM4	0	0	10	0
MM + MX	0,4	MMX4	0	0	5	5
REFERÊNCIA	0,6	REF6	0	0	0	0
SA+NS	0,6	SN6	9	1	0	0
MM	0,6	MM6	0	0	10	0
MM + MX	0,6	MMX6	0	0	5	5

Os teores utilizados nesta pesquisa foram tomados de acordo com dados obtidos na literatura. Teores de 10% de sílica ativa são muito comuns, já para a nanossílica foram encontrados teores que variaram de 1% a 4% na literatura e, devido às dosagens piloto realizadas nos laboratórios de FURNAS em que teores acima de 1% causaram excessiva exsudação no concreto, o teor de 1% foi definido por proporcionar desempenho adequado ao concreto no estado fresco. Em relação ao metacaulim, teores que variam de 10% a 30% são bastante comuns na literatura; assim, por ser utilizado nesta pesquisa um metacaulim de desempenho superior (maior finura e índice de pozolanicidade), foi utilizado um teor total desta adição igual a 10%, seja em composição binária com o cimento (empregando-se apenas o Metacaulim HP MAX), seja em

composição ternária, tendo-se o cimento e os Metacaulins HP MAX e HP XW (estes em proporções iguais a 5% e 5%, respectivamente).

É importante ressaltar que a análise combinada dos Metacaulins HP XW e MAX foi proposta com o intuito de melhorar a estrutura interna do concreto por meio de duas adições minerais altamente pozolânicas, porém, com granulometrias diferentes, o que contribui para o refinamento dos poros do concreto por meio do efeito fíler (granulometria contínua), visto que as propriedades de concretos contendo adição unicamente de Metacaulim HP Max já foi estudada no contexto da durabilidade por Teodoro (2016).

## **3.2. CONDIÇÕES FIXAS DA PESQUISA**

A fim de eliminar-se o maior número possível de influências nos resultados foram fixadas as condições e o tempo de cura, além da idade de ensaio.

### **3.2.1. Procedimento de cura**

Os corpos de prova foram submetidos à cura durante 91 dias. Até as 24 h após a moldagem os CPs foram mantidos em ambiente de laboratório e cobertos com sacos de aniagem umedecidos. Após esse período os CPs foram desmoldados e levados à câmara úmida, com umidade relativa acima de 95% e temperatura de  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ , conforme recomendações da NBR 5738 - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova (ABNT, 2003a), onde foram mantidos até 28 dias de idade.

Após a idade de 28 dias os corpos de prova foram retirados e acondicionados em local sob condições de umidade, temperatura e carbonatação ambientes, porém protegidos de intempéries (como a chuva). Os CPs permaneceram nesse local até os 91 dias de idade, data em que começaram os ensaios.

### **3.2.2. Idade do concreto ensaiado**

Os ensaios de durabilidade iniciaram-se com os concretos a partir da idade de 91 dias. Dada a extensão e a complexidade do programa experimental, não foi possível realizar todos os ensaios simultaneamente, mas cuidou-se para que cada ensaio individualmente fosse realizado na

mesma idade (o que coloca todos os concretos em comparação na mesma idade e em igual condição de análise).

Apenas para os ensaios de resistividade elétrica e potencial de corrosão, os CPs não apresentaram a mesma idade quando do início dos ensaios, o que não influencia os resultados, visto que, por serem concretos com adições minerais pozolânicas, a influência da idade nas propriedades ligadas à durabilidade após os 91 dias de idade pode ser desprezada, conforme evidenciado nos estudos de Massazza (1993), Dal Molin (2011) e Neville (2016), entre outros.

A diferença de idades entre os CPs para esses dois ensaios em específico deu-se pois esperou-se que todos os CPs fossem moldados e curados para dar início aos ciclos de molhagem e secagem em solução de cloretos, com o intuito de induzir a corrosão, conforme será explicado posteriormente. Destaca-se que todos os CPs apresentaram idade superior a 91 dias quando da execução desses ensaios, sendo que a diferença de idade entre eles não superou os 100 dias.

### **3.3. MATERIAIS EMPREGADOS**

Para a realização desta pesquisa foram utilizados materiais disponíveis no mercado da região metropolitana de Goiânia, Estado de Goiás. Nos itens seguintes estes materiais estão discriminados, sendo a sua caracterização também apresentada.

#### **3.3.1. Cimento**

Foi utilizado nesta pesquisa um cimento Portland composto CP II F-40 (ABNT NBR 11578: 1991). As principais características físicas e as características químicas obtidas pela técnica de espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX) deste material estão apresentadas na Tabela 3.3. Decidiu-se adotar este cimento por ele ser o mais utilizado e o mais disponível na região onde foi executado o programa experimental, acrescentando-se o fato dele não possuir adições pozolânicas em sua constituição e de ser um cimento, dentro da categoria de cimento Portland composto, que contém o menor teor de adições.

Tabela 3.3 - Caracterização do cimento Portland.

Propriedades determinadas		Teor	Método de ensaio	Limites da norma 11578/91	
CP II F - 40					
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		3,13	*IT.QA.115	-	
Finura	Retido na # 200 (%)	0,01	NBR 12826 / IT.QA.2016	≤ 10,0	
	Retido na # 325 (%)	0,7		-	
	Área esp. Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	5720	IT.QA.114	≥ 2800,0	
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	32,8	NBR 7215	≥ 15,0	
	7 dias	41,6		≥ 25,0	
	28 dias	45,5		≥ 40,0	
	90 dias	47,7		-	
Componentes Químicos (%)	Perda ao fogo	3,85	IT.QA.100	≤ 6,5	
	Resíduo insolúvel	1,14	IT.QA.100	≤ 2,5	
	Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )	3,51		≤ 4,0	
	Óxido de magnésio (MgO)	4,64		≤ 6,5	
	Dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> )	18,8		-	
	Óxido de ferro (FeO <sub>3</sub> )	2,92	IT.QA.101	-	
	Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4,26		-	
	Óxido de cálcio (CaO)	59,5		-	
	Óxido de cálcio livre (CaO)	1,38		-	
	Alcalis totais	Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)	0,26		-
		Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)	1,18	IT.QA.105	-
Equivalente alcalino em Na <sub>2</sub> O		1,04	-		
Sulfato de cálcio (CaSO <sub>4</sub> )		5,97	**IT.DCT.CA.071	-	

\*IT. QA.: Instrução de Trabalho da Química Analítica (Procedimento de FURNAS)

\*\*IT.DCT: Instrução de Trabalho do Departamento de Controle Tecnológico (Procedimento FURNAS)

### 3.3.2. Agregados

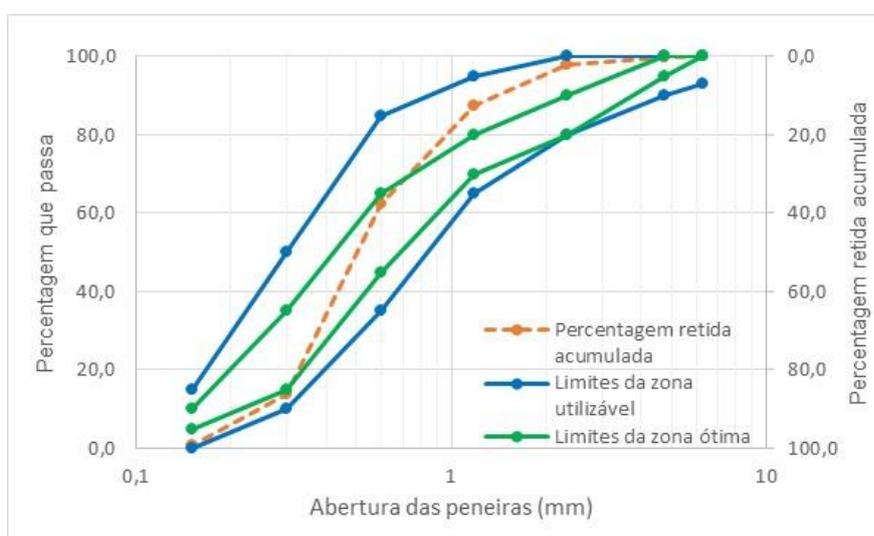
O agregado miúdo utilizado na confecção dos CPs foi uma areia natural, de natureza essencialmente quartzosa, proveniente de leito de rio. Sua composição granulométrica remonta um agregado geral de zona utilizável, mas parte dos grãos se enquadra na faixa de zona ótima. As principais características deste agregado estão apresentadas na Tabela 3.4 e a distribuição granulométrica está apresentada na Figura 3.1.

Tabela 3.4 - Características do agregado miúdo.

Propriedade analisada	Método de ensaio	Resultado Areia fina
Massa específica (g/m <sup>3</sup> )	NBR NM 52	2,64
Dimensão máxima característica (mm)	NBR NM 248	2,36
Módulo de finura	NBR NM 248	2,40
Zona granulométrica	NBR 7211	Zona utilizável*

\*Zona granulométrica que mais se aproxima

Figura 3.1 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo.

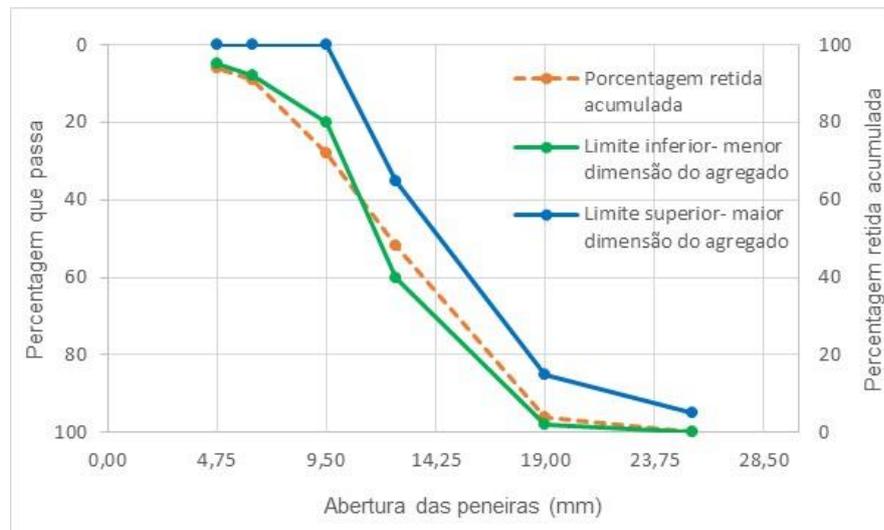


Já os agregados graúdos foram obtidos pela britagem de rocha granítica, sendo classificados pela NBR 7211 (ABNT, 2009c) como pertencentes à segunda zona granulométrica ( $d/D = 9,5/25$ ), o que corresponde à brita 1 na antiga classificação da NBR 7211. As principais características deste agregado estão apresentadas na Tabela 3.5 e sua granulometria está expressa na Figura 3.2.

Tabela 3.5 - Características do agregado graúdo.

Propriedade analisada	Método de ensaio	Resultado Brita
Massa específica (g/m <sup>3</sup> )	NBR NM 53	2,72
Absorção de água (%)	NBR NM 53	0,6
Dimensão máxima característica (mm)	NBR NM 248	19
Módulo de finura	NBR NM 248	6,57
Zona granulométrica	NBR 7211	9,5/25

Figura 3.2 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo.



### 3.3.3. Adições minerais

As adições minerais empregadas nesta pesquisa experimental foram a sílica ativa, nanossílica, metacaulim HP MAX e metacaulim HP XW. Os resultados das análises físicas e químicas destes materiais, exceto a nanossílica, estão apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Caracterização física e química dos metacaulins e da sílica ativa.

Propriedades determinadas	Resultado			Método de ensaio	Limites		
	MM	MX	SA				
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,56	2,53		IT.QA.115*	-		
			2,25	IT.DCT.CA.118**	-		
Área específica - B.E.T. (m <sup>2</sup> /g)	30,99	8,13		ASTM C-1069	≥ 15,0		
			19,5	ASTM C-1069	15,0 ≤ B.E.T ≤ 30,0		
Diâmetro médio dos grãos (D50) (µm)	0,61	12,42	-	Sedigrafia	-		
Constituintes Químicos (%)	Perda ao fogo	1,86	2,46		IT.QA.100	≤ 10,0	
			2,65	IT.DCT.CA.71	≤ 10,0		
	Óxido de magnésio (MgO)	0,81	0,22	0,32		-	
	Dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> )	48,21	48,37	95,1		-	
	Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1,67	0,33	0,18	IT.QA.101	-	
	Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	40,58	42,54	0,61		-	
	Óxido de cálcio (CaO)	0,22	0,03	0,54		-	
	Álcalis totais	Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)	0,41	0,09	0,17		-
		Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)	1,33	0,1	0,59	IT.QA.105	-
		Equivalente alcalino em Na <sub>2</sub> O	1,23	0,03	0,56		-
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	90,46	91,24	95,89	-	> 70,0		
Índice de atividade pozolânica	Com a cal (MPa)	16,57	12,3		NBR 5751	≥ 6,0	
				8,2	IT.DCT.CA.135	≥ 6,0	
	Chapelle (mg Ca(OH) <sub>2</sub> / g)	1440	1027	-	NBR 15895	≥ 750	
Índice de desempenho	Com o cimento Portland (%) (7 dias)	103,4	91,5		NBR 15894-2	-	
				107,8	IT.DCT.CA.136	≥ 75,0	
	Com o cimento Portland (%) (28 dias)	132,4	110,4		NBR 5752	-	
			125,4	IT.DCT.CA.136	≥ 75,0		

\*IT.QA: Instrução de Trabalho da Química Analítica (Procedimento FURNAS)

\*\*IT.DCT: Instrução de Trabalho do Departamento de Controle Tecnológico (Procedimento FURNAS)

Não foi possível proceder à caracterização da nanossílica da mesma maneira que se conduziram os ensaios de caracterização das demais adições minerais. Isto deu-se em virtude da dificuldade de se separar a nanossílica do restante dos sólidos que também vêm estabilizados na dispersão aquosa. Portanto, as características conhecidas da nanossílica estabilizada são as provenientes do fabricante e estão apresentadas na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Principais características da nanossílica, fornecidas pelo fabricante.

Nome comercial		<b>Silicon ns plus 200</b>	
Classificação		Adição mineral pozolânica dispersa em aditivo de alta redução de água, aditivo superplastificante tipo II (SP-II N) e aditivo neutro	
<b>REQUISITOS GERAIS</b>			
<b>PROPRIEDADES</b>	<b>ESPECIFICAÇÕES</b>	<b>VALOR</b>	
Homogeneidade/cor	Mel	Mel	
Densidade relativa (g/cm <sup>3</sup> )	1,07 ± 0,02	1,07	
Teor de sólidos convencional (%)	36,0 ± 0,1	35,9	
Valor de pH	3,0 ± 1,5	2,9	
Teor de cloretos (%)	< 0,01	< 0,01	
Teor de álcalis	N.D.	N.D.	

Obs: Os requisitos gerais/específicos estão de acordo com a NBR 11768

Na dosagem dos concretos foram utilizados três tipos de aditivos diferentes: um superplastificante, um plastificante de pega normal e um incorporador de ar. A Tabela 3.8 apresenta as principais características destes aditivos.

Tabela 3.8 - Características dos aditivos empregados na dosagem.

<b>Nome do Aditivo</b>	<b>Categoria</b>	<b>pH</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Sólidos Totais (%)</b>
Viscocrete	Superplastificante	3,68	1,122	49,38
Sikament RM 310	Plastificante	5,51	1,214	46,05
Sika AER	Incorporador de ar	12,46	1,029	10,01

Vale lembrar que nas dosagens que envolveram a nanossílica foram tomados os cuidados necessários com o incremento dos aditivos citados na Tabela 3.8, uma vez que essa adição mineral é estabilizada com aditivo superplastificante e, inevitavelmente, ao adicioná-la à mistura já há incorporação deste aditivo.

### 3.3.4. Aço

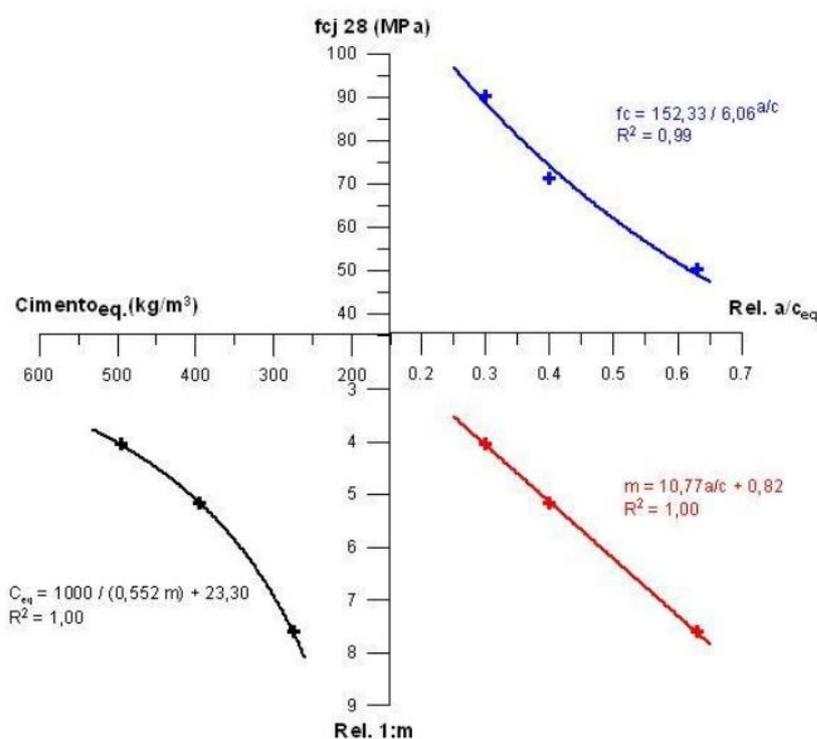
Para a constituição das armaduras presentes nos corpos de prova armados, foram utilizados aços carbonos para concreto armado, conforme a NBR 7480 (ABNT, 2008), do tipo: CA-50, com diâmetro nominal de 10 mm e CA-60 com 5 mm de diâmetro nominal.

### 3.4. CONCRETOS ESTUDADOS

O proporcionamento dos concretos estudados foi realizado segundo a metodologia adotada no trabalho de Silva (2007) e posteriormente utilizada no trabalho de Lopes (2011), por meio do método de dosagem do IPT/EPUSP. Foram realizadas pequenas alterações no que concerne os tipos/teores das adições minerais e dos aditivos utilizados.

Este método pressupõe que o melhor proporcionamento entre os agregados é aquele que resulta no menor consumo de água para um abatimento definido. Como resultado deste método tem-se um diagrama, como o mostrado Figura 3.3. Tal diagrama baseia-se em três diferentes leis de comportamento: na lei de Abrams, a qual estabelece que a resistência à compressão é função da relação ag/lig; na lei de Lyse, que estabelece que a consistência é função da relação “agregados secos/cimento” (m), da relação ag/lig e não depende do traço seco; e na lei de Molinari, que estabelece que o consumo de cimento se relaciona com o traço seco (m).

Figura 3.3 - Curvas de dosagens de concretos obtidas pelo método do IPT/EPUSP (LOPES, 2011).



Lopes (2011) trabalhou com resistências à compressão fixas, tendo trabalhado, também, com concretos na mesma faixa de abatimento. A faixa de abatimento fixada pela autora foi de  $(200 \pm 20)$  mm, o que resultou numa reta, no quadrante inferior direito da Figura 3.3, correspondente à lei de Lyse. Essa reta define a relação de agregados secos por cimento que é

função apenas da relação ag/lig, a qual é dada pela equação expressa na Figura 3.3. O presente trabalho utilizou essa equação para definir o traço de trabalho dos concretos estudados. Ao contrário do trabalho de Lopes (2011), onde se fixou a resistência à compressão, neste trabalho manteve-se fixa a relação ag/lig, como foi explicado no item 3.1.1. A partir das relações ag/lig trabalhadas, da relação entre os agregados secos por cimento e do teor de argamassa (no caso deste trabalho foi adotado o teor de argamassa de 0,55), foram obtidos os traços em massa de material seco dos diversos concretos estudados.

Vale ressaltar que, uma vez que não foi mantido um abatimento fixo, foram realizadas dosagens preliminares em que se procederam alguns ajustes nas quantidades dos aditivos utilizados, a fim de garantir que não houvesse segregação, exsudação e que os concretos apresentassem consistência adequada para serem bombeáveis.

Na Tabela 3.9 estão apresentados os proporcionamentos dos oito concretos estudados nesta pesquisa, sendo eles separados por relação ag/lig e por tipo de adição mineral.

Tabela 3.9 - Proporcionamentos dos concretos estudados.

Concreto	Adição	Teor (%)	ag/lig	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Traço em massa (cimento:adição:areia:brita)	Teor de argamassa	Teor de aditivos (%)		
							IA	P	SP
REF4	-	0	0,4	365	1: 2,37: 2,76	0,55	0,005	0,6	0,9
	-	0							
SN4	SA	9	0,4	325,5	1: 0,1067: 0,0044: 2,61: 3,04	0,55	0,005	0,6	0,3
	NS	1							
MM4	MM	10	0,4	330	1: 0,11: 2,622: 3,056	0,55	-	0,6	1,2
	-	0							
MMX4	MM	5	0,4	325,5	1: 0,056: 0,056: 2,622: 3,056	0,55	-	0,6	1,2
	MX	5							
REF6	-	0	0,6	260	1: 3,55: 3,73	0,55	-	0,6	0,6
	-	0							
SN6	SA	9	0,6	234	1: 0,1067: 0,0044: 3,922: 4,356	0,55	0,005	-	-
	NS	1							
MM6	MM	10	0,6	236	1: 0,11: 3,93: 4,13	0,55	-	0,6	1,2
	-	0							
MMX6	MM	5	0,6	238,5	1: 0,056: 0,056: 3,93: 4,13	0,55	-	0,6	1,2
	MX	5							

### 3.5. CORPOS DE PROVA

Para a realização do programa experimental foram moldados cinco tipos de corpos de prova (CPs), a saber: protótipos de vigas, cubos armados, cubos sem armadura, CP's cilíndricos moldados de 10 cm x 20 cm e CP's cilíndricos moldados de 15 cm x 30 cm. A Tabela 3.10 apresenta os tipos e quantidade de CP's moldados neste programa experimental.

Tabela 3.10 - Resumo da quantidade de CPs concretados por ensaios realizados.

Ensaio	Número de Idade de ensaio	CPs por Idade	Traços	Total de amostras	Tipo de CP	Dimensões dos CPs (cm)
Resistência à compressão	4	3	8	96	cilíndrico	10x20
Módulo de elasticidade	4	3	8	96	cilíndrico	15x30
Penetrabilidade de cloretos ASTM C1202	1	1	8	8	protótipo de viga	20x20x50
Difusão de cloretos NT BUILD 492	1	1	8	8	Protótipo de viga	20x20x50
Resistividade elétrica	1	1	8	8	cúbico	15x15x15
Potencial de corrosão	1	1	8	8	cúbico	15x15x15
<b>Total de CPs moldados</b>				<b>224</b>		

#### 3.5.1. Protótipos de Viga

Optou-se pelos protótipos de viga a fim de simular-se o adensamento real das estruturas de concreto, obtendo-se com isso um concreto com características similares às situações comuns da construção civil, especialmente no que tange ao lançamento e ao adensamento, além do fato do protótipo ser armado e de ser produzido por meio de uma fôrma usual em chapa de madeira compensada.

A partir de cada protótipo de viga,

Figura 3.4**Erro! Fonte de referência não encontrada.** (b), extraiu-se três testemunhos cilíndricos de 10 cm x 20 cm, os quais foram utilizados nos ensaios de penetrabilidade e difusão de cloretos, sendo que cada ensaio foi realizado em triplicata, ou seja, para cada um destes ensaios foi destinado um protótipo de viga o qual corresponde a três cilindros extraídos.

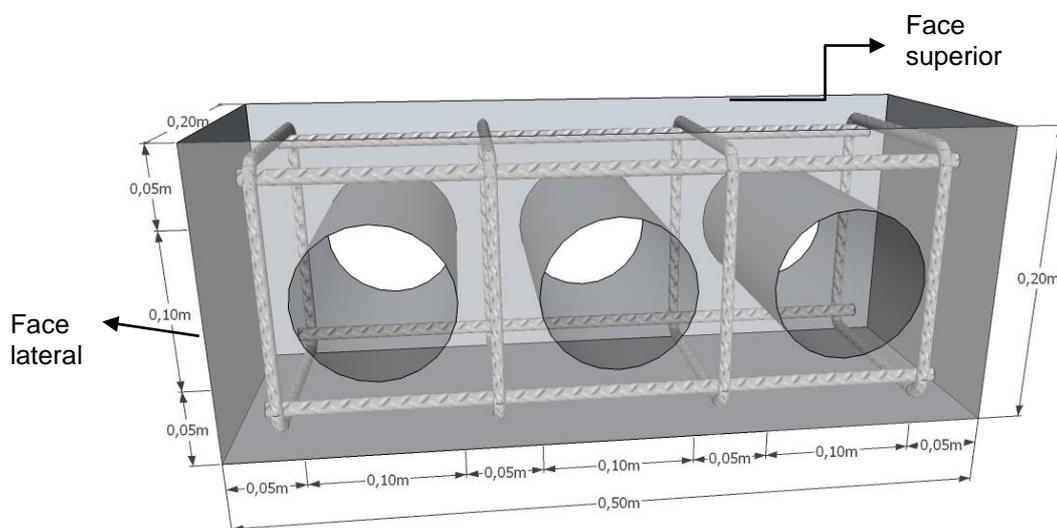
Figura 3.4 - Protótipo de viga destinado aos ensaios de penetrabilidade e difusão de cloretos: (a) antes e (b) depois da concretagem.



Vale ressaltar que estes os testemunhos cilíndricos foram extraídos perpendicularmente à face lateral dos protótipos de viga, de forma que as bases desses corpos de prova sempre correspondiam às faces em contato com a fôrma de madeira, uma vez que esta é a região mais representativa das condições reais de exposição desses elementos estruturais (vigas, pilares e fundo de laje) nas situações de serviço. As operações de extração foram realizadas sempre no dia anterior à realização dos ensaios, a fim de evitar-se as influências da carbonatação do concreto extraído, por meio do uso de extratora rotativa com coroa diamantada para corte úmido, seguindo as recomendações da NBR 7680 (ABNT, 2015b).

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** representa o local e a direção de extração dos testemunhos cilíndricos, bem como o protótipo de viga que foi confeccionado.

Figura 3.5 - Protótipo de viga e local de extração dos testemunhos de 0,10 m de diâmetro x 0,20 m de altura.



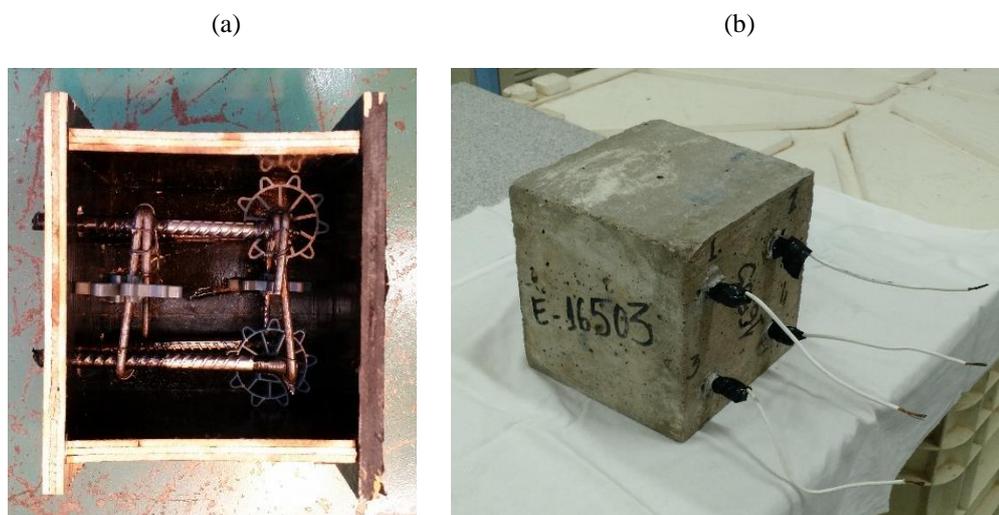
A obtenção de cada corpo de prova variou de acordo com o ensaio realizado. Uma descrição mais detalhada dos tipos de corpo de prova e amostras é feita no item 3.7.

### 3.5.2. CP's cúbicos

Os CPs cúbicos armados foram utilizados para a realização do ensaio de potencial de corrosão e o CP cúbico sem armadura foi utilizado no ensaio de resistividade elétrica superficial do concreto.

No CP cúbico com armadura, as quatro barras de aço longitudinais tiveram uma parte de seu comprimento exposta ao ambiente, isto é, fora do concreto. **A Erro! Fonte de referência não e ncontrada.** Figura 3.6 apresenta a configuração do CP cúbico armado. As barras de aço que possuem uma parte do seu comprimento exposta ao ambiente foram revestidas com fita isolante, de modo que apenas 5 cm de seu comprimento (situado no interior do concreto) ficassem sem essa proteção, conforme será explicitado no subitem a seguir, que discorre sobre a preparação das barras de aço utilizadas neste programa experimental.

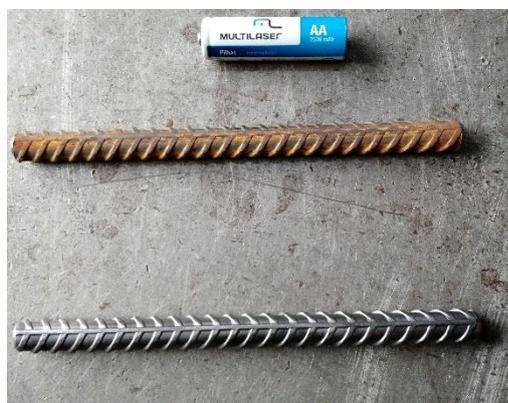
Figura 3.6 - Corpo de prova cúbico empregado no ensaio de potencial de corrosão: (a) antes e (b) depois da concretagem.



### 3.5.2.1. Preparação das barras de aço

As barras de aço utilizadas nos corpos de prova cúbicos armados, destinadas à medida do potencial de corrosão, receberam preparação especial antes da concretagem. Os vergalhões de aço CA-50 de bitola 10 mm foram cortados em segmentos de 15 cm e em seguida foi realizada uma limpeza mecânica com esmeril de cerdas de aço. Esse procedimento foi adotado para garantir que as barras de aço não apresentassem quaisquer indícios de corrosão ao serem concretadas. A Figura 3.7 mostra o aspecto das barras antes e depois da limpeza mecânica.

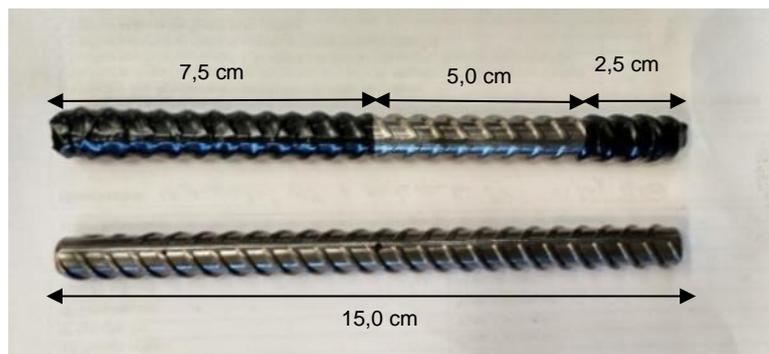
Figura 3.7 - Aspecto da barra de aço antes e depois da limpeza mecânica.



Depois de limpas, as barras foram preparadas para a concretagem da seguinte forma: 2,5 cm de uma das pontas receberam revestimento com três camadas de fita isolante aderente; 7,5 cm,

começando da outra ponta, também receberam três camadas de revestimento com fita isolante; assim, os 5,0 cm situados entre as pontas ficaram expostos, sem qualquer tipo de proteção. Essa área exposta fica sujeita à corrosão por ataque de cloretos e, conseqüentemente, torna possível os ensaios relacionados à corrosão das armaduras. A Figura 3.8 mostra como as barras foram preparadas.

Figura 3.8 - Preparação das barras de aço utilizadas no ensaio de potencial de corrosão.



### 3.5.3. Fôrmas

Para os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade, foram utilizadas fôrmas metálicas cilíndricas de 10 cm x 20 cm (diâmetro x altura) e 15 cm x 30 cm (diâmetro x altura), respectivamente. Para confeccionar as fôrmas dos demais corpos de prova (prismáticos), foram utilizados compensados plastificados de 10 mm de espessura. A Figura 3.9 apresenta imagens das fôrmas dos CPs prismáticos.

Figura 3.9 - Fôrmas dos corpos de prova prismáticos: (a) CPs destinados aos ensaios de penetrabilidade e difusão de cloretos; (b) CPs destinados aos ensaios de potencial de corrosão e resistividade elétrica.



### 3.5.4. Produção dos concretos e moldagem dos corpos de prova

As misturas dos concretos foram realizadas em betoneira basculante da marca CSM, com capacidade nominal de 600 litros. As betonadas foram realizadas no laboratório do bloco 22 do Centro Tecnológico de Furnas Centrais Elétricas que possui ambiente abrigado de intempéries, arejado e sem climatização.

A sequência de introdução dos materiais na betoneira e o tempo de amassamento do concreto seguiram os procedimentos recomendados pelo Laboratório de Concreto de Furnas, obedecendo à seguinte ordem e detalhamento:

- primeiramente, foi imprimada a betoneira com um pouco de pasta de cimento de mesma relação ag/lig do concreto a ser produzido; com a betoneira parada e previamente imprimada, foram adicionados os agregados graúdo e miúdo (material seco) e parte da água;
- ligou-se a betoneira por um minuto a fim de homogeneizar-se os materiais; com a betoneira parada, foi introduzido o cimento. Para os traços com adição mineral, esta era introduzida juntamente com o cimento, exceto a nanossílica a qual foi dispersa em água antes de ser incorporada à mistura;
- ligou-se a betoneira por um período de três minutos;
- imediatamente após a betoneira entrar em movimento, foi adicionado o restante da água, deixando somente uma pequena quantidade para se lavar o becker com o aditivo superplastificante, o qual foi adicionado diretamente no concreto, com a betoneira em movimento, durante o início do segundo minuto de amassamento do concreto;
- após a inserção de todos os materiais e a movimentação da betoneira por três minutos, fez-se uma parada intermediária de três minutos e, posteriormente, ligou-se a betoneira por mais três minutos.

Depois de terminada a betonada e respeitado o período de repouso, o concreto foi despejado em carrinhos de mão e transportado até o local da concretagem. Esse procedimento é apresentado na sequência de fotos da Figura 3.10.

Figura 3.10 - Sequência do trabalho realizado desde a retirada do concreto da betoneira até a colocação de sacos de aniagem úmidos sobre as fôrmas.



Após a concretagem, os corpos de prova permaneceram em ambiente úmido por 24 horas (dentro das fôrmas e cobertos com sacos de aniagem umedecidos). Depois desse período, os CPs foram conduzidos até uma câmara úmida com umidade relativa de 95% e temperatura igual a  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ , onde permaneceram até a idade de 28 dias. Em seguida, as amostras foram retiradas da câmara e conduzidas para um ambiente externo abrigado, sob uma tenda, onde ficaram até completar 91 dias de idade. A Figura 3.11 mostra o armazenamento dos CPs na tenda.

Figura 3.11 - Local de armazenamento dos corpos de prova.



### 3.6. MÉTODOS

Os métodos de ensaio principais deste trabalho foram divididos em três categorias, a saber: os ensaios associados ao transporte de cloretos, os de indução da corrosão e monitoramento da

corrosão. Além destes, uma caracterização dos concretos no estado fresco e uma avaliação da resistência mecânica à compressão e do módulo de elasticidade foram realizadas. Tais métodos estão descritos mais detalhadamente nos subitens deste item 3.6.

É importante salientar que à exceção das avaliações no estado fresco e das avaliações da resistência à compressão e do módulo de elasticidade, cujas idades de análise foram variadas (o módulo e a resistência à compressão foram determinado aos 3, 7, 28 e 91 dias), as demais propriedades ocorreram com os concretos na idade de 91 dias ou superior a isto, de modo a se considerar que parte majoritária das reações de hidratação do cimento já tenham ocorrido, assim como as reações pozolânicas decorrentes das adições minerais presentes.

### **3.6.1. Avaliação das propriedades mecânicas e da rigidez dos concretos**

Os concretos foram caracterizados mecanicamente, no estado endurecido, pela sua resistência à compressão. A avaliação da rigidez se deu por meio da determinação do módulo de elasticidade. A seguir, têm-se detalhes e informações sobre essas análises.

#### **3.6.1.1. Resistência à compressão**

No estado endurecido, os concretos foram caracterizados nas idades de 3, 7, 28, e 91 dias quanto à resistência à compressão (ABNT NBR 5739: 2007), fazendo-se uso de corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10 cm de diâmetro x 20 cm de altura.

Foram analisados três corpos de prova por traço estudado, por idade, perfazendo um total de 96 CPs moldados para esta propriedade.

#### **3.6.1.2. Módulo de elasticidade**

O módulo de elasticidade à compressão ou módulo de deformação tangente inicial dos concretos foi obtido por meio do procedimento prescrito na ASTM C 469: 2002. O ensaio foi realizado em três corpos de prova de 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura, para cada concreto, nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias, perfazendo um total de 96 CPs. Os equipamentos utilizados foram uma prensa hidráulica automatizada com capacidade de 2000 kN, além de extensômetros digitais para micro deformações com precisão de 0,0001 mm.

### **3.6.2. Caracterização dos concretos no estado fresco**

Os concretos no estado fresco foram caracterizados por meio das determinações da consistência pelo abatimento do tronco de cone, segundo a NBR NM 67 (ABNT, 1998); da massa específica, de acordo com a NBR 9833 (ABNT, 1987) e do teor de ar incorporado, conforme a NBR NM 47 (ABNT, 2002).

Todos os concretos apresentaram relação ag/lig fixa, porém, o abatimento variou para cada traço de estudo. Os concretos estudados apresentaram características compatíveis a concretos bombeáveis, que representa a maioria dos concretos comercializados atualmente no mercado da construção civil.

### **3.6.3. Métodos associados ao transporte de cloretos**

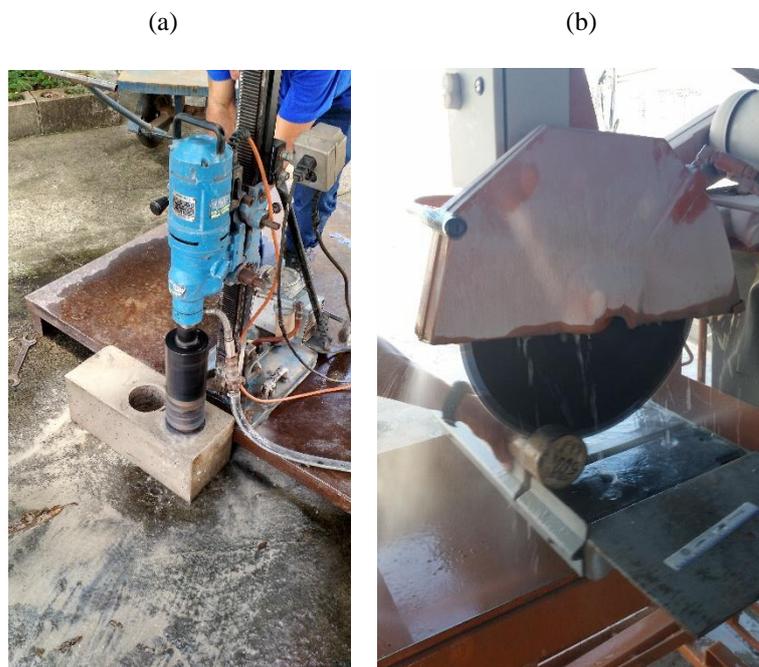
Esses métodos foram utilizados para verificar a capacidade que os concretos estudados possuem de impedir ou dificultar a penetração de cloretos. Foram utilizados dois métodos: o da ASTM C 1202 e o NT Build 492, descritos a seguir.

#### **3.6.3.1. Penetrabilidade de cloretos pela ASTM C 1202**

Este método determina a carga elétrica que atravessa os concretos, fornecendo, assim, uma indicação da resistência do concreto em relação à penetração de íons cloro.

O ensaio consiste em monitorar a corrente passante através de um corpo de prova de concreto, com dimensões nominais de 100 mm de diâmetro e 50 mm de espessura. Estas amostras foram obtidas da seguinte forma: primeiro extraíram-se dos protótipos de viga, três cilindros de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura com auxílio de serra circular diamantada. De cada um desses cilindros foram extraídas, a partir da superfície, uma amostra de 50 mm de espessura, resultando em três “bolachas” de 100 x 50 mm. A Figura 3.12 apresenta a sequência usada para obter-se os corpos de prova utilizados no ensaio de penetrabilidade de cloretos.

Figura 3.12 - Obtenção das amostras para o ensaio de penetrabilidade de cloretos: (a) Extração dos CPs cilíndricos a partir do protótipo de viga; (b) corte das “bolachas”.



Após a extração, as “bolachas” tiveram a lateral selada por meio de tinta epóxi e foram mantidas a vácuo, em dessecador, durante três horas. Em seguida, mantendo-se a aplicação do vácuo, foi adicionada água no dessecador e mantiveram-se as amostras imersas por mais uma hora. Posteriormente, removeu-se o vácuo do dessecador e as amostras ficaram submersas durante dezoito horas. A Figura 3.13 apresenta uma imagem de algumas amostras dentro do dessecador.

Figura 3.13 - Preparação e condicionamento das amostras para o ensaio de penetrabilidade de cloretos.



Depois desse período de preparação, as amostras foram colocadas em uma câmara composta por dois compartimentos, sendo que um deles foi preenchido com solução de NaCl (cloreto de sódio) a 3% e o outro com solução de NaOH (hidróxido de sódio) a 0,3 M. Do lado em que foi colocado o NaCl ligou-se o polo negativo e do outro lado ligou-se o polo positivo de uma fonte de corrente contínua capaz de fornecer uma voltagem constante de 60 V. A Figura 3.14 apresenta um esquema do ensaio.

Figura 3.14 - Ensaio de penetrabilidade de íons cloro dado pela ASTM C1202.



O ensaio foi realizado durante 6 horas e a cada 30 minutos a corrente passante foi aferida. Ao final, obteve-se a corrente total de acordo com a equação 3.1.

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + 2I_{360}) \quad 3.1$$

Em que  $I_0$  é a corrente medida imediatamente após a aplicação da voltagem,  $I_{30}$  é a corrente medida após 30 minutos,  $I_{60}$  é a corrente medida após 60 minutos e assim sucessivamente, até chegar aos 360 minutos (6 horas).

A resistência à penetração de cloretos foi analisada de acordo com os critérios da ASTM C1202 - *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration* (ASTM, 2012), destacados na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 - Penetrabilidade de cloretos com base na carga passante (ASTM C1202, 2012).

CARGA PASSANTE (Coulombs-C)	PENETRABILIDADE DE CLORETOS
> 4000	Alta

<b>CARGA PASSANTE (Coulombs-C)</b>	<b>PENETRABILIDADE DE CLORETOS</b>
2000 - 4000	Moderada
1000 - 2000	Baixa
100 - 1000	Muito baixa
< 100	Desprezível

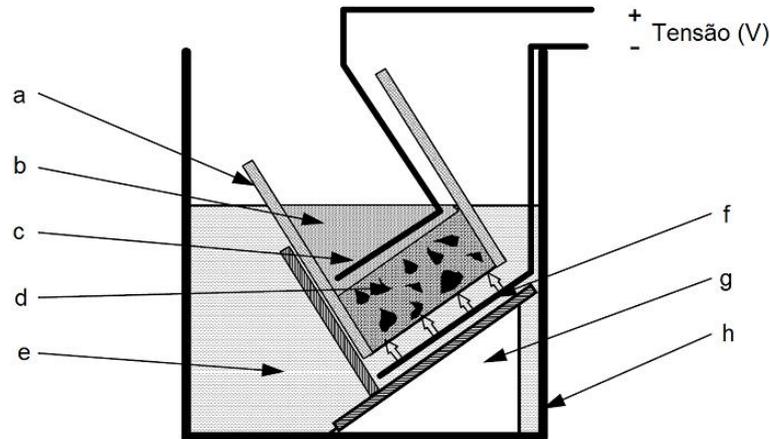
Conforme explicado anteriormente, os ensaios de penetrabilidade foram realizados aos 91 dias de idade para todos os concretos estudados.

### 3.6.3.2. Ensaio de difusão de cloretos - NT BUILD 492

Assim como no ensaio de penetrabilidade, os ensaios de difusão de cloretos foram realizados aos 91 dias de idade para todos os concretos estudados. Este ensaio foi realizado de acordo com a norma norueguesa NT BUILD 492: 1999. Foram utilizadas “bolachas” de 50 mm de espessura e 100 mm de diâmetro que foram obtidas a partir de testemunhos cilíndricos extraídos dos protótipos de viga, da mesma forma que foram obtidas as amostras do ensaio de penetrabilidade.

As “bolachas” foram submetidas à saturação a vácuo durante três horas e, em seguida, foram mantidas em solução contendo água destilada e hidróxido de cálcio  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ , ainda no vácuo, por mais uma hora. Depois foram mantidas nesta solução por mais dezoito horas, tendo sido o vácuo removido. Depois desse período de preparação/saturação das amostras, iniciou-se a montagem do ensaio. Cada amostra ficou envolta por uma luva de borracha e as laterais foram vedadas por meio de tinta epóxi e silicone com a finalidade de evitar o vazamento da solução. A configuração do ensaio é apresentada, esquematicamente, na Figura 3.15. No compartimento indicado pela letra (e) foi colocada solução de NaCl a 10% e no compartimento interior, indicado pela letra (b), foi colocada solução de NaOH a 0,3 M.

Figura 3.15 - Configuração do ensaio acelerado de difusão de cloretos onde: (a) proteção de borracha; (b) solução com NaOH; (c) ânodo; (d) amostra de concreto; (e) solução com NaCl; (f) cátodo; (g) suporte plástico e (h) caixa plástica (NORDTEST, 1999).



A Figura 3.16 apresenta o ensaio em andamento.

Figura 3.16 - Etapas do ensaio de difusão/migração de cloretos: (a) saturação da amostra; (b) amostras em ensaio.



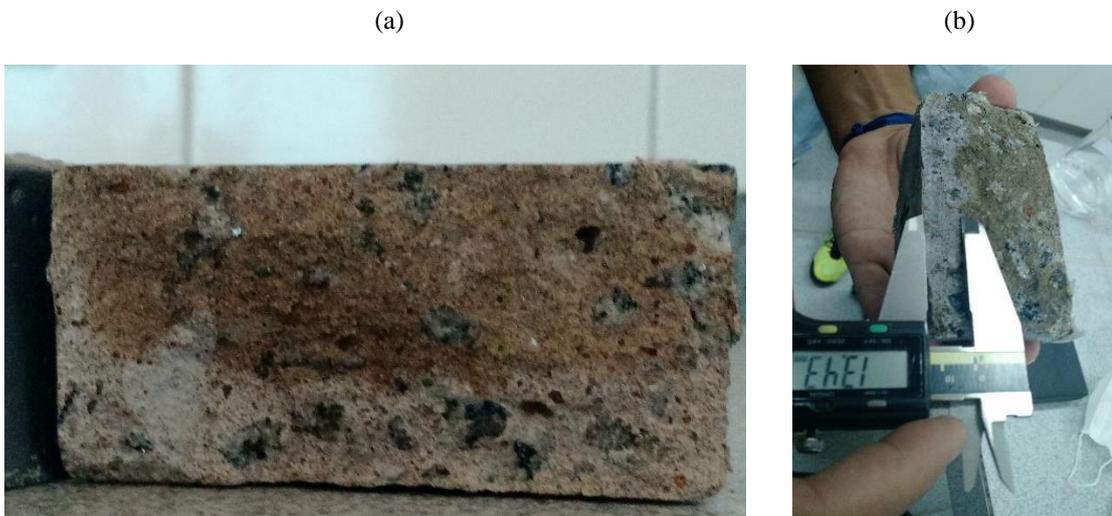
O ensaio iniciou-se com voltagem de 30 V e, de acordo com a corrente inicial, ajustou-se a voltagem, que poderia variar entre 10 V e 60 V, de acordo com a qualidade do concreto. A partir da corrente inicial também foi definida a duração do ensaio, que variou entre 24 horas e 96 horas. Vale ressaltar que neste trabalho foram observados ensaios que tiveram duração mínima, como no caso dos concretos de referência, por exemplo, e ensaios que tiveram duração máxima, como nos concretos de relação ag/lig igual a 0,4 com adição combinada de sílica ativa e nanossílica.

Ao final do ensaio, as amostras ensaiadas foram divididas diametralmente em duas partes e nelas foi aspergida solução a 0,1 M de nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ ). A parte em que estavam

impregnados os cloretos, que representa a frente de cloretos, apresentou uma coloração mais clara, o que permitiu observar a profundidade de penetração de cloretos na amostra. A medida da profundidade de penetração foi realizada com o auxílio de um paquímetro, em sete pontos distintos de cada metade, quando possível.

É importante ressaltar que as medidas da profundidade de penetração de cloretos só são adotadas em pontos em que não se constata a presença de agregados, visto que eles formam uma barreira à passagem desse agente agressivo, o que pode camuflar os resultados. Essa etapa do ensaio é apresentada na Figura 3.17.

Figura 3.17 - Etapas pós ensaio de difusão de cloretos: (a) aspecto da amostra após a aspersão do  $\text{AgNO}_3$ ; (b) método de medição da frente de cloretos por meio de paquímetro.



O valor da frente de cloretos utilizado para o cálculo do coeficiente de difusão foi a média entre os pontos medidos. Calculou-se o coeficiente de difusão por meio da equação 3.2.

$$D_{nssm} = \frac{0,0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \left( x_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273 - T)Lx_d}{U - 2}} \right) \quad 3.2$$

Em que  $D_{nssm}$  é o coeficiente de difusão ( $10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s) em estado não estacionário (ou coeficiente de difusão aparente), que é obtido a partir de um ensaio de difusão/migração;  $T$  é a média da temperatura de início e fim do ensaio (°C);  $U$  é a voltagem aplicada (V);  $t$  é a duração do ensaio (horas);  $L$  é a espessura da amostra do ensaio (mm) e  $x_d$  é a média da espessura de penetração dos cloretos (mm). Os resultados obtidos foram classificados de acordo com os dados da Tabela 3.12.

Tabela 3.12 - Classificação da resistência à penetração de cloretos em função do coeficiente de difusão/migração no regime não estacionário (NILSSON; NGO; GJØRV, 1998<sup>9</sup> apud GJØRV, 2015).

Coeficiente de Difusão/Migração de cloretos no regime não estacionário ( $10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)	Resistência a penetração de cloretos
> 15	Baixa
10 - 15	Moderada
5 - 10	Alta
2,5 - 5	Muito Alta
< 2,5	Extremamente Alta

### 3.6.4. Método de indução da corrosão - ensaio acelerado de molhagem e secagem em solução de cloretos

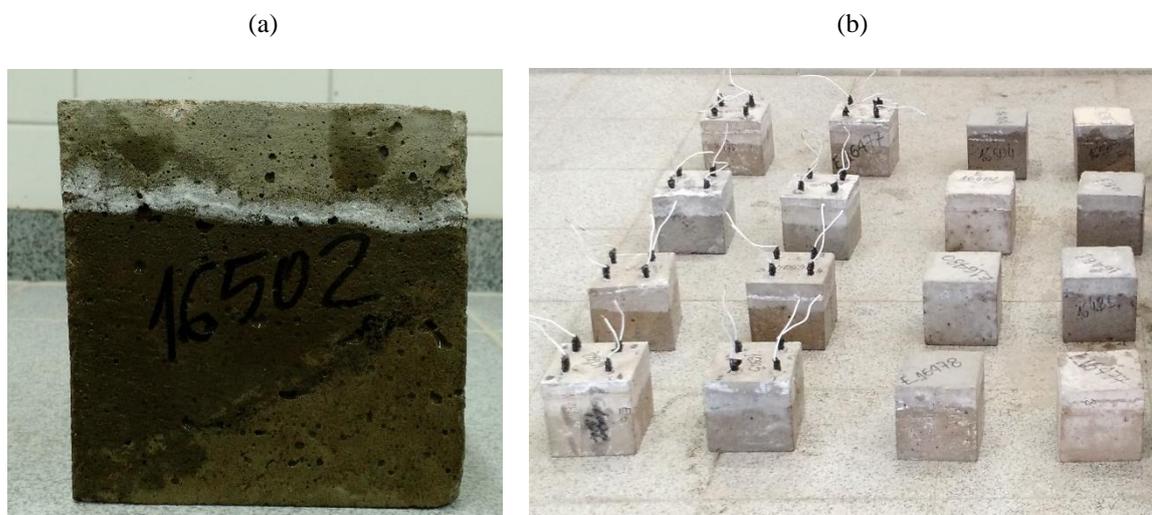
Depois do período de cura, ou seja, após os 91 dias de idade, os CPs destinados aos ensaios de avaliação da corrosão, a saber, os CPs cúbicos armados e sem armaduras, foram submetidos ao ataque por cloretos. O ataque foi feito em solução agressiva rica em cloretos por meio de ciclos semanais. Os ciclos consistiram de: dois dias de imersão dos corpos de prova em solução contendo 5% de NaCl (aproximadamente a concentração da água do mar) e cinco dias secando ao ar livre. O ataque aos CPs foi realizado durante 91 dias, num total de treze ciclos. As Figura 3.18 e 3.19 apresentam o procedimento de molhagem e secagem, respectivamente.

Figura 3.18 - Período de molhagem/imersão dos CPs em solução agressiva contendo cloretos na concentração de 5% em massa.



<sup>9</sup> NILSSON, L.-O.; NGO, M. H.; GJØRV, O. E. **High-performance repair materials for concrete structures in the port of Gothenburg**. In: 2th INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE UNDER SEVERE CONDITIONS - ENVIRONMENT & LOADING, 1998, **Proceedings...** London, 1998. p. 1193 -1198.

Figura 3.19 – Procedimento de secagem dos CPs: (a) aspecto dos CPs logo após o período de imersão; (b) período de secagem ao ar dos CPs.



### 3.6.5. Métodos de monitoramento da corrosão

Foram utilizados os métodos de resistividade elétrica do concreto e de potenciais de corrosão, com a finalidade de monitorar o processo da corrosão nos diversos concretos estudados. Salienta-se, no entanto, que a avaliação direta da corrosão ocorre apenas com o método de potenciais de corrosão, sendo a medida da resistividade um meio indireto de avaliação da corrosão.

#### 3.6.5.1. Resistividade elétrica superficial do concreto

Os CPs cúbicos de 15 cm de lado foram monitorados com base na ASTM G 57- *Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method* (ASTM, 2012b). Este método é bastante utilizado devido à sua praticidade. O método de *Wenner*, como é conhecido, consiste em pressionar o aparelho (Figura 3.20) na superfície do concreto. Em linhas gerais, as medições são baseadas na corrente elétrica alternada de baixa frequência que passa através do concreto entre os dois eletrodos mais externos, enquanto a queda de tensão entre os dois eletrodos internos é observada. O valor da resistividade é dado diretamente no aparelho, como apresentado na Figura 3.21.

Figura 3.20 - Aparelho usado no teste Wenner.



Figura 3.21 - Teste de resistividade elétrica no concreto.



É importante ressaltar que foram realizadas duas medidas (diagonais) em cada face, exceto na face superior do CP, a qual corresponde à superfície livre no momento da concretagem e não foi imersa na solução de cloretos.

O ensaio de resistividade elétrica do concreto foi realizado uma vez por semana, após os ciclos de molhagem, durante 91 dias (treze ciclos).

### 3.6.5.2. Potencial de corrosão

O monitoramento do potencial de corrosão dos CPs cúbicos armados ao longo do tempo foi feito por meio do método da ASTM C 876 - *Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete* (ASTM, 2009).

A rigor, o que se mede nessa técnica é a diferença de potencial entre as semicélulas aço/eletrólito e uma semicélula estável, que é um eletrodo padrão de referência, conforme ilustrado na Figura 2.14. Portanto, como já foi discutido no item 2.5.2, o que se mede é um potencial relativo, e não absoluto. Foi utilizado como eletrodo de referência um eletrodo de

calomelano saturado com potencial de redução padrão, em relação ao hidrogênio, igual a +0,242 a 25°C.

A Figura 3.22 apresenta a configuração para a realização do ensaio de potencial de corrosão. Foram necessários um voltímetro de alta impedância de entrada, o eletrodo de referência (calomelano saturado), a fiação para fazer a conexão elétrica entre a barra de aço do concreto e o voltímetro e também entre o eletrodo de referência ao mesmo voltímetro e uma esponja de baixa resistência elétrica. Essa esponja teve o objetivo de estabelecer uma ponte de elevada condutividade elétrica entre o eletrodo de referência e a superfície do concreto e, para tanto, ela foi umedecida com solução condutora (água contendo um pouco de detergente líquido).

Figura 3.22 - Realização do ensaio de potencial de corrosão: (a) eletrodo e voltímetro de referência; (b) execução do ensaio.



É importante ressaltar que foram realizadas quatro medidas (uma em cada barra de aço do CP).

O ensaio de potencial de corrosão foi realizado uma vez por semana, após os ciclos de molhagem, durante 91 dias (treze ciclos). Os resultados de potencial foram analisados de acordo com os critérios adotados para o eletrodo de calomelano saturado (ECS), apresentados na Tabela 3.13.

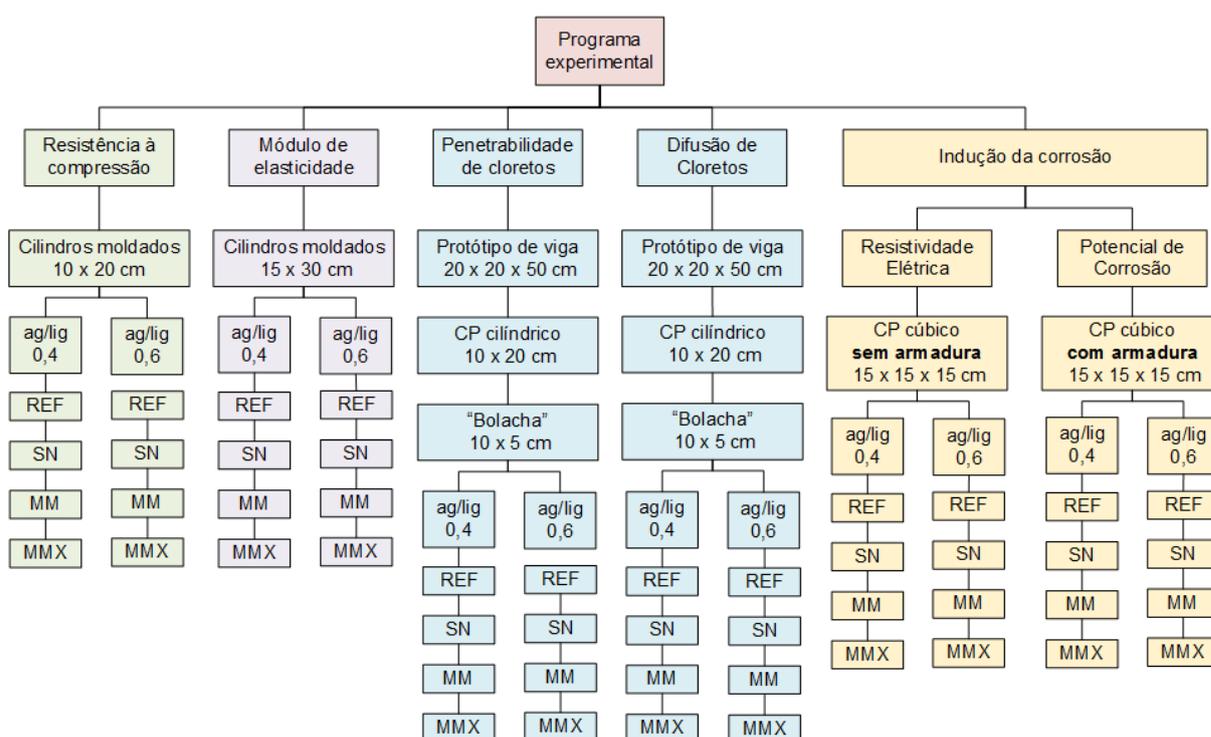
Tabela 3.13 - Critérios de avaliação do potencial de corrosão da ASTM C 1202, considerando as medidas com o eletrodo de calomelano saturado - ECS (mV).

Potencial de corrosão relativo ao eletrodo de referência de calomelano saturado - ECS (mV)	Probabilidade de corrosão (%)
Mais negativo que -276	> 90
Mais positivo que -126	< 10
Entre -126 e -276	Incerta

### 3.7. PANORAMA GERAL DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

Descritas as variáveis, as condições fixas da pesquisa e os métodos empregados, apresenta-se na Figura 3.23 o fluxograma/panorama geral do programa experimental.

Figura 3.23 - Panorama geral do programa experimental.



### 3.8. PROCEDIMENTO ESTATÍSTICO PARA ANÁLISE DOS RESULTADOS

Inicialmente foi verificada a presença de *outliers* (valores espúrios) nos resultados do programa experimental por meio do teste de Dixon. O valor Q de Dixon é definido como a relação entre a diferença existente entre o valor suspeito de ser *outlier* e o valor mais próximo a este e a diferença entre o maior e o menor valor do conjunto de medidas (amplitude). O valor de Q calculado foi comparado com o valor de Q tabelado, para o nível de confiança de 95%. Caso o valor de Q calculado não fosse superior ao tabelado, o valor suspeito era mantido e, caso contrário, era rejeitado.

Em seguida, foi utilizado o software Statistica 7.0, desenvolvido pela StatSoft®, para realizar a análise de variância (ANOVA), em que foram calculados os valores do parâmetro de

significância de Snedecor “Fcal” e comparados com os valores tabelados “Ftab”. Esses valores são obtidos em função dos graus de liberdade do efeito avaliado e do resíduo do modelo, na tabela de distribuição F de Snedecor, para o nível de significância de 5%. Se  $F_{cal} > F_{tab}$ , o efeito avaliado é significativo no modelo. Em seguida, os dados foram submetidos à comparação múltipla de médias, pelo teste de Duncan, a qual agrupa as médias que não diferem de forma significativa entre si (PIMENTEL GOMES, 1990).

Os resultados dos ensaios realizados e dos testes estatísticos aplicados estão apresentados no Capítulo 4.

## **CAPÍTULO 4**

### **APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

Este capítulo é dedicado à apresentação dos resultados obtidos no programa experimental desenvolvido nesta dissertação. Nele estão apresentados os resultados relacionados ao comportamento mecânico do concreto (resistência à compressão e módulo de elasticidade), à durabilidade (penetrabilidade e difusão de cloretos) e à corrosão das armaduras (resistividade elétrica superficial e potencial de corrosão).

Os resultados estão abordados de maneira a facilitar o entendimento ao leitor, sendo apresentado primeiro os resultados mecânicos, seguido dos de durabilidade e, por último, os relacionados à corrosão. Para auxiliar na análise e interpretação dos resultados, os dados obtidos foram tratados estatisticamente por meio da análise de variâncias (ANOVA) e da comparação múltipla de médias (teste de Duncan) para verificação da influência dos fatores considerados na avaliação e de como ocorre o agrupamento dos resultados similares e a separação de resultados distintos.

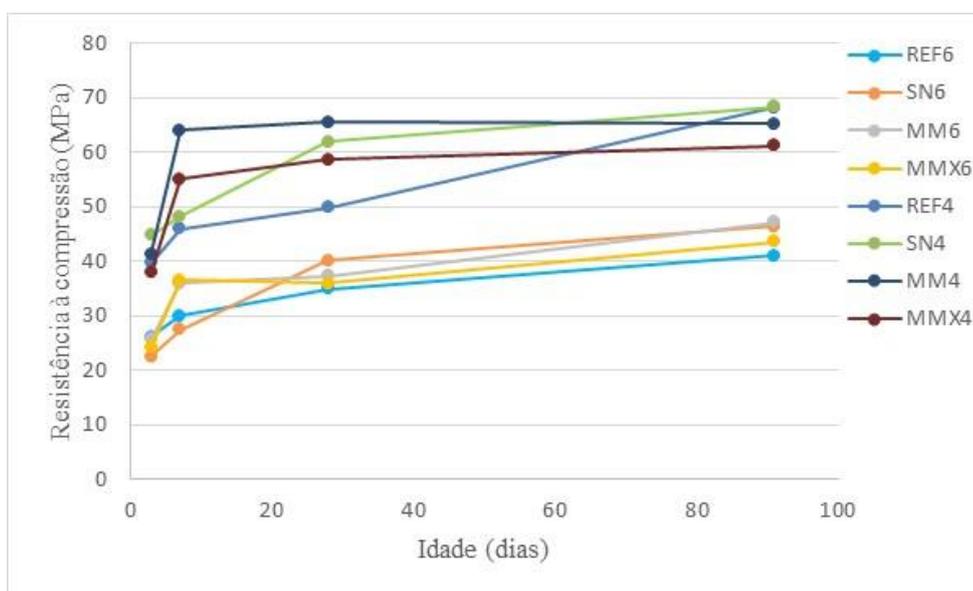
#### **4.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO**

No presente trabalho a resistência à compressão foi medida em quatro idades diferentes (3, 7, 28 e 91 dias) e para cada idade foram realizadas três medidas (ensaios realizados em triplicata), com o intuito de se observar o comportamento dessa propriedade ao longo do tempo. Os valores obtidos receberam o tratamento estatístico exposto no item 3.8. Cabe ressaltar também que as resistências aos 3 e 7 dias dos concretos de referência foram obtidas por meio do método de regressão não-linear. Esse procedimento foi necessário porque não foi possível obter as medidas nos dias programados. As resistências das demais idades dos concretos de referência, bem como as resistências de todas as idades para os demais concretos não precisaram ser corrigidas. A Tabela 4.1 apresenta um resumo das médias, por idade, da resistência à compressão dos diversos tipos de concretos estudados. Já a Figura 4.1 apresenta um gráfico que expressa esses valores médios de resistência ao longo do tempo, considerando os resultados para as duas relações ag/lig estudadas.

Tabela 4.1 - Resistência à compressão média dos concretos nas diferentes idades analisadas.

Concretos	Relação ag/lig	Resistência à compressão média (MPa)			
		3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
REF4	0,4	39,6	46,0	49,9	68,3
SN4		44,8	48,3	61,9	68,3
MM4		41,4	64,0	65,6	65,2
MMX4		37,8	55,1	58,6	61,2
REF6	0,6	26,0	29,9	34,9	41,1
SN6		22,4	27,4	40,2	46,4
MM6		25,6	35,9	37,4	47,2
MMX6		24,2	36,6	36,0	43,6

Figura 4.1 - Resistência à compressão média em função da idade para os concretos estudados.



Observa-se na Tabela 4.1 e na Figura 4.1 que a maior resistência média obtida foi de 68,3 MPa, registrada para os concretos com adição combinada de sílica ativa e nanossílica (SN4) e os de referência (REF4), ambos na relação ag/lig 0,4, aos 91 dias. Contudo, o primeiro obteve maiores resistências em idades mais precoces. Ghafari *et al.* (2014) também observaram comportamento semelhante em que a adição combinada de sílica ativa e nanossílica ao concreto resultou em resistências elevadas já nas primeiras idades. Ao analisar apenas as resistências aos 28 dias, a maior resistência foi observada para o concreto com metacaulim HP MAX na relação ag/lig 0,4 (MM4), atingindo 65,6 MPa contra 61,9 MPa do concreto SN4 e 58,6 MPa do concreto com metacaulim HP MAX e metacaulim HP XW na relação 0,4 (MMX4).

A menor resistência registrada, aos 91 dias, foi de 41,1 MPa, obtida pelo concreto de referência na relação ag/lig 0,6 (REF6), seguida pela resistência do concreto com metacaulim HP MAX e metacaulim HP XW na relação 0,6 (MMX6) que foi de 43,6 MPa. Vale lembrar que essas resistências resultaram de uma média de três valores e, além disso, de dados que foram tratados estatisticamente, em que dados muito discrepantes foram eliminados. Isso significa que resistências maiores que a média foram observadas, assim como abaixo dela.

O comportamento da resistência à compressão é influenciado por vários fatores, que no caso desta pesquisa são: adição mineral, relação ag/lig e idade dos concretos ensaiados. Os resultados obtidos de resistência à compressão foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA) para comprovar a influência que as variáveis relatadas exercem sobre essa propriedade do concreto e a Tabela 4.2 apresenta os resultados.

Tabela 4.2 - Resultado da ANOVA realizada para os dados de resistência à compressão, considerando como variáveis independentes a adição mineral, a relação ag/lig e a idade dos concretos.

	SQ	GL	MQ	F <sub>cal</sub>	F <sub>tab</sub>	Resultado
<b>MODELO</b>	175432,4	1	175432,4	15743,26	4,007	SIGNIFICATIVO
<b>Adição Mineral</b>	380,7	3	126,9	11,39	2,764	SIGNIFICATIVO
<b>ag/lig</b>	8847,1	1	8847,1	793,94	4,007	SIGNIFICATIVO
<b>Idade</b>	6002,4	3	2000,8	179,55	2,764	SIGNIFICATIVO
<b>Adição Mineral*ag/lig</b>	94	3	31,3	2,81	2,764	SIGNIFICATIVO
<b>Adição Mineral*Idade</b>	629,7	9	70	6,28	2,046	SIGNIFICATIVO
<b>ag/lig*Idade</b>	106,6	3	35,5	3,19	2,764	SIGNIFICATIVO
<b>Adição Mineral*ag/lig*Idade</b>	287,3	9	31,9	2,86	2,046	SIGNIFICATIVO
<b>Erro (resíduo)</b>	646,3	58	11,1			
<b>Total</b>	17328,6	89				
			<b>R<sup>2</sup>=0,96</b>			
			<b>R=0,98</b>			

SQ=Soma dos quadrados; GL=Grau de liberdade; MQ=Média dos quadrados;

F=Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos;

R<sup>2</sup>=Coeficiente de determinação do modelo;

R=coeficiente de correlação.

Depreende-se da Tabela 4.2 que o modelo adotado é muito significativo. Além disso, nota-se também que cada variável independente exerce um efeito individual significativo na resistência à compressão. Dos três efeitos considerados, ao se observar o valor de F<sub>calc</sub>, pode-se concluir que a relação ag/lig foi aquele de maior impacto nos resultados de resistência à compressão, seguido pela idade. Em relação às interações duplas e tripla, como todas resultaram

significativas, conclui-se que o efeito que cada variável exerce individualmente sobre a resistência é influenciado pelas outras duas variáveis, denotando assim haver sinergia entre essas variáveis (entre os efeitos considerados). Os resultados em questão ratificam o fato, de conhecimento geral, que o tipo de adição mineral, a relação ag/lig e a idade são determinantes para a resistência à compressão.

Nos itens subsequentes será apresentado o efeito que cada variável exerce individualmente na resistência à compressão do concreto.

#### 4.1.1. Influência da adição mineral

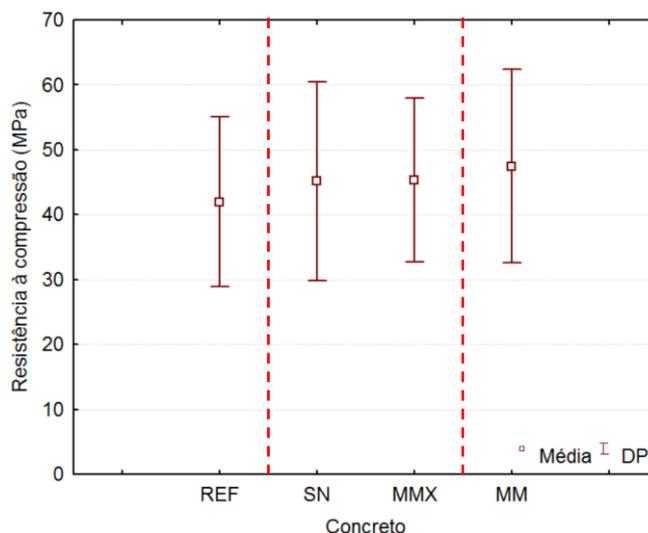
Conforme apresentado na Tabela 4.2 (resultados da ANOVA) e consagrado no meio técnico (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016), a adição mineral é um fator determinante na resistência à compressão do concreto. A análise pelo teste de Duncan mostrou que os resultados de resistência à compressão separam-se em três grupos distintos quando se considera apenas a influência das adições minerais. A Tabela 4.3 apresenta os resultados deste teste.

Tabela 4.3 - Teste de Duncan (agrupamento de médias) para a resistência à compressão, levando-se em consideração o efeito das adições minerais.

Adição Mineral	Resistência à compressão (MPa)	Agrupamento		
		1	2	3
REF	42,0	****		
SA+NS	45,2		****	
MM+MX	45,4		****	
MM	47,5			****

A Figura 4.2 apresenta um gráfico com os valores médios globais das resistências à compressão de todos os concretos estudados, levando em consideração apenas o efeito das adições minerais, oriundos da Tabela 4.3. As linhas tracejadas demarcam os grupos estatisticamente semelhantes. Observa-se nessa figura que os concretos com adição de MM apresentaram o melhor desempenho geral, seguidos dos concretos com adição de SA e NS e das misturas com MM e MX (estas duas situações dentro de um mesmo grupo) e, por último, dos concretos de referência.

Figura 4.2 - Valores médios de resistência à compressão para cada tipo de adição mineral utilizada, com o desvio-padrão, considerando as duas relações ag/lig.



Os concretos do grupo 2, correspondentes aos concretos com (SA + NS) e (MM + MX) obtiveram, respectivamente, resistências 7,6% e 8,1% maiores que os concretos do grupo 1 (concretos de referência). Já os concretos do grupo 3, concretos com o metacaulim MM, obtiveram resistência média 13,1% maior que os concreto do grupo 1. Estes resultados mostram que as substituições parciais do cimento pelas adições minerais utilizadas nesta pesquisa resultaram em um incremento de resistência à compressão.

Os resultados de resistência à compressão dos concretos com SA e NS corroboram os resultados de Ghafari *et al.* (2014) e Du *et al.* (2015), os quais também estudaram concretos contendo nanossílica e encontraram que a substituição parcial do cimento por esta adição logra melhores resultados de resistência à compressão. Já os resultados dos concretos que levam em sua composição algum tipo de metacaulim, vão ao encontro dos resultados encontrados por Teodoro (2016), em que concretos com adição de MM ou MX apresentaram maiores valores de resistência à compressão que os concretos de referência. Esse comportamento de melhoria da resistência com as adições pozolânicas de alta finura é consensual na literatura, em especial quando se comparam concretos na mesma relação ag/lig, porque as adições provocam alteração física da pasta de cimento, que se torna mais densa e compacta, com melhoria significativa da zona de transição pasta-agregado. Além disso, há refinamento do sistema de poros, que traz impacto positivo quanto à durabilidade.

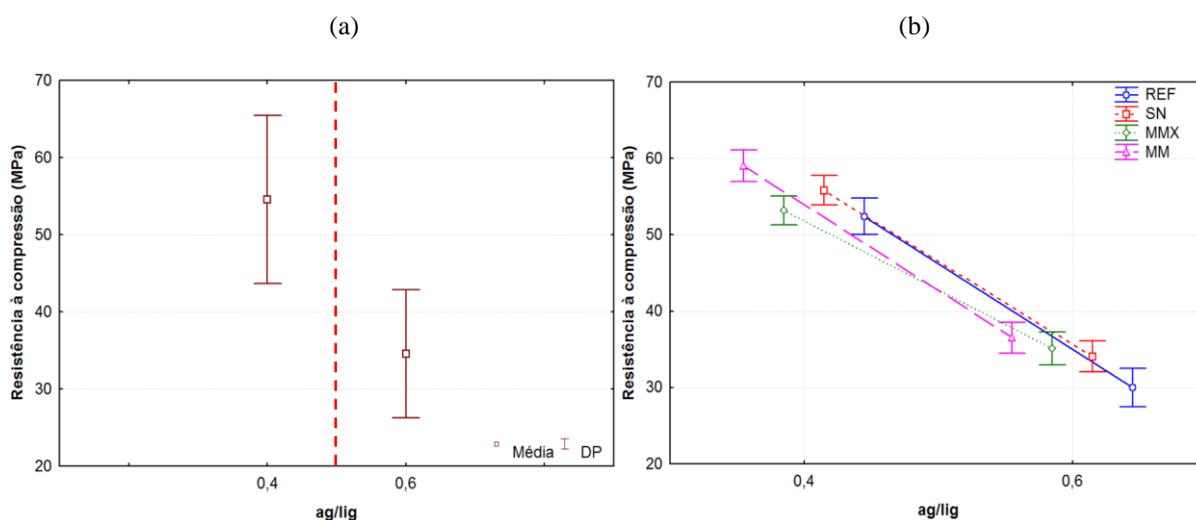
#### 4.1.2. Influência da relação ag/lig

A relação ag/lig é uma variável fundamental para as propriedades mecânicas, especialmente para a resistência à compressão. É sabido que quanto mais baixa a relação ag/lig, melhor é o

desempenho dos concretos no tocante a resistência à compressão (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016). Isso deve-se à menor quantidade de água excedente na mistura (em relação à água teórica para a total hidratação do cimento), o que resulta menos vazios no concreto endurecido. Neste trabalho os concretos seguiram este padrão, ou seja, os concretos com relação ag/lig igual a 0,4 apresentaram resistências à compressão maiores que os concretos com relação ag/lig igual a 0,6.

A análise desta propriedade pelo teste de Duncan, considerando apenas a relação ag/lig, resultou em dois grupos distintos, sendo um grupo relacionado à relação ag/lig 0,4 e outro à relação 0,6. A Figura 4.3 (a) apresenta o resultado do referido teste, sendo que a linha tracejada demarca a separação dos dois grupos estatisticamente distintos.

Figura 4.3 – Resistência à compressão: (a) resultado da análise pelo teste de Duncan, considerando apenas a média global por relação ag/lig e desvio-padrão e (b) valores médios de resistência à compressão para cada tipo de concreto em função da relação ag/lig.



Observa-se na Figura 4.3(a) que o valor médio de resistência para a relação ag/lig 0,4 foi de aproximadamente 55 MPa, já para a relação ag/lig 0,6 foi de aproximadamente 35 MPa. Isto mostra que os concretos de relação ag/lig 0,4 apresentaram resistência à compressão média 57% maior que os concretos na outra relação ag/lig. Quando se analisa a relação ag/lig para as diversas adições minerais, como é mostrado na Figura 4.3 (b), percebe-se que os concretos que apresentaram melhor desempenho, para ambas as relações ag/lig, foram os com MM e os concretos de referência foram os que apresentam pior desempenho (como discutido no tópico anterior). Vale destacar que esses valores levaram em consideração todas as idades (3, 7, 28 e 91 dias) e, por isso, os resultados globais divergem levemente do comportamento geral obtido para a idade mais avançada (91 dias), na qual o concreto que apresenta maior resistência à

compressão é aquele com adição combinada de SA e NS. Este comportamento será discutido no próximo item.

### 4.1.3. Influência da idade

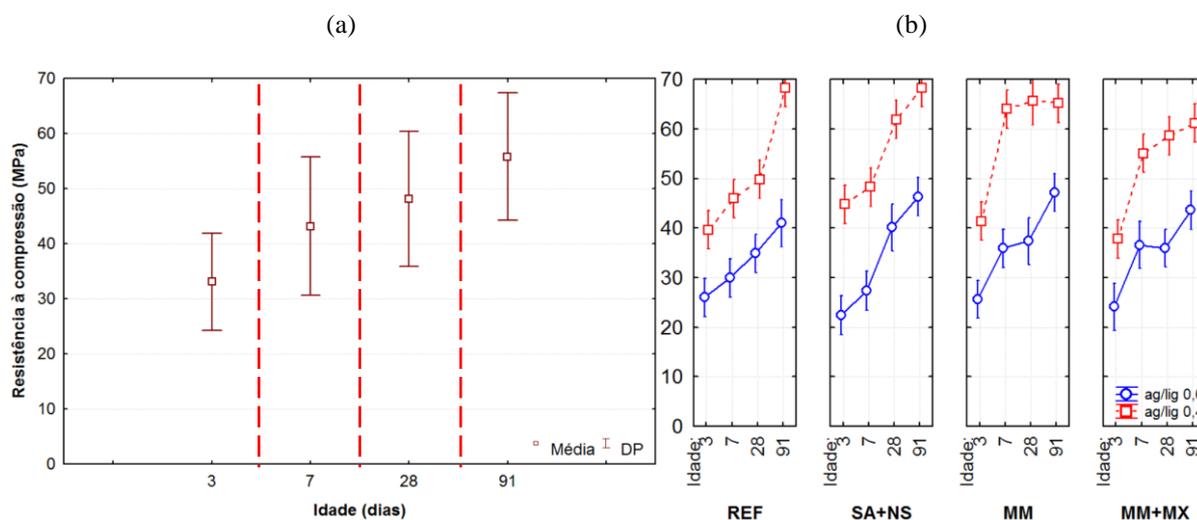
A idade do concreto é um fator importante para a resistência à compressão, pois os compostos oriundos da hidratação do cimento e, também, das reações pozolânicas formam-se de maneira gradativa ao longo do tempo. Isto explica o fato de os concretos com idades mais avançadas apresentarem resistências à compressão maiores que os concretos com idades precoces. A Tabela 4.4 mostra os resultados obtidos com o teste de Duncan para todos os tipos de concretos estudados neste trabalho, considerando apenas a influência da idade.

Tabela 4.4 - Teste de Duncan para a resistência à compressão levando-se em consideração o efeito da idade.

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)	Agrupamento			
		1	2	3	4
3	33,1	****			
7	43,2		****		
28	48,1			****	
91	55,8				****

Na Tabela 4.4, verifica-se que o teste de Duncan separou as resistências à compressão, baseado apenas na idade, em quatro grupos distintos, um para cada idade. Esses grupos mostram uma ordem crescente de resistências a partir da idade de 3 dias. Para esta idade a resistência média foi de 33,1 MPa, já para a idade de 91 dias a resistência média foi de 55,8 MPa, valor 68% maior que o primeiro. A análise pelo teste de Duncan está apresentada graficamente na Figura 4.4 (a), sendo que as linhas tracejadas demarcam os grupos estatisticamente semelhantes, já o crescimento da resistência com a idade do concreto está apresentado na Figura 4.4 (b).

Figura 4.4 - Dados de resistência à compressão: (a) resultado da análise pelo teste de Duncan, expressando a média global de resistência em função da idade, com o desvio-padrão; (b) resultados médios de resistência à compressão dos concretos estudados em função da idade, separados por relação ag/lig, para cada tipo de adição mineral.



A Figura 4.4 (a) apresenta a separação por grupos obtida por meio do teste de Duncan. Observa-se que o primeiro grupo é formado pela resistência média aos 3 dias, o segundo pela de 7 dias, o terceiro pela resistência média aos 28 dias e o último pela resistência média aos 91 dias. Já a Figura 4.4 (b) mostra a evolução da resistência à compressão com o tempo. Percebe-se nesta figura que há uma tendência de, aos 3 dias, os concretos de referência e aqueles com metacaulim apresentarem resistências maiores que os demais. Aos 7 dias, é notória a melhor performance dos concretos com metacaulim (nas duas composições estudadas), já que eles passam a apresentar resultados de resistência expressivamente mais altos do que os demais concretos nas duas relações ag/lig. A alta finura e a alta pozolanicidade desse material, em especial do metacaulim MM, explica o efeito fíler e a rápida atividade pozolânica, que impacta os resultados de resistência nas primeiras idades (3 e 7 dias).

De forma geral, nas idades mais avançadas, concretos com adições pozolânicas alcançam resistências mais altas, como verificado no presente trabalho. Isto é explicado pelas reações pozolânicas que, ao consumirem o CH, dão origem a mais C-S-H, além daqueles oriundos da própria hidratação do cimento. Sendo esses produtos mais resistentes e menos solúveis que o hidróxido de cálcio, conseqüentemente as resistências à compressão também serão maiores (NEVILLE, 2016; MEHTA; MONTEIRO, 2014; DAL MOLIN, 2011). Nota-se, ainda, na Figura 4.4 (b), que as resistências apresentam uma tendência indicativa de crescimento, mesmo após os 91 dias, para todos os concretos. A exceção se dá para os concretos com adição do

metacaulim MM, cujas resistências já se apresentam estáveis aos 91 dias (como comentado anteriormente, esta adição é muito fina e mostra alta reatividade já nas primeiras idades).

## 4.2. MÓDULO DE ELASTICIDADE

O módulo de elasticidade foi avaliado em quatro idades diferentes (3, 7, 28 e 91 dias), com o intuito de se observar o comportamento dessa propriedade ao longo do tempo. Para cada idade foram realizadas três medidas (ensaios realizados em triplicata). Depois que se obteve todos os resultados de módulo, procedeu-se ao tratamento estatístico dos dados, como exposto no item 3.8. Cabe ressaltar, também, que os valores de módulo de elasticidade aos 3 e 7 dias, dos concretos de referência, foram obtidos por meio do método de regressão não-linear. Esse procedimento foi necessário, porque não foi possível se obter as medidas nos dias programados. Os valores de módulo das demais idades dos concretos de referência e dos demais concretos não precisaram ser corrigidos. A Tabela 4.5 apresenta um resumo das médias, por idade, do módulo de elasticidade dos diversos concretos estudados.

Tabela 4.5 - Valores médios de módulo de elasticidade para os diversos concretos estudados.

Concretos	Relação ag/lig	Módulo de elasticidade médio - $E_c$ (GPa)			
		3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
REF4	0,4	27,5	30,3	42,7	45,3
SN4		38,5	40,5	48,0	45,5
MM4		43,0	45,5	47,0	48,0
MMX4		39,5	47,1	47,3	39,0
REF6	0,6	21,1	27,7	30,2	43,4
SN6		32,5	34,9	37,5	38,1
MM6		31,1	43,8	43,9	44,1
MMX6		35,5	44,4	46,1	36,9

Os resultados de módulo de elasticidade ressaltaram a influência que as adições minerais, a relação água/ligante e a idade dos concretos exercem sobre essa propriedade.

Nota-se, na Tabela 4.5, que os todos os concretos com relação ag/lig 0,4 apresentaram valores médios de módulo maiores que seus respectivos concretos com relação ag/lig 0,6, para todas as idades analisadas. Ainda na mesma tabela, observa-se que há uma tendência de crescimento do módulo de elasticidade com o aumento da idade. Esse comportamento é observado para praticamente todos os concretos, exceto para os concretos MMX4 e MMX6, os quais aos 91 dias de idade têm módulos menores que os medidos aos 28 dias. Também se percebe que as

adições minerais exercem influência na propriedade analisada, especialmente nas idades mais precoces, quando o ganho do concreto MM4, por exemplo, chega a mais de 50% em relação ao REF4.

A influência das variáveis citadas foi comprovada por meio da análise de variância (ANOVA) realizada com os dados de módulo de elasticidade, levando-se em consideração a influência das adições minerais empregadas, da relação ag/lig e da idade do concreto. Os dados da ANOVA estão apresentados Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Resultado da ANOVA realizada com os dados de módulo de elasticidade, considerando como variáveis independentes a adição mineral, a relação ag/lig e a idade dos concretos.

	SQ	GL	MQ	F <sub>cal</sub>	F <sub>tab</sub>	Resultado
<b>MODELO</b>	128482	1	128482	26321,43	4,016	SIGNIFICATIVO
<b>Adição Mineral</b>	625,7	1	625,7	128,19	4,016	SIGNIFICATIVO
<b>ag/lig</b>	1122,6	3	374,2	76,66	2,773	SIGNIFICATIVO
<b>Idade</b>	1190,8	3	396,9	81,32	2,773	SIGNIFICATIVO
<b>Adição Mineral*ag/lig</b>	51,6	3	17,2	3,53	2,773	SIGNIFICATIVO
<b>Adição Mineral*Idade</b>	50,1	3	16,7	3,42	2,773	SIGNIFICATIVO
<b>ag/lig*Idade</b>	805,1	9	89,5	18,33	2,055	SIGNIFICATIVO
<b>Adição Mineral*ag/lig*Idade</b>	155,4	9	17,3	3,54	2,055	SIGNIFICATIVO
<b>Erro (resíduo)</b>	268,5	55	4,9			
<b>Total</b>	86	4140,1				
			<b>R<sup>2</sup>=0,93</b>			
			<b>R=0,97</b>			

SQ=Soma dos quadrados; GL=Grau de liberdade; MQ=Média dos quadrados;

F=Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos;

R<sup>2</sup>=Coeficiente de determinação do modelo;

R=coeficiente de correlação.

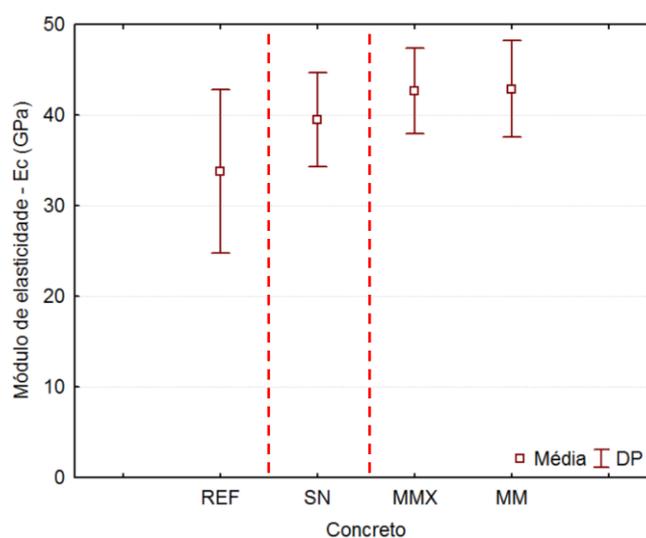
Verifica-se, na Tabela 4.6, que todas as variáveis (relação ag/lig, idade e adição mineral) exerceram um efeito significativo sobre o módulo de elasticidade, para um nível de confiança de 95%. Isso também pode ser observado para as combinações entre essas variáveis, o que evidencia que o efeito que cada variável exerce individualmente sobre o módulo é afetado pelos efeitos individuais das outras duas variáveis (sinergia de comportamento). Ressalta-se, contudo, neste caso, a proeminência do efeito das adições minerais em relação às outras variáveis, já que o parâmetro de Fisher (F<sub>calc</sub>) para as adições minerais foi maior em relação àqueles referentes à relação ag/lig e a idade.

Nos itens subsequentes apresenta-se o efeito que cada variável exerce individualmente no módulo de elasticidade do concreto.

#### 4.2.1. Influência da adição mineral

De igual modo foi verificado o efeito do tipo de adição mineral no módulo de elasticidade do concreto. Como comentado anteriormente, a ANOVA identificou o fator adição mineral como o mais significativo dentre os três avaliados, no que tange o efeito sobre o módulo de elasticidade. A comparação múltipla de médias, por meio do teste de Duncan, apontou a ocorrência de três grupos estatisticamente diferentes, como se pode ver na Figura 4.5.

Figura 4.5 - Gráfico das médias globais de módulo de elasticidade (com seus desvios-padrão) em função das composições com adições minerais, tendo-se nas linhas tracejadas as divisões dos grupos que se diferem estatisticamente.

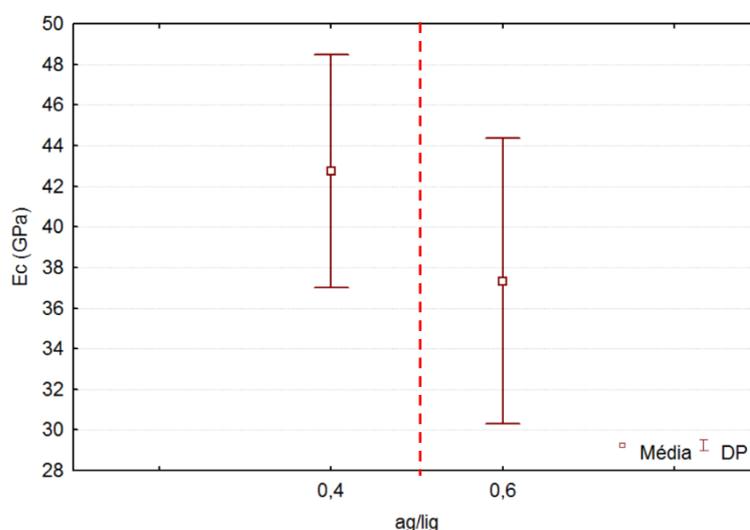


Nota-se que, no caso do módulo de elasticidade, os concretos foram agrupados de maneira levemente diferente da resistência à compressão. A sequência de resultados globais é a mesma, mas o agrupamento de médias mudou. No caso, os concretos REF apresentaram resultados mais baixos de módulo (estatisticamente), seguidos pelos concretos SN e os concretos MM e MMX apresentaram resultados mais altos (e iguais entre si), estatisticamente superiores aos outros dois (ver divisão dos grupos pela linha tracejada na vertical). Ressalta-se que tanto para os resultados de resistência à compressão, quanto para os resultados de módulo de elasticidade, os concretos MM e MMX apresentaram valores superiores aos demais, seguidos pelo concreto SN. Este resultado mostra a alta eficiência das adições minerais, em especial do metacaulim, nas transformações físicas da pasta de cimento em favor das propriedades mecânicas.

### 4.2.2. Influência da relação ag/lig

A Figura 4.6 apresenta um gráfico com os valores médios do módulo de elasticidade de todos os concretos estudados. A linha tracejada indica a separação de grupos estatisticamente semelhantes. Observa-se, então, que os concretos de relação ag/lig igual a 0,4 apresentaram módulo de elasticidade significativamente mais altos, quando comparados aos concretos de relação ag/lig igual a 0,6, conforme esperado.

Figura 4.6 - Gráfico das médias globais de módulo de elasticidade (com desvio padrão) em função da relação água/ligante.



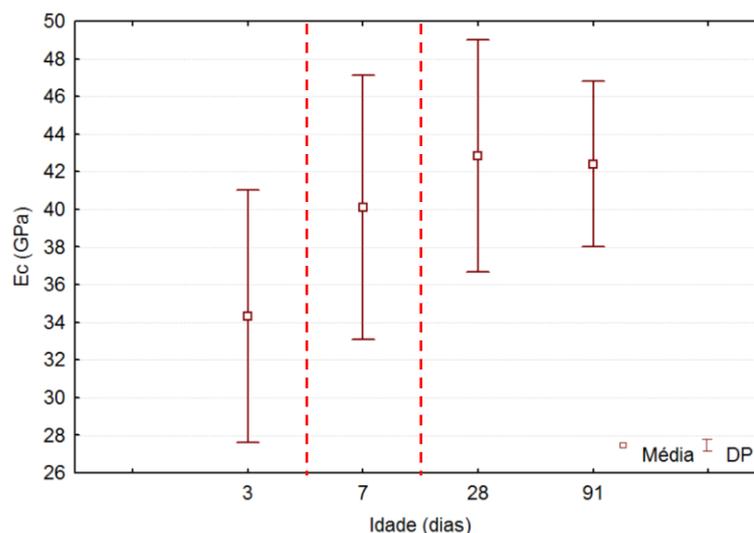
Observa-se que, de fato, a relação ag/lig influenciou de maneira significativa o módulo de elasticidade, como comentado anteriormente. O módulo de elasticidade possui uma relação direta com a porosidade da matriz cimentícia e, portanto, com a relação ag/lig. O módulo de elasticidade expressa uma medida da rigidez dos concretos, o que significa que quanto menor a porosidade, mais compacto e rígido é o concreto, traduzindo isto em maiores valores de módulo. Assim, o comportamento esperado é de que o módulo seja maior para um concreto com relação ag/lig menor (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016).

### 4.2.3. Influência da idade

A Figura 4.7 apresenta o gráfico das médias globais de módulo de elasticidade em função da idade analisada. Nota-se que, conforme esperado, os valores de módulo aos 3 dias foram inferiores aos valores obtidos aos 7 dias, que por sua vez foram inferiores aos valores das idades de 28 e 91 dias. Um dado interessante é que, para o caso do módulo, não houve diferença

significativa entre as idades de 28 e 91, ou seja, nessas idades, os resultados de módulo não são estatisticamente diferentes entre si. Isto reforça o fato de que a consolidação da estrutura interna do concreto em termos de sua rigidez já é alcançada aos 28 dias, mesmo o material possuindo em sua composição as adições minerais de natureza pozolânica.

Figura 4.7 - Gráfico das médias globais de módulo de elasticidade (com seus desvios-padrão) em função da idade analisada. As linhas tracejadas demarcam os grupos que se diferem estatisticamente.



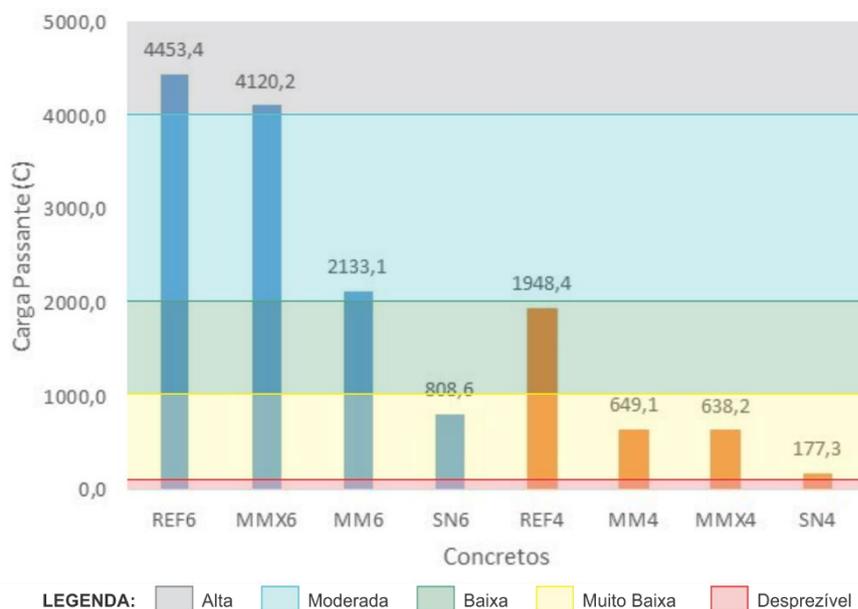
### 4.3. PENETRABILIDADE DE CLORETOS

O ensaio de penetrabilidade de cloretos é um ensaio acelerado que avalia, por meio da carga elétrica passante pela amostra ensaiada, a resistência que o concreto tem em relação à penetração do íon cloro. Tal avaliação dá-se apenas de forma qualitativa, portanto, não fornece resultados que possam avaliar a vida útil dos concretos. Contudo, é um ensaio que possibilita estabelecer algumas considerações sobre as características do concreto e diferenciar concretos entre si, principalmente no que tange à durabilidade.

O ensaio de penetrabilidade de cloretos foi realizado em triplicata e de acordo com a norma ASTM C1202 (ASTM, 2012). Os resultados médios de penetrabilidade de cloretos estão apresentados na Figura 4.8. Nesta figura também é possível observar em qual faixa de classificação cada concreto está inserido, em relação aos critérios de classificação adotado pela ASTM C1202, apresentados na Tabela 3.11. É importante ressaltar que o resultado do ensaio de penetrabilidade de cloretos é a carga passante na amostra ensaiada e a interpretação é a

seguinte: quanto maior o valor da carga passante, maior será a facilidade de penetração dos cloretos no concreto, ou seja, o concreto terá menor resistência à penetração destes íons.

Figura 4.8 - Penetrabilidade de cloretos média dos concretos estudados aos 91 dias e a classificação segundo a norma ASTM C 1202.



Observa-se na Figura 4.8 que os concretos REF6 e MMX6 foram os únicos que apresentaram alta penetrabilidade de cloretos. O concreto MM6 apresentou penetrabilidade moderada, o REF4 apresentou baixa penetrabilidade e os concretos SN6, MM4, MMX4 e SN4 apresentaram penetrabilidade muito baixa. Cabe destacar o comportamento do concreto SN4, que obteve carga passante que se aproximou bastante da faixa negligenciável (desprezível) e foi, dentre todos os concretos, o de maior resistência à penetração de cloretos. Ressalta-se que a carga passante deste concreto foi 25 vezes menor que a carga passante do concreto REF6 (pior concreto), o que mostra o quanto as adições minerais são benéficas ao concreto no que tange à resistência aos íons cloro.

Cabe destacar que todos os concretos com adições minerais obtiveram desempenho superior ao alcançado pelos concretos de referência, sendo que, para a relação ag/lig 0,6, o concreto SN6 apresentou carga passante 81,84% menor que o concreto REF6 e, para a relação ag/lig 0,4 (SN4), essa diferença foi ainda mais acentuada: 90,9% menor em relação ao concreto REF4. Ainda na Figura 4.8, nota-se que há uma diferença significativa entre os resultados obtidos para as duas relações ag/lig. Em geral, os resultados de carga passante para os concretos de relação ag/lig 0,6 apresentaram-se maiores que os resultados dos concretos de relação ag/lig 0,4. Por exemplo, o valor da carga passante do concreto REF6 foi de 4453,4 C, enquanto que para o

concreto REF4, a carga passante foi de 1948,4 C, ou seja, o concreto referência 0,6 teve um valor de carga passante aproximadamente 128% maior que a carga passante do referência 0,4. A Tabela 4.7 apresenta uma comparação entre os valores de carga passante dos concretos de relação ag/lig 0,6 em relação aos de relação ag/lig 0,4.

Tabela 4.7 - Comparação dos valores de carga passante dos concretos de relação ag/lig =0,6 em relação aos de relação ag/lig = 0,4.

Concreto	ag/lig $\frac{0,6}{0,4}$ (%)
REF	128,6
SN	356,1
MM	228,6
MMX	545,6

Conclui-se na Tabela 4.7 que os concretos com relação ag/lig 0,4 foram notadamente mais resistentes à penetração de cloretos que seus pares com relação ag/lig 0,6, sendo esse desempenho ainda mais acentuado nos concretos com adição mineral, o que reforça sobremaneira a influência que a relação ag/lig exerce na durabilidade dos concretos. Quando se observa apenas os concretos com adição mineral, nota-se que a carga passante no concreto MMX6 é aproximadamente 545% maior que o mesmo concreto na relação ag/lig 0,4, o que significa uma enorme diferença de desempenho quanto à penetração de cloretos.

Esse comportamento superior dos concretos com adição mineral em relação aos concretos de referência pode ser explicado, basicamente, por dois motivos: o primeiro é relacionado ao efeito fíler e o segundo diz respeito às reações pozolânicas, ambos os casos promovendo uma densificação da pasta de cimento, com refinamento de poros e redução da interconexão desses poros (o que dificulta o transporte de cloretos) Ademais, existe também as particularidades de cada adição mineral, que serão explicadas no item 4.3.1.2.

#### **4.3.1. Efeito da relação ag/lig e das adições minerais na penetrabilidade de cloretos**

Para avaliar melhor o efeito da relação ag/lig e das adições minerais sobre a penetrabilidade de cloretos, os resultados individuais dos concretos foram submetidos à análise de variância ANOVA. O resultado da análise estatística está apresentado na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Resultado da ANOVA realizada com os dados do ensaio de penetrabilidade de cloretos.

	SQ	GL	MQ	F <sub>cal</sub>	F <sub>tab</sub>	Resultado
<b>MODELO</b>	78654892,7	1	78654892,7	782,215	4,543	SIGNIFICATIVO
<b>Adição Mineral</b>	24651710,9	3	8217237,0	81,720	3,287	SIGNIFICATIVO
<b>Relação ag/lig</b>	23169311,3	1	23169311,3	230,416	4,543	SIGNIFICATIVO
<b>Adição Mineral*Relação ag/lig</b>	6789516,9	3	2263172,3	22,507	3,287	SIGNIFICATIVO
<b>Erro (resíduo)</b>	1508311,4	15	100554,1			
<b>Total</b>	56399218,5	22				
			<b>R<sup>2</sup>=0,97</b>			
			<b>R=0,99</b>			

SQ=Soma dos quadrados; GL=Grau de liberdade; MQ=Média dos quadrados;

F=Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos;

R<sup>2</sup>=Coeficiente de determinação do modelo;

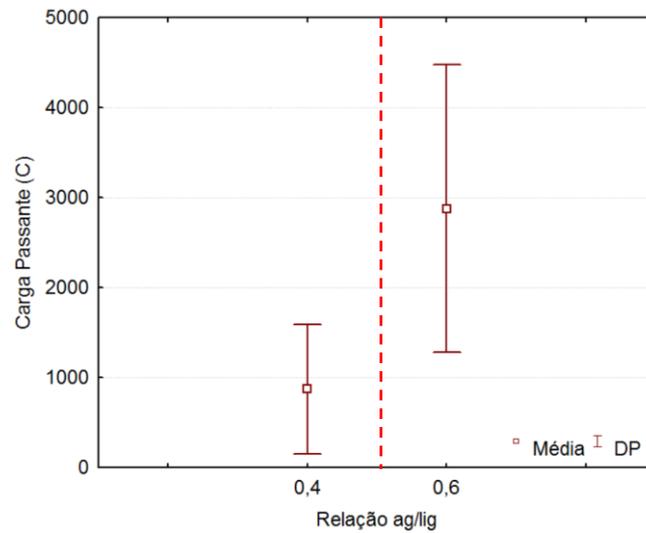
R=coeficiente de correlação.

O modelo da análise de variância foi significativo, com coeficiente de determinação igual a 0,99. Dos resultados, tem-se que todas as variáveis são estatisticamente significativas ( $F_{cal} > F_{tab}$ ), para um nível de confiança de 95%. Ou seja, todas as variáveis exercem influência significativa nos resultados de penetrabilidade de cloretos, sendo a relação ag/lig o fator mais influente. A interação entre as duas variáveis é igualmente significativa, denotando haver sinergia entre elas. Em outras palavras, o efeito que a relação ag/lig exerce sobre a penetrabilidade de cloretos é alterado pelo tipo de adição mineral e vice-versa. Essa influência das variáveis é apresentada mais detalhadamente a seguir.

#### 4.3.1.1. Influência da relação ag/lig

O efeito da relação água/ligante na penetrabilidade de cloretos foi significativo, segundo a análise de variância. Com base na comparação múltipla de médias (teste de Duncan), o gráfico da Figura 4.9 apresenta as médias globais, para as duas situações: relações ag/lig iguais a 0,40 e 0,60, bem como a separação dos grupos que estatisticamente são diferentes (ver linha tracejada em vermelho separando os grupos).

Figura 4.9 - Gráfico das médias globais de carga passante no ensaio de penetrabilidade de cloretos (com seus desvios-padrão) em função da relação ag/lig.

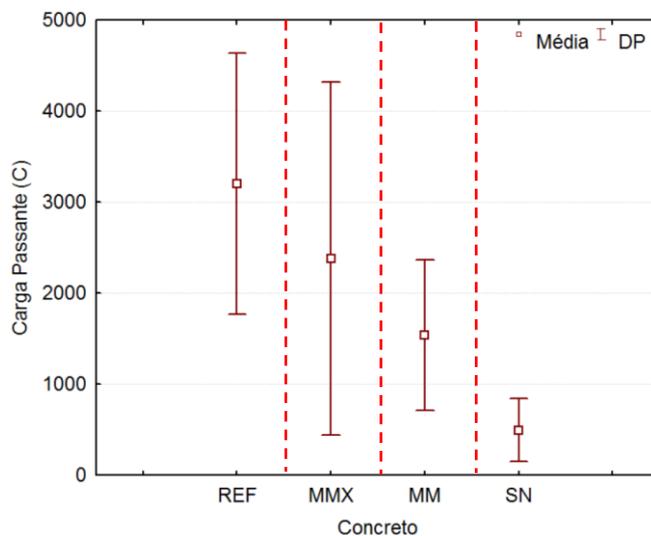


Observa-se que, como esperado e em conformidade com os resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade, os concretos com relação ag/lig igual a 0,4 apresentaram menores valores de carga passante quando comparados aos concretos de relação ag/lig igual a 0,6. Por apresentarem uma rede de poros maiores e mais interconectados, os concretos de relação ag/lig 0,6 permitem mais facilmente a passagem dos íons cloro.

#### 4.3.1.2. Influência da adição mineral

A Figura 4.10 apresenta o gráfico das médias globais da carga passante, em Coulombs, em função do tipo de adição mineral utilizado. A linha tracejada indica a separação estatística dos grupos, obtida por meio do teste de Duncan.

Figura 4.10 - Gráfico das médias globais de carga passante no ensaio de penetrabilidade de cloretos (com seus desvios-padrão) em função das composições com adições minerais.



Observa-se que houve a formação de quatro grupos estatisticamente diferentes (com base na comparação múltipla de médias), um para cada tipo de concreto com adição mineral. Como esperado, o concreto de referência apresentou maior carga passante no ensaio de penetrabilidade de cloretos, seguido dos concretos MMX e MM e, por último, o concreto com adição de sílica ativa e nanossílica (SN), o qual apresentou menor carga passante e, também, menor desvio padrão dos dados.

Os concretos com metacaulim, além de proporcionarem os efeitos benéficos que são comuns às adições minerais em geral (efeito fíler e reações pozolânicas), podem também proporcionar um efeito complementar. Tal efeito está relacionado à capacidade que os metacaulins têm de reagirem quimicamente com os cloretos (fixar cloretos) e formarem sal de *Friedel*. Isso reduz a quantidade de cloretos livres na rede de poros do concreto e, conseqüentemente, reduz a penetrabilidade destes íons. Embora seja possível ou provável esse mecanismo, como levantado por Teodoro (2016), é necessário, contudo, a sua comprovação, não tendo sido ele verificado no presente trabalho (por não se constituir um objetivo da pesquisa). Cabe, no entanto, sua consideração como um potencial mecanismo de ação, no campo das hipóteses.

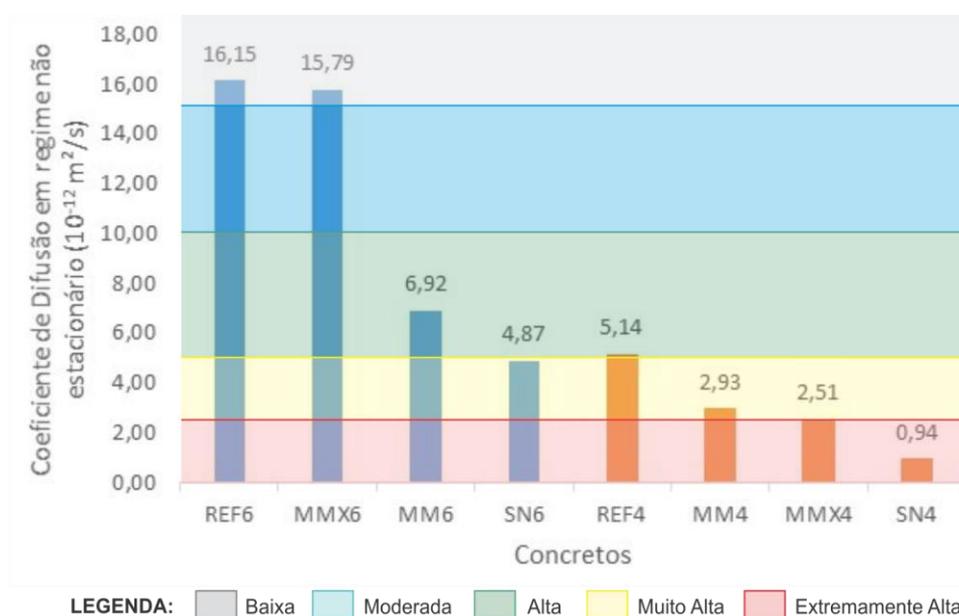
Em relação à sílica ativa e à nanossílica, verificou-se que este sistema proporcionou um desempenho superior aos concretos, o que pode ser devido à granulometria contínua ou à efetiva gradação das partículas finas, formada quando da composição destas duas adições minerais, o que provavelmente aumentou a capacidade de preenchimento dos poros (aumentou a

compacidade da pasta de cimento) e reduziu a interconectividade desses poros, ou seja, conseguiu-se efetivamente refinar o sistema de poros, bloqueando assim o caminho dos íons.

#### 4.4. DIFUSÃO DE CLORETOS

Diferentemente do ensaio de penetrabilidade de cloretos (ensaio acelerado), o ensaio de difusão de cloretos no regime não estacionário fornece como resultado o coeficiente de difusão/migração em estado não estacionário ( $D_{nssm}$ ). Este resultado está intimamente ligado ao mecanismo de transporte de cloretos e, portanto, à durabilidade do concreto, possibilitando, assim, uma avaliação mais diretamente associada à penetração real dos cloretos no concreto, ou seja, trata-se de uma avaliação mais quantitativa e menos qualitativa ou comparativa. Os resultados médios obtidos do  $D_{nssm}$  encontram-se na Figura 4.11. Nela, observa-se, também, a marcação relativa à classificação do concreto quanto à resistência à penetração do cloreto, proposta por Ngo e Gjörv (1998, *apud* GJØRV, 2015), apresentada na Tabela 3.12. É importante ressaltar que quanto maior o coeficiente de difusão de cloretos, menor a resistência que o concreto tem à penetração destes íons.

Figura 4.11 - Resultados médios do coeficiente de difusão/migração de cloretos no estado não estacionário em função do tipo de adição mineral empregado aos 91 dias.



Observa-se que, seguindo o mesmo padrão dos resultados do ensaio de penetrabilidade de cloretos, para uma mesma relação ag/lig, todos os concretos com adições minerais obtiveram desempenho superior ao alcançado pelos concretos de referência, sendo que para a relação

ag/lig 0,6, o concreto SN6 apresentou coeficiente de difusão 57,15% menor que o concreto REF6 e para a relação ag/lig 0,4 (SN4) essa diferença foi ainda mais acentuada: 81,71% menor em relação ao concreto REF4. Isto reforça a influência tanto da relação ag/lig quanto da presença de adições minerais nessa propriedade.

A influência da relação ag/lig nas dosagens dos concretos fica evidenciada, por exemplo, quando se analisa o concreto de composição ternária com metacaulim (MM+MX), em que se nota, pelos dados da Figura 4.11, que o concreto MMX6 apresentou coeficiente de difusão de cloretos 528% maior que o MMX4.

O efeito benéfico da incorporação de adições minerais pozolânicas em relação à difusão de cloretos pode ser explicado pela alteração na estrutura porosa do concreto, pela alteração na condutividade elétrica do concreto e por uma eventual fixação dos íons cloro por compostos hidratados resultantes das reações pozolânicas. Provavelmente tem-se, nos concretos com adições minerais, uma alteração física considerável da pasta de cimento, com refinamento de poros e com a obtenção de um sistema de poros menos interconectados e mais tortuosos (OLLIVIER; TORRENTI, 2014). Dessa forma, os cloretos encontram maior dificuldade para avançar dentro do concreto.

Quanto aos critérios apresentados de resistência à penetração de cloretos, na relação ag/lig 0,40 apenas o concreto com adição combinada de sílica ativa e nanossílica se situou na melhor condição de classificação, ou seja, resistência extremamente alta à penetração dos íons cloro. Os concretos com metacaulim (MMX4 e MM4) classificaram-se como sendo de resistência muito alta (segundo nível da classificação) e, por último, o concreto de referência enquadrou-se no terceiro nível da classificação, apresentando, portanto, alta resistência à penetração de cloretos. Na relação ag/lig 0,60, o concreto SN6 situa-se no segundo melhor nível (resistência muito alta aos cloretos), enquanto que o concreto MM6 passa para o terceiro nível da classificação, apresentando moderada resistência à penetração de cloretos. Por fim, os concretos MMX6 e REF6 se enquadram no pior nível da classificação, ou seja, baixa resistência à penetração de cloretos.

#### 4.4.1. Efeito da relação ag/lig e das adições minerais na difusão de cloretos

Para avaliar melhor o efeito da relação ag/lig e das adições minerais sobre a difusão de cloretos, os resultados individuais dos concretos foram submetidos à análise de variância ANOVA. O resultado na análise estatística está apresentado na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Análise de variância (ANOVA) para os dados de coeficiente de difusão/migração de cloretos no estado não estacionário.

	SQ	GL	MQ	F <sub>cal</sub>	F <sub>tab</sub>	Resultado
<b>MODELO</b>	964,092	1	964,092	8748,758	4,667	SIGNIFICATIVO
<b>Adição Mineral</b>	191,44	3	63,813	579,081	3,411	SIGNIFICATIVO
<b>Relação ag/lig</b>	327,669	1	327,669	2973,468	4,667	SIGNIFICATIVO
<b>Adição Mineral*Relação ag/lig</b>	88,04	3	29,347	266,309	3,411	SIGNIFICATIVO
<b>Erro (resíduo)</b>	1,433	13	0,11			
<b>Total</b>	521,543	20				
			<b>R<sup>2</sup>=0,99</b>			
			<b>R=0,99</b>			

SQ=Soma dos quadrados; GL=Grau de liberdade; MQ=Média dos quadrados;

F=Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos;

R<sup>2</sup>=Coeficiente de determinação do modelo;

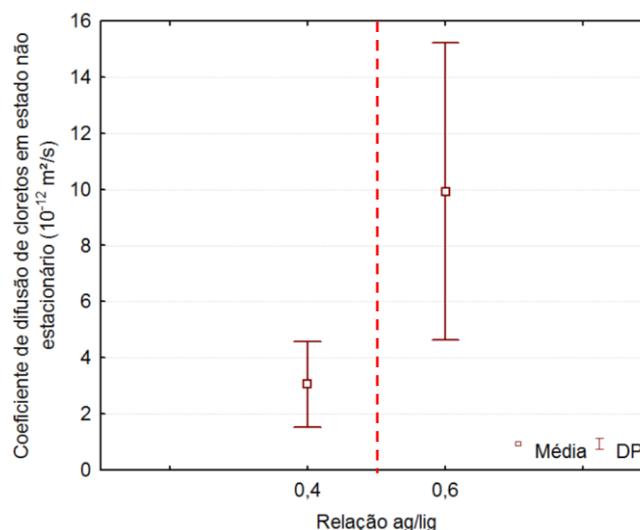
R=coeficiente de correlação.

A análise de variância mostrou que o modelo possui significância estatística, com coeficiente de determinação alto, igual a 0,99. Ou seja, 99% das alterações nos resultados de migração de cloretos podem ser explicadas pelos efeitos avaliados pelo modelo estatístico, a saber: tipo de adição mineral e relação ag/lig. Sendo a interação das duas variáveis também significativa, então o efeito que a relação ag/lig exerce no coeficiente de difusão/migração de cloretos é alterado pelo tipo de concreto e vice-versa.

##### 4.4.1.1. Influência da relação ag/lig

A análise de variância mostrou que o efeito da relação ag/lig no modelo considerado é bastante significativo. Na Figura 4.12 apresentam-se as médias globais, para as duas situações: relações ag/lig iguais a 0,40 e 0,60, sendo que as linhas tracejadas vermelhas representam a segregação em grupos estatisticamente diferentes.

Figura 4.12 - Gráfico das médias globais do coeficiente de difusão de cloretos em estado não estacionário (com seus desvios-padrão) em função da relação ag/lig.

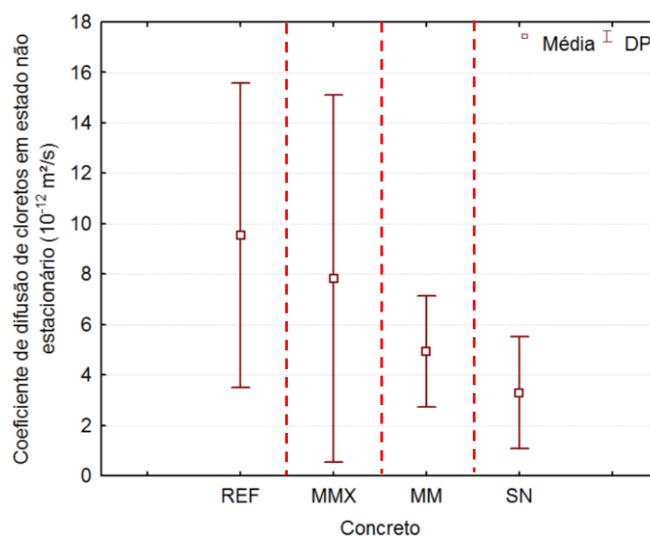


Nota-se que nos concretos com menor relação água/ligante o coeficiente de difusão/migração de cloretos no regime não estacionário foi muito menor, ou seja, a migração ocorreu de forma mais lenta. Pela ANOVA, o efeito da relação ag/lig foi consideravelmente mais significativo do que o efeito do tipo de adição mineral (ver os valores respectivos de  $F_{\text{calc}}$ ), porém fica claro, pela Figura 4.11, que quem estão sendo determinantes para esse resultado são os concretos de referência e aqueles com a mescla de metacaulins (MMX), uma vez que a diferença no valor de  $D_{\text{nss}}$  entre as duas relações ag/lig é extremamente acentuada para essas duas situações.

#### 4.4.1.2. Influência da adição mineral

Os resultados de migração/difusão de cloretos também foram avaliados por comparação múltipla de médias considerando-se o efeito do tipo de adição mineral, com vistas à verificação dos grupos formados, que se diferem estatisticamente. Na Figura 4.13 são apresentados os resultados dessa análise, sendo que a separação em grupos estatisticamente diferentes está demarcada pelas linhas tracejadas vermelhas.

Figura 4.13 - Gráfico das médias globais do coeficiente de difusão de cloretos em estado não estacionário (com seus desvios-padrão) em função das composições com adições minerais.



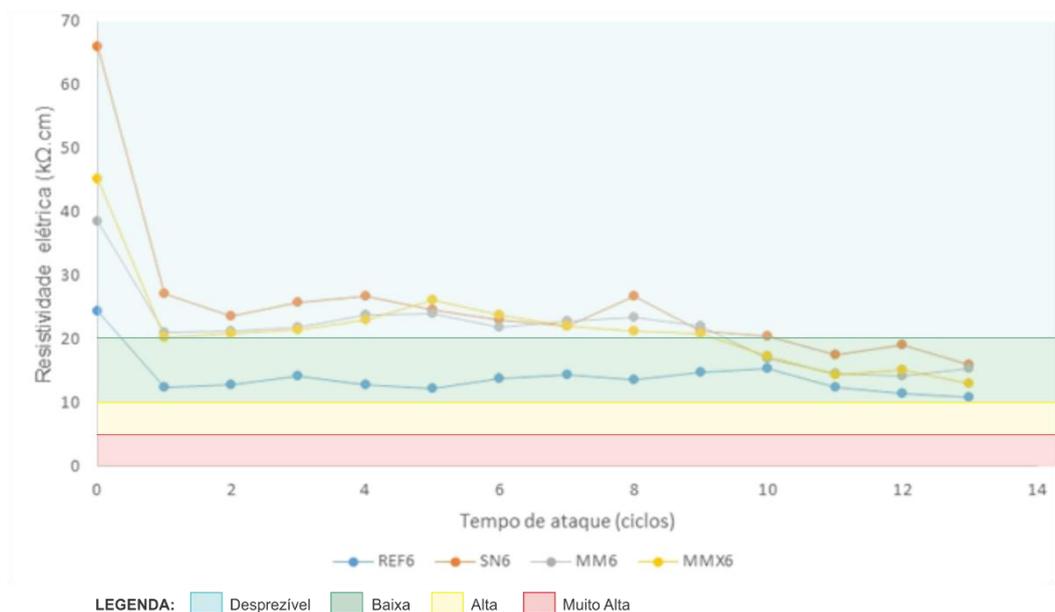
Observa-se a formação de quatro grupos estatisticamente diferentes entre si, sendo que os concretos com adição combinada de sílica ativa e nanossílica apresentaram o melhor resultado frente ao ataque por cloretos. Na sequência apresentam-se os concretos com adição de Metacaulim MAX (MM), seguido dos concretos com adição combinada de Metacaulim MAX + XW (MMX) e, por último, apresenta-se o concreto de referência, como esperado, apresentando elevado valor do coeficiente de difusão médio global.

As melhorias alcançadas pelos concretos com adições minerais, em relação à difusão de cloretos são devidas aos mesmos fatores da penetrabilidade de cloretos, quais sejam: efeito fíler, reações pozolânicas e as particularidades de cada adição mineral citadas no item 4.3.1.2.

#### 4.5. RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL DO CONCRETO

Os resultados do monitoramento da resistividade elétrica superficial dos concretos submetidos aos ciclos de cloretos são apresentados a seguir. Os valores de resistividade elétrica registrados ao longo do tempo de ataque (13 ciclos que correspondem a 91 dias) são aqueles medidos ao final do período de imersão dos ciclos de indução da corrosão, quando os corpos de prova se encontravam saturados (cada ponto no gráfico representa uma média de 5 valores). Na Figura 4.14 apresentam-se os resultados de resistividade elétrica em função do tempo para os concretos com relação ag/lig igual a 0,6, juntamente com a classificação proposta pelo CEB 192 (1989) para essa propriedade (apresentada anteriormente na Tabela 2.5).

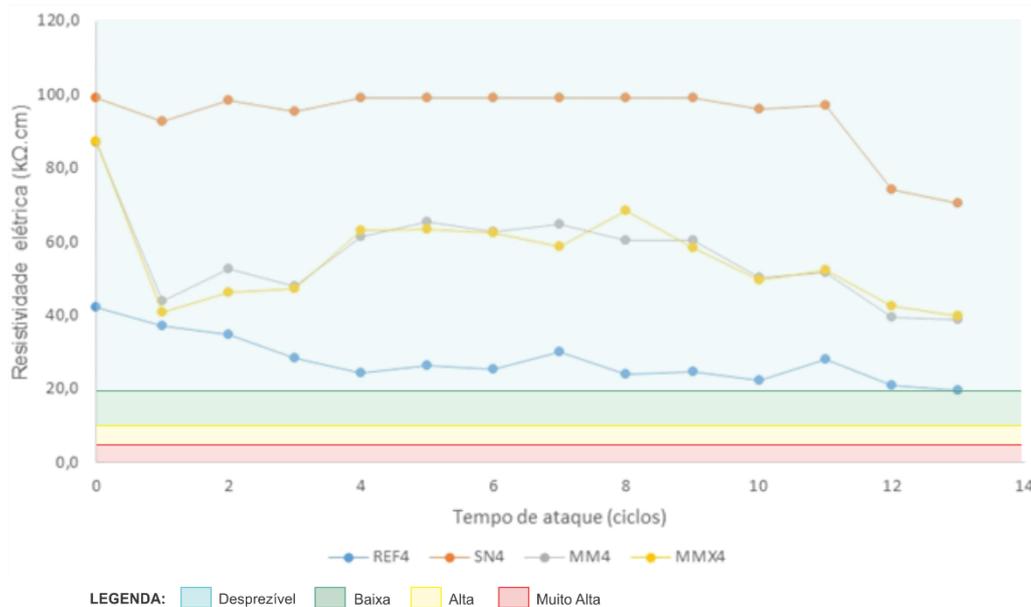
Figura 4.14 - Resistividade elétrica em função do tempo para os concretos de relação ag/lig igual a 0,6.



Observa-se que o concreto com adição combinada de sílica ativa e nanossílica (SN6) apresentou maiores valores de resistividade elétrica superficial após todos os ciclos de indução da corrosão, mantendo-se na faixa de probabilidade de corrosão desprezível até o décimo ciclo. Os concretos com metacaulim, MM6 e MMX6, apresentaram desempenho muito parecidos e bem superior ao concreto de referência, com as curvas próximas ao SN6. Já o REF6 apresentou o pior desempenho entre todos, mantendo-se dentro da faixa de baixa indicação da probabilidade de corrosão desde o segundo ciclo até o final (terminando muito próximo do limite para a indicação de alta probabilidade de corrosão do CEB).

Na Figura 4.15 apresentam-se os resultados de resistividade em função do tempo para os concretos de relação ag/lig igual a 0,4, com as respectivas faixas de probabilidade de corrosão determinadas pelo CEB 192 (1989).

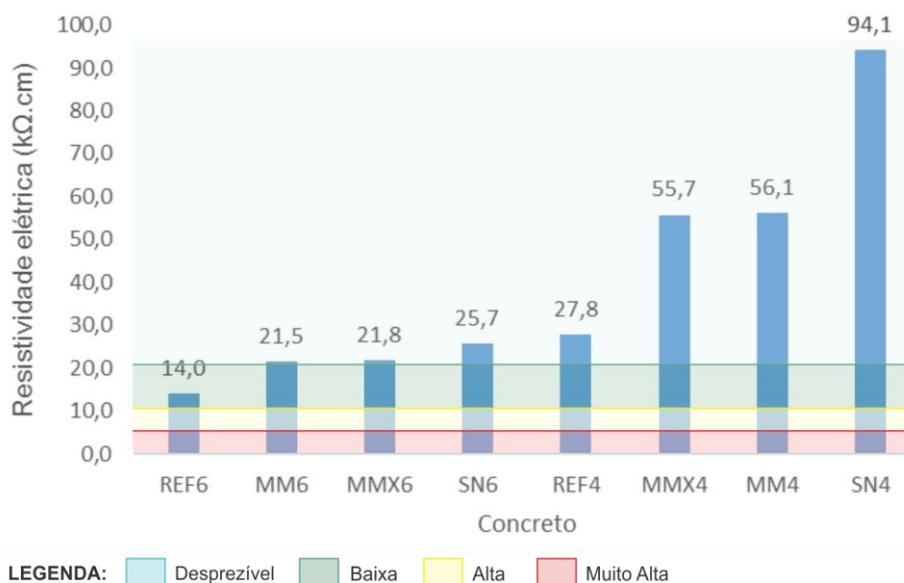
Figura 4.15 - Resistividade elétrica em função do tempo para os concretos com relação ag/lig igual a 0,4.



Já para a relação ag/lig 0,4 observa-se a mesma tendência comparativa de comportamento entre os concretos, mas em função da ação combinada da relação ag/lig e da adição mineral, é possível ver a nítida distinção de comportamento. O concreto SN4 apresentou desempenho bastante superior aos demais, tendo mantido a resistividade de 99 kΩ.cm, que corresponde ao maior valor medido, ao longo de aproximadamente 12 ciclos, seguido pelos concretos MM4 e MMX4 (cujas curvas se mantêm muito próximas e com elevada performance) e, por último, tem-se o concreto REF4, porém todos os traços estudados permaneceram na faixa de probabilidade de corrosão desprezível no decorrer dos 13 ciclos de indução da corrosão (o concreto REF4 atinge o limite de mudança de critério, para baixa probabilidade de corrosão, em sua última medida).

Ao final dos 13 ciclos de indução da corrosão foram avaliadas as resistividades elétricas superficiais médias de cada concreto estudado. Os resultados dessa análise estão apresentados na Figura 4.16.

Figura 4.16 - Resistividade elétrica média após os 13 ciclos de indução da corrosão em solução de cloretos.



Como pode ser observado, os concretos com relação ag/lig 0,6 apresentaram pior desempenho em relação à resistividade elétrica superficial quando comparados aos concretos de relação ag/lig 0,4, como esperado. Outrossim, ressalta-se a significativa capacidade das adições minerais de manter os concretos em patamares bastante elevados de resistividade, principalmente na menor relação ag/lig, a despeito da situação muito desfavorável de ataque. É preciso destacar que o ensaio de molhagem e secagem em solução com alto teor de cloretos representa uma situação muito severa de ataque, na qual se tende a evoluir rapidamente para valores muito baixos de resistividade do concreto (os sais, em especial o cloreto de sódio, possuem alto poder de aumentar a condutividade de soluções ou de meios aquosos). Nesse sentido, destacam-se os resultados dos concretos com adições minerais, especialmente do concreto com sílica ativa e nanossílica na relação ag/lig 0,4 (SN4), que apresentou resistividade elétrica 238% maior que o REF4 e cerca de 68% maior que a média dos concretos com adição de metacaulim (MMX4 e MM4).

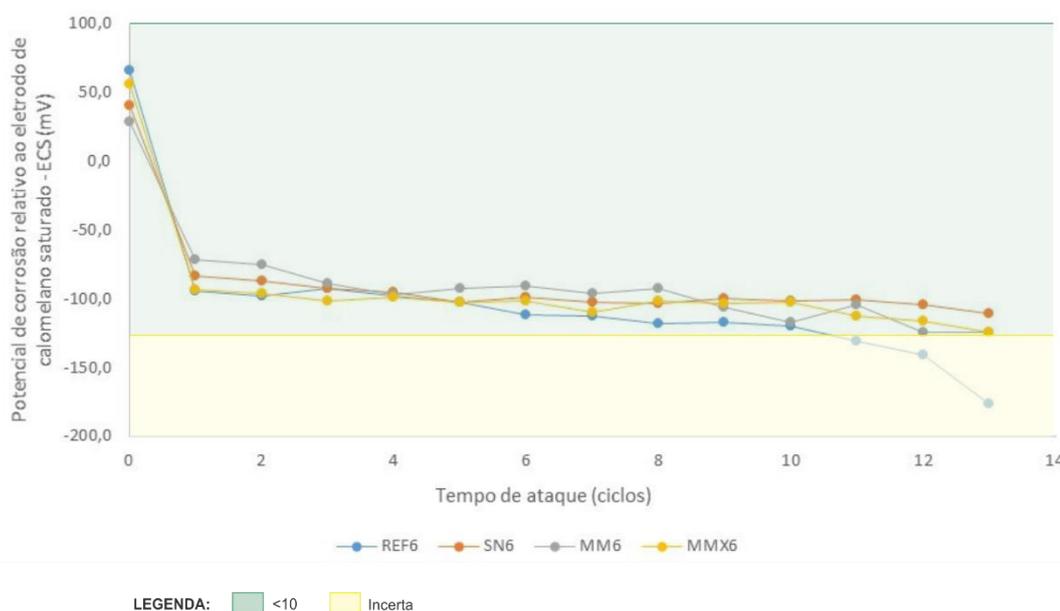
A redução da porosidade e da interconexão de poros nos concretos com adições minerais gera uma barreira física à passagem de corrente elétrica, sendo este um argumento importante de respaldo aos resultados obtidos. No entanto, as alterações geradas na condutividade da solução aquosa dos poros desses concretos com adições minerais, devidas ao consumo de íons, principalmente  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{OH}^-$ , pelas reações pozolânicas, têm sido um ponto de argumentação muito consistente para explicar as altas resistividades desses concretos (RIBEIRO; CUNHA, 2014; TEODORO 2016).

## 4.6. POTENCIAL DE CORROSÃO

A técnica eletroquímica de determinação do potencial de corrosão tem se apresentado como um instrumento confiável de monitoramento da corrosão das armaduras. Para avaliar os concretos quanto ao potencial de corrosão foram empregados os critérios de probabilidade sugeridos pela ASTM C 876/1991 (ASTM, 2003), conforme apresentado anteriormente na Tabela 3.13. Cada ponto nos gráficos a seguir (Figura 4.17 e Figura 4.18) representa uma média de 4 valores de potencial de corrosão, como descrito no Capítulo 3.

A Figura 4.17 apresenta as medidas de potencial de corrosão monitoradas ao longo do tempo de ataque para os concretos de relação ag/lig igual a 0,6. As diferentes faixas de cor representam a classificação de probabilidade de corrosão citada anteriormente.

Figura 4.17 - Potencial de corrosão em função do tempo para os concretos com relação ag/lig igual a 0,6.

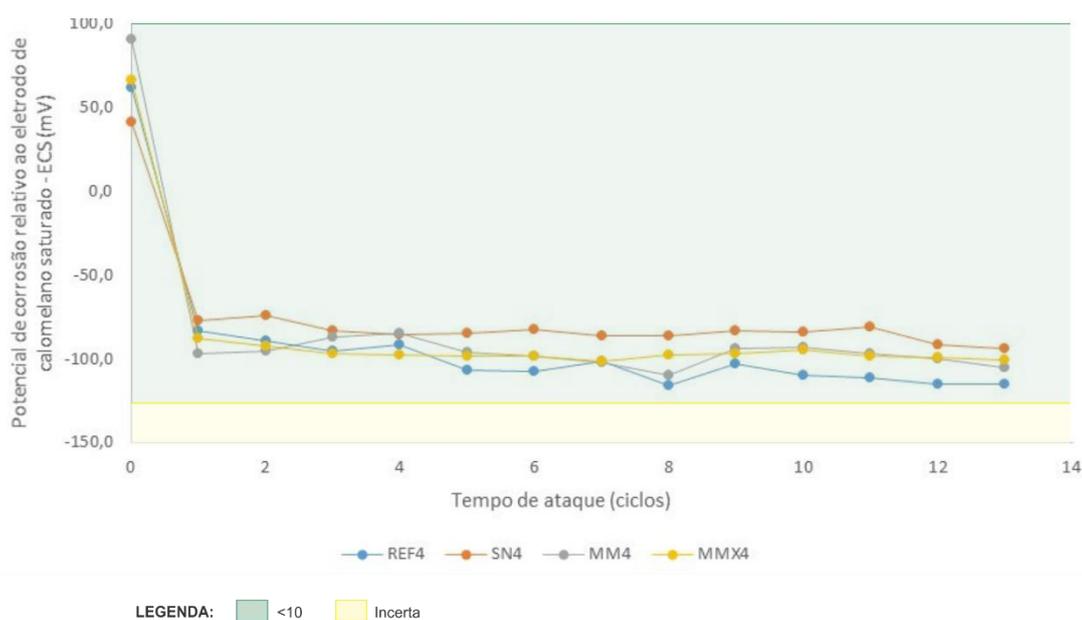


Observa-se que os resultados obtidos se mantiveram muito próximos ao longo do tempo aproximadamente até o 11º ciclo de ataque. Os valores de potencial de corrosão antes dos concretos serem submetidos aos ciclos de ataque foram todos positivos, o que indica que a probabilidade de corrosão é menor que 10%, ou seja, havia passividade plena das armaduras. A partir do 11º ciclo nota-se que o concreto de referência (REF6) passa para a faixa de probabilidade de corrosão incerta, enquanto os demais concretos permanecem com probabilidade de corrosão inferior a 10%. Este comportamento do REF6 pode estar indicando uma alteração das condições da interface do aço nesse concreto, com alguma perturbação do sistema passivo em meio aos cloretos presentes.

Já a Figura 4.18 apresenta as medidas de potencial de corrosão monitoradas ao longo do tempo de ataque para os concretos de relação ag/lig igual a 0,4. Para essa relação ag/lig, observa-se que todos os concretos se mantiveram na faixa de probabilidade de corrosão inferior a 10%, o que ressalta a importância desse parâmetro para essa propriedade. Apesar desse resultado global “igual” entre os 4 concretos com adições minerais, percebe-se a curva do concreto SN4 percorrendo os ciclos com valores menos eletronegativos do que aqueles do concreto REF4, estando os concretos com metacaulim (MM4 e MMX4) em posição intermediária. Isto é reflexo das variações da resistividade dos concretos, interferindo nos valores de potenciais, sendo bastante coerente com os próprios resultados de resistividade, assim como com os resultados do transporte de cloretos (penetrabilidade e coeficiente de difusão/migração).

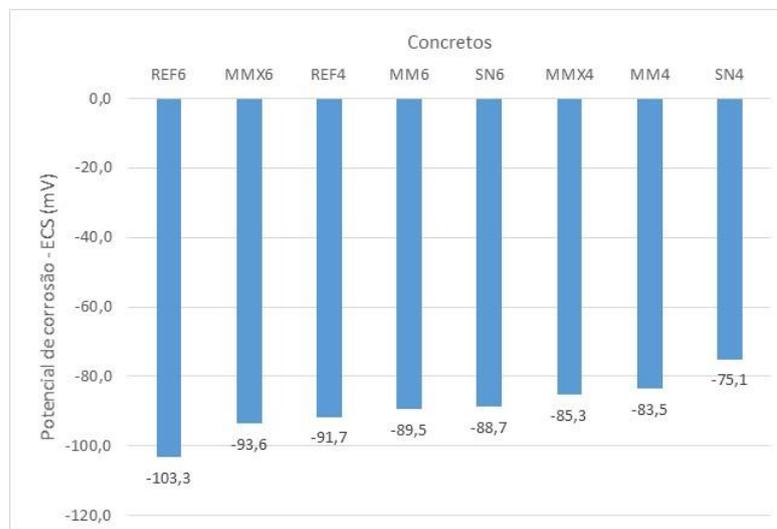
Ao se analisar os dois gráficos de potenciais de corrosão ao longo do tempo de ataque (Figura 4.17 e Figura 4.18), é possível ver uma queda inicial substancial entre a primeira e a segunda medida, ou seja, entre a medida inicial (antes do ataque) e a medida do primeiro ciclo. Isto se deve à interferência da resistividade do sistema nos valores de potencial, como discutido por Cascudo (1997). Como na medida inicial, os concretos não tinham contaminação de cloretos, então a resistividade do sistema era bastante alta. Ocorrendo a contaminação, há uma alteração brusca da resistividade, o que altera os valores de potencial, que caem bem (numa primeira instância), mas ainda assim se mantêm em patamares relativamente elevados, haja vista as armaduras permanecerem passivas.

Figura 4.18 - Potencial de corrosão em função do tempo para os concretos com relação ag/lig igual a 0,4.



Ao final dos 13 ciclos de indução da corrosão, foram avaliados os potenciais de corrosão médios dos concretos estudados. Os resultados dessa análise estão apresentados na Figura 4.19.

Figura 4.19 - Potencial de corrosão após os 13 ciclos de indução em solução de cloretos.



Observa-se que, ao se analisar os resultados médios de potencial de corrosão, após os 13 ciclos de indução, todos os concretos estudados se mantiveram com valores mais eletropositivos que  $-126$  mV, ou seja, na faixa de menos de 10% de probabilidade de corrosão. Destaca-se o concreto SN4, o qual apresentou o potencial médio menos eletronegativo dentre todos os concretos estudados, resultado este que vai ao encontro dos resultados de resistividade elétrica superficial do concreto, evidenciando a qualidade superior dos concretos com adição combinada de sílica ativa e nanossílica, principalmente em relações ag/lig baixas. Esses concretos com adições minerais apresentam sistemas contendo impedâncias globais mais elevadas, o que dificulta todo e qualquer mecanismo de transporte ou transferência de cargas elétricas no concreto. Em suma, são sistemas que projetam concretos com durabilidade potencial mais elevada.

#### 4.7. DISCUSSÃO GLOBAL DOS RESULTADOS

A influência da relação ag/lig apresentou-se significativa em todas as propriedades avaliadas, em algumas de forma mais acentuada e em outras menos acentuada. Foram constatadas diferenças relevantes entre os concretos de relação ag/lig 0,6 e 0,4 em todos os ensaios realizados, exceto o ensaio de potencial de corrosão que apresentou valores não muito discrepantes entre os concretos estudados. Contudo, como a técnica de potenciais de corrosão

avalia diretamente a corrosão do aço (e não propriedades do concreto) e, tendo em vista que o tempo de ataque não foi suficiente para levar as armaduras à corrosão, então esse efeito da relação ag/lig não ficou comprovado nesta análise. De modo geral, ficou evidenciado que a redução da relação ag/lig logra melhorias às propriedades do concreto, principalmente àquelas ligadas à durabilidade. Isso ocorre, entre outras razões, devido às alterações no sistema dos poros do concreto, conforme discutido por Teodoro (2016) e Malagoni (2016).

Com relação às adições minerais, também ficou evidenciado que as adições utilizadas neste trabalho (misturas ternárias de sílica ativa com nanossílica e de dois tipos de metacaulim, além de uma mistura binária contendo um tipo de metacaulim) alteraram consideravelmente as propriedades mecânicas, bem como às ligadas à durabilidade do concreto e também o desempenho em relação à corrosão das armaduras.

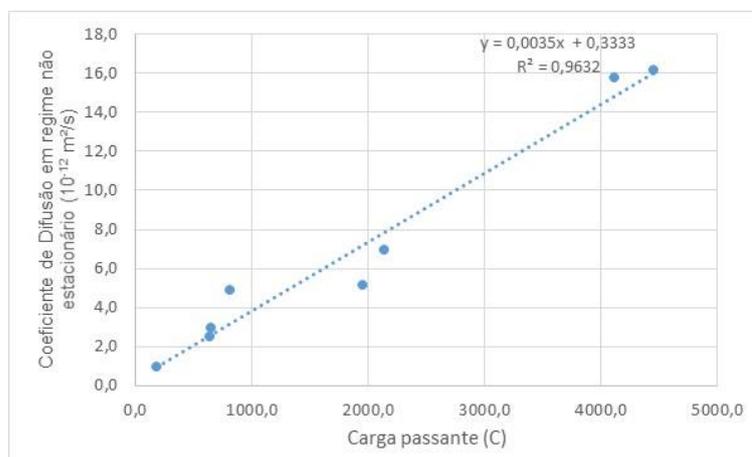
Em linhas gerais, em relação à resistência à compressão, a contribuição das adições minerais é notável. Isso ocorre devido à capacidade desses materiais em alterar fisicamente a pasta de cimento, reduzindo a porosidade (com densificação da pasta de cimento) e, principalmente, propiciando melhorias consideráveis na zona de transição pasta-agregado. Vale destacar que essa contribuição foi mais perceptível nos concretos de relação ag/lig 0,6. Ressalta-se que para os resultados de resistência à compressão, os concretos MMX e MM apresentaram valores médios superiores aos demais, seguidos pelo concreto SN e, por último, pelo concreto REF. Esses resultados são mais influenciados estatisticamente pela relação ag/lig, conforme pode ser observado pelo valor do parâmetro  $F_{\text{calculado}}$ , no item 4.1, seguido pelos parâmetros idade e tipo de adição mineral.

O módulo de elasticidade é mais influenciado pelo parâmetro tipo de adição mineral empregado, seguido pela idade e, por último, pela relação água/ligante. Em relação ao tipo de adição mineral, os concretos com incorporação de metacaulim (MM e MMX) apresentaram maiores valores de módulo, seguidos pelos concretos SN e, por fim, pelos concretos de referência.

Em relação às propriedades de transporte de cloretos no concreto, verificou-se estatisticamente a notável contribuição tanto da relação ag/lig, quanto das adições minerais. Por meio da ANOVA, ficou estatisticamente evidenciado que a relação ag/lig influencia mais os resultados do que o tipo de adição mineral. É possível observar-se uma alta correlação linear ( $R^2 = 0,96$ ) entre os resultados dos dois ensaios utilizados para avaliar as propriedades de transporte de

cloretos, a saber: penetrabilidade e difusão em estado não estacionário. Tal efeito está apresentado na Figura 4.20.

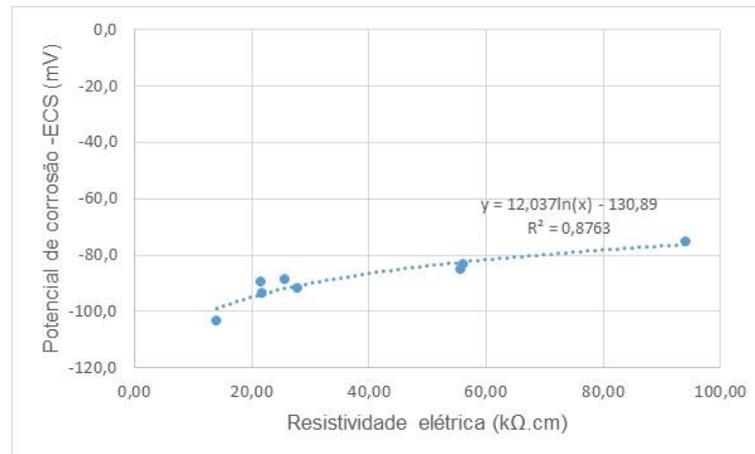
Figura 4.20 - Correlação linear entre a carga passante, obtida pelo ensaio de penetrabilidade de cloretos e o coeficiente de difusão em regime não estacionário, obtido pelo ensaio de difusão/migração, denotando uma relação direta entre as variáveis.



As propriedades mais ligadas à avaliação da corrosão das armaduras, a saber: resistividade elétrica superficial e potencial de corrosão, também mostraram que a relação ag/lig é um fator que em muito influencia os resultados destes ensaios. A influência do tipo de adição mineral empregado ficou mais evidenciada no ensaio de resistividade elétrica superficial, merecendo destaque os concretos com adição combinada de sílica ativa e nanossílica, seguidos pelos concretos MMX e MM, agrupados estatisticamente em um mesmo grupo. O ensaio de potencial de corrosão ao longo dos 13 ciclos de indução da corrosão não se mostrou tão sensível no que tange a diferenciação dos efeitos da incorporação das adições minerais empregadas, mas, como comentado anteriormente, os 13 ciclos empregados não foram suficientes para colocar os corpos de prova em estados ativos de corrosão.

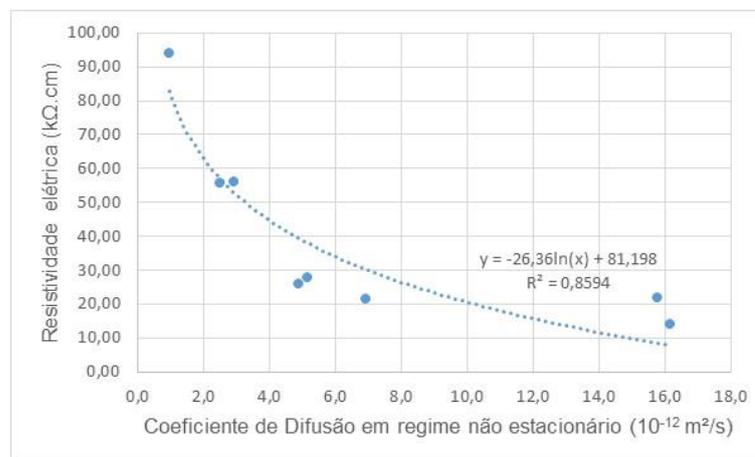
Apesar disso, foi possível obter-se uma boa correlação entre a resistividade elétrica do concreto e os potenciais de corrosão. A Figura 4.21 ressalta essa correlação, com coeficiente de determinação elevado, igual a 0,88.

Figura 4.21 - Correlação não linear entre o potencial de corrosão e a resistividade elétrica superficial do concreto, denotando uma relação crescente entre as variáveis.



Também foram obtidas correlações entre as propriedades relacionadas ao transporte de cloretos no concreto e aquelas relacionadas à resistividade e aos potenciais de corrosão. A Figura 4.22 apresenta a correlação não linear obtida entre os resultados dos ensaios de resistividade elétrica superficial e o coeficiente de difusão em regime não estacionário.

Figura 4.22 - Correlação não linear entre o coeficiente de difusão em regime não estacionário, obtido pelo ensaio de difusão/migração, e a resistividade elétrica superficial, denotando uma relação inversa entre as variáveis.



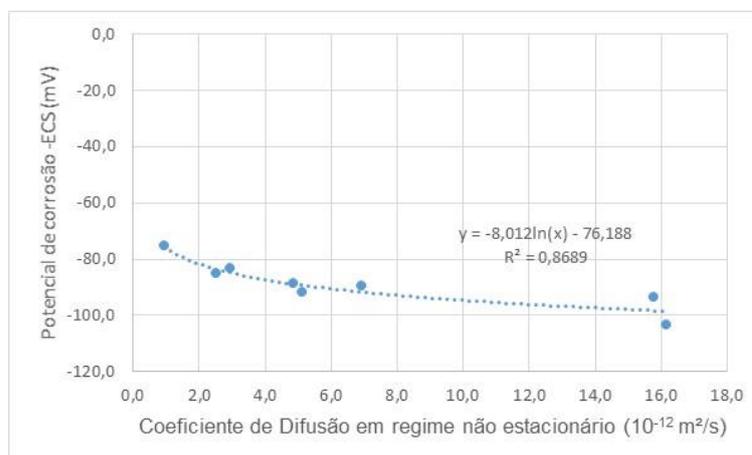
Observa-se que à medida em que a resistividade elétrica superficial do concreto aumenta, o coeficiente de difusão em regime não estacionário diminui, ou seja, a passagem de íons cloro no sistema de poros do concreto é dificultada à medida em que a resistividade aumenta. Tal fato pode ser explicado, quando da incorporação de adições minerais pozolânicas aos concretos, pelo refinamento da estrutura de poros da pasta de cimento (redução do diâmetro médio dos poros), o que produz menor interconexão e mais tortuosidade desses poros, como discutido por Ollivier e Torrentti (2014). Outro argumento importante que se soma a este anterior é a

diminuição da condutividade elétrica da solução do poro em sistemas com adições minerais, conforme discutido por Khaloo *et al.* (2016), Pires (2016) e Quercia *et al.* (2014), entre outros, que causa efeito na resistividade do concreto e, conseqüentemente, em todas as propriedades de transporte de cloretos no concreto.

Destacam-se ainda os elevados valores de resistividade elétrica obtidos nesta pesquisa para os concretos com a incorporação combinada de nanossílica e sílica ativa. Quando se comparam esses valores, a título de exemplo, com os obtidos por Khaloo *et al.* (2016), observa-se que os referidos autores obtiveram valores de resistividade elétrica aos 91 dias (para concretos com incorporação exclusiva de nanossílica na relação ag/lig igual a 0,25) que variaram, aproximadamente, de 45 k $\Omega$ .cm a 55 k $\Omega$ .cm (de acordo com o tipo e o teor de nanossílica utilizada). Na presente pesquisa, para uma relação ag/lig igual a 0,6, a resistividade elétrica média obtida aos 91 dias foi igual a 66 k $\Omega$ .cm, o que ressalta a eficiência na presente situação.

Também foi obtida correlação não linear entre os resultados de potencial de corrosão e o coeficiente de difusão em regime não estacionário, com coeficiente de determinação aproximadamente igual a 0,87, conforme apresentado na Figura 4.23.

Figura 4.23 - Correlação não linear entre o coeficiente de difusão em regime não estacionário, obtido pelo ensaio de difusão/migração, e o potencial de corrosão, denotando uma relação inversa entre as variáveis.



Sabe-se que quanto mais eletropositivo for o potencial de corrosão, menor será a probabilidade de corrosão das armaduras. Por meio do gráfico, observa-se que à medida em que o potencial de corrosão aumenta (valores mais eletropositivos de potencial), o coeficiente de difusão diminui. Tal fato provavelmente ocorre devido ao refinamento da estrutura de poros do concreto (redução do diâmetro médio e da interconexão entre eles), quando da incorporação de adições

minerais pozolânicas, além da diminuição da condutividade da solução do poro, conforme já foi discutido anteriormente.

Por fim, destaca-se o efeito pronunciado da incorporação combinada de sílica ativa e nanossílica nos concretos, principalmente no tocante às propriedades de transporte de cloretos e ligadas à corrosão das armaduras. A Tabela 4.10 apresenta um resumo dos resultados obtidos nos ensaios desenvolvidos no programa experimental desta dissertação. Os resultados sombreados correspondem aos melhores concretos em cada propriedade para ambas as relações ag/lig estudadas (resultados sombreados de verde correspondem aos melhores resultados na relação ag/lig 0,4 e os sombreados em azul os melhores resultados para a relação ag/lig 0,6).

Tabela 4.10 - Resultados médios globais da pesquisa para todas as propriedades estudadas. Os melhores resultados estão sombreados de verde e de azul, respectivamente para as relações ag/lig iguais a 0,4 e 0,6.

Ensaio	Unidade de medida	CONCRETO							
		REF4	SN4	MM4	MMX4	REF6	SN6	MM6	MMX6
Resistência à compressão	MPa	68,3	68,3	65,2	61,2	41,1	46,4	47,2	43,6
Módulo de elasticidade	GPa	45,3	45,5	48,0	39,0	43,4	38,1	44,1	36,9
Penetrabilidade de cloretos	C	1948,4	177,3	649,1	638,2	4453,4	808,6	2133,1	4120,2
Difusão de cloretos	m <sup>2</sup> /s	5,14	0,94	2,93	2,51	16,15	4,87	6,92	15,79
Resistividade elétrica <sup>1</sup>	kΩ.cm	19,7	70,5	38,8	39,8	10,9	15,9	15,4	13,1
Potencial de corrosão <sup>1</sup>	mV	-114,8	-94,0	-105,3	-100,9	-176,2	-110,7	-124,2	-124,0

<sup>1</sup> valores referentes ao último ciclo de indução da corrosão em solução de NaCl

Observa-se com relação às propriedades relacionadas à durabilidade dos concretos, que a adição combinada de sílica ativa e nanossílica apresentaram desempenho superior aos demais concretos em ambas as relações ag/lig.

De forma geral, fica evidenciada a contribuição das adições minerais empregadas neste programa experimental para a resistência mecânica e para a durabilidade do concreto, calcada nas propriedades ligadas aos mecanismos de transporte de massa e em propriedades direta ou indiretamente associadas à durabilidade.

# CAPÍTULO 5

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as considerações finais sobre o trabalho de forma geral. São, portanto, apresentadas as conclusões obtidas a partir dos resultados do programa experimental e, por fim, são sugeridos tópicos relacionados a esta pesquisa para trabalhos futuros.

### 5.1. CONCLUSÕES

A partir do programa experimental desenvolvido nesta pesquisa foi possível concluir que:

- A presença de adições minerais proporcionou melhorias significativas nas propriedades mecânicas dos concretos estudados, a saber: módulo de elasticidade e resistência à compressão. Provavelmente, a redução da porosidade e a densificação da matriz cimentícia decorrentes da ação pozolânica (que produz C-S-H, C-A-S-H na pasta de cimento) e do efeito fíler, com efeitos indiscutíveis de melhoria ao nível da zona de transição pasta-agregado, explicam esses resultados.
- O parâmetro relação água/ligante é o mais significativo estatisticamente para todas as propriedades analisadas no programa experimental dessa dissertação, exceto para o módulo de elasticidade. A relação água/ligante é o principal controlador da porosidade do concreto, de conhecimento consolidado na literatura científica como um parâmetro determinante das propriedades mecânicas (*Lei de Abrams*), mas também como um parâmetro de durabilidade.
- A incorporação de adições minerais também gerou melhorias significativas nas propriedades relacionadas ao transporte de cloretos no interior do concreto (penetrabilidade e a difusão de cloretos), bem como nas propriedades empregadas no estudo acelerado de corrosão das armaduras (resistividade elétrica e potenciais de corrosão). Em geral, concretos com adições minerais mostraram-se bem mais resistentes à penetração de cloretos, ao mesmo tempo que bem mais resistentes.

- Dentre as adições minerais empregadas no programa experimental desenvolvido, a combinação de nanossílica com sílica ativa (SN), especialmente na relação água ligante igual a 0,4, apresentou desempenho superior em relação às propriedades de transporte de cloretos e ligadas à corrosão das armaduras, mas as duas misturas com metacaulim também tiveram desempenhos muito bons (próximos entre si e bastante superiores aos concretos de referência). As adições alteram fisicamente a estrutura de poros dos concretos, produzindo refinamento da porosidade capilar e densificação da matriz cimentícia. O efeito é a obtenção de um sistema de poros menos interconectados e mais tortuosos, que dificulta o transporte de cloretos. Há, também, uma redução da condutividade elétrica do meio aquoso da pasta, o que certamente contribui para os elevados valores de resistividade elétrica e para os mais baixos coeficientes de difusão de cloretos (desses concretos com adições).
- O tempo de indução da corrosão por molhagem e secagem em solução contendo cloretos (13 ciclos) não foi suficiente para levar as armaduras a estados ativos de corrosão. Isso foi constatado pela técnica de potenciais de corrosão, cujos valores monitorados, para todos os concretos (nos 13 ciclos empreendidos), não alcançaram níveis de potenciais típicos de sistemas despassivados, ou seja, com corrosão da armadura. Com isso, a técnica do potencial de corrosão não diferenciou sensivelmente os concretos, exceto por um efeito de desvio no valor real do potencial, que é dado pela alta resistividade da camada de cobertura do concreto, no caso dos sistemas com adições minerais. Este efeito foi mais visível nos concretos de relação ag/lig 0,4, em que o concreto com sílica ativa e nanossílica manteve valores razoavelmente mais eletropositivos de potencial em comparação ao concreto de referência (provavelmente em decorrência da diferença de resistividade desses concretos), apesar dos potenciais de todos os concretos terem sido indicativos de sistemas passivos.

Das conclusões anteriores, ficam patentes as melhorias de durabilidade nos concretos com adições minerais em face da agressividade do íon cloro. Dessa forma, é possível afirmar que esses concretos com adições minerais, em especial na menor relação ag/lig e de forma mais específica ainda as misturas contendo sílica ativa e nanossílica, são materiais muito indicados para atmosferas agressivas do tipo marinha ou de respingo de maré. A alta resistividade de partida desses concretos com adições e seus baixíssimos coeficientes de difusão os credenciam como concretos de alta durabilidade potencial.

## 5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A presente pesquisa evidenciou alguns aspectos que merecem estudos mais aprofundados, referentes aos mecanismos de transporte no interior do concreto e às metodologias aplicadas.

Sendo assim, sugere-se para os futuros trabalhos:

- aprofundar o estudo do sistema de poros dos diversos concretos, mediante o emprego das técnicas de porosimetria por intrusão de mercúrio e porosimetria por dessorção de vapor de água, com o intuito de correlacionar os resultados de transporte de cloretos e corrosão de armaduras aos dados da rede de poros do concreto;
- avaliar a viabilidade do uso de misturas compostas por nanossílica e diferentes tipos de metacaulins em diferentes teores de substituição, para ver o efeito sinérgico da mistura dessas pozolanas;
- desenvolver traços compostos por nanossílica e sílica ativa em diferentes teores de substituição, preferencialmente baseados na granulometria desses materiais, e avaliar a viabilidade técnica desses concretos;
- avaliar a influência das adições minerais empregadas em outras propriedades associadas à durabilidade das estruturas de concreto, como resistência ao ataque por sulfatos e cloretos, mitigação de reação álcali-agregado, prevenção de formação tardia de etringita, permeabilidade à água e ao ar, absorção de água, entre outros;
- desenvolver um estudo mais detalhado da nanossílica com o intuito de conhecer a ação dessa adição mineral quando empregada em combinação binária com o cimento Portland;
- avaliar o potencial de corrosão dos concretos estudados além dos 13 ciclos de indução da corrosão;
- aprofundar-se no estudo da corrosão das armaduras por meio de outras técnicas eletroquímicas, como, por exemplo, as técnicas de resistência de polarização e de impedância eletroquímica.

## REFERÊNCIAS

ABEEólica - Associação Brasileira de Energia Eólica. **Boletim anual de geração eólica**: 2015. São Paulo, 2016, 21 p. Disponível em: < [http://www.portalabeeolica.org.br/pdf-encontro/Abeeolica\\_BOLETIM-2015\\_low.pdf](http://www.portalabeeolica.org.br/pdf-encontro/Abeeolica_BOLETIM-2015_low.pdf) >. Acesso em: 16 de novembro de 2016.

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15575-1**: Edificações Habitacionais- Desempenho- Parte 1: requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013, 60p.

ABNT \_\_\_\_\_. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto-procedimentos. Rio de Janeiro, 2014, 238p.

ABNT \_\_\_\_\_. **NBR 5738** - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2003a, 6 p.

ABNT \_\_\_\_\_. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007. 9p.

ABNT \_\_\_\_\_. **NBR 7211**: Agregados para concreto -Especificação. Rio de Janeiro, 2009c. 9p.

ABNT \_\_\_\_\_. **NBR 7480**: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - Especificação. Rio de Janeiro, 2008. 13p.

ABNT \_\_\_\_\_. **NBR 7680**: Concreto - Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto. Parte 1: Resistência à compressão axial. Rio de Janeiro, 2015b. 27p.

ABNT \_\_\_\_\_. **NBR 11578**: Cimento Portland composto - Especificação. Rio de Janeiro, 1991. 5p.

ABNT \_\_\_\_\_. **NBR 11578**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento. Rio de Janeiro, 2015. 18p.

ABNT \_\_\_\_\_. **NBR NM 47**: Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002. 23p

ABNT \_\_\_\_\_. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009a. 6p.

ABNT \_\_\_\_\_. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009b. 8p.

ABNT \_\_\_\_\_. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998. 8p.

ABNT \_\_\_\_\_. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003b. 6p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforced steel in concrete – C 876 – 2009. **Annual Book of ASTM Standard**, v.04.02, p.452- 457, 2009.

ASTM\_\_\_\_\_. **G57 - Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method**. West Conshohocken: ASTM International: 6 p. 2012.

ASTM\_\_\_\_\_. **C469 - Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression**. West Conshohocken: ASTM International: 5p. 2014.

ASTM\_\_\_\_\_. **C1202 - Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration**. West Conshohocken: ASTM International: 8 p. 2012.

ANDRADE, C. Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. **Cement and concrete research**, v. 21, p. 724-742, 1993.

ANGST, U. **Chloride induced reinforcement corrosion in concrete: Concept of critical chloride content–methods and mechanisms**. 2011, 55 f. Thesis (doctorate). Department of Structural Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2011.

ANGST, U.; ELSENER, B.; LARSEN, C. K.; VENNESLAND, Ø. Critical chloride content in reinforced concrete - A review. **Cement and concrete research**, v. 39, p. 1122-1138, 2009.

ANGST, U.; VENNESLAND, Ø. **Critical chloride content in reinforced concrete – state of the art**. In: **Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II**. Proc. 2nd Int. Conf. on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR), Cape Town, South Africa. Eds: Alexander MG et al. CRC Press/Balkema, The Netherlands, 2008, p. 149. ISBN 978-0-415-46850-3.

APOSTOLOPOULOS, C. A.; PAPADAKIS, V. G. Consequences of steel corrosion on the ductility properties of reinforcement bar. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 2316-2324, 2008.

ARYA, C.; XU, Y. Effect of cement type on chloride binding and corrosion of steel in concrete. **Cement and concrete research**, v. 25, n. 4, p. 893-902, 1995.

BAGHERI, A.; ZANGANEH, H.; ALIZADEH, H.; SHAKERINIA, M.; MARIA, M. A. S. Comparing the performance of fine fly ash and silica fume in enhancing the properties of concretes containing fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 1402-1408, 2013.

BAI, J.; WILD, S. Investigation of the temperature change and heat evolution of mortar incorporating PFA and metakaolin. **Cement and Concrete Composites**, 2002, v. 24, p. 201-209.

BAROGHEL-BOUNY, V.; CUSSIGH, F.; ROUGEAU, P. **Durabilidade dos concretos a partir da abordagem do desempenho**. In: OLLIVIER, J. P.; VICHOT, A. **Durabilidade do**

**concreto:** Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. CASCUDO, O; CARASEK, H. (Ed. Trad.). 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 615 p. ISBN: 978-85-98576-22-0.

BASHEER, L.; KROPP, J.; CLELAND, D. J. Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. **Construction and build materials**, v. 15, p. 93-103, 2001.

BERGNA, H. E. **Colloid Chemistry of Silica: An Overview**. In: BERGNA, H. E.; ROBERTS, W. O. (Ed.). **Colloidal Silica: Fundamentals and Applications**. Surfactant Science Series, V. 131. Taylor & Francis Group, 2006. ISBN 0-8247-0967-5

BRODDY, A.; HOOTON, R. D.; GRUBER, K. A. Long-term testing of chloride-penetration resistance of concrete containing high-reactivity metakaolin. **Cement and concrete research**, v. 31, p. 759-765, 2001.

BRAUN, V. **Influência das condições de moldagem e cura nas características do cobrimento de diversos concretos**. 2003. 200p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

CALDARONE, M. A.; GRUBER, K. A.; BURG, R. G. High-reactivity Metakaolin: a new generation mineral admixture. **Concrete International**, v. 16, n. 11, p. 37-40, 1994.

CAMACHO, J. B.; ABDELKADER, S. M.; POZO, E. R.; TERRADES, A. M. The influence of ion chloride on concretes made with sulfate-resistant cements and mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 70, p. 483-493, 2014.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1997. 237 p.

CASTRO, A. **Influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito à carbonatação**. 2003. 215p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

CEB: COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **Model Code 1990**. London, 1993.

CEB\_\_\_\_\_. **Bulletin d'Information**. London, n. 183, 1992.

CEB\_\_\_\_\_. **Bulletin d'Information**. Paris, n. 192, 1989.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E ÉOLICA SERGIO SALVO BRITO - CRESESB. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas\\_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf)>. Acesso em: 12 out 2014.

CHASTRE, C; LÚCIO, V. Evolução histórica, desenvolvimento atual e potencial futuro das torres de concreto pré-moldado para suporte de aerogeradores. **Concreto e Construções**, São Paulo: IBRACON, v.75, p. 24-34, 2014. ISSN: 1809-7197.

CHUNG, C. –W.; SHON, C. –S. KIM, Y. –S. Chloride ion diffusivity of fly ash and silica fume concretes exposed to freeze–thaw cycles. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 1739- 1745, 2010.

CUSSON, D.; ISGOR, B. Durability of concrete structures: prevention, evaluation, inspection, repair and prediction. **Canadian Civil Engineer**, Canada, v. 21, n. 2, p. 4-5, 2004.

DAL MOLIN, D.C.C. **Adições Minerais**. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. v.1. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 8, p. 261-309.

DEHWAH, H.A.F. Corrosion resistance of self-compacting concrete incorporating quarry dust powder, silica fume and fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 277-282, 2012.

DOMONE, P.; ILLSTON, J. **Construction Materials: Their nature and behavior**. 4 ed. Abingdon: Spon Press, 2010. 551 p.

DOTTO, J.M.R.; ABREU, A.G.; DAL MOLIN, D.C.C.; MUULLER, I.L. Influence of silica fume addition on concretes physical properties and on corrosion behaviour of reinforcement bars. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, p. 31-39, 2004.

DU, H.; DU, S.; LIU, X. Effect of nano-silica on the mechanical and transport properties of lightweight concrete. **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 114-122, 2015.

DUAN, P.; SHUI, Z.; CHEN, W.; SHEN, C. Effects of metakaolin, silica fume and slag on pore structure, interfacial transition zone and compressive strength of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 1-6, 2013.

EVANS, A.; STREZOV, V.; EVANS, T. Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v 13, p. 1082-1088, 2009.

FARIAS, R. F. S.; TEZUKA, Y. **Corrosão das armaduras do concreto: Mecanismos e controle**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, São Paulo, n. 69, p. 19, 1992.

FERREIRA, M. B. **Estudo da carbonatação natural de concretos com diferentes adições minerais após 10 anos de exposição**. Goiânia, 2013. 197 p. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) – Escola de engenharia civil, Universidade Federal de Goiás, 2013.

FERREIRA, R. B. **Influência das adições minerais nas características do concreto de cobrimento e seu efeito na corrosão de armadura induzida por cloretos**. 2003, 221 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

FERREIRA, R. M.; CASTRO-GOMES, J. P.; COSTA, P.; MALHEIRO, R. Effect of metakaolin on the chloride ingress properties of concrete. **KSCE Journal of Civil Engineering**, p. 1-10, 2015.

FUSCO, P. B. **Tecnologia do concreto estrutural**. São Paulo: Pini, 2008. 179 p.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3. ed. Rio de Janeiro: S.A., 1996. 332 p.

GHAFFARI, E.; COSTA, H.; JÚLIO, E.; PORTUGAL, A.; DURÃES, L. The effect of nanosilica addition on flowability, strength and transport properties of ultra high performance concrete. **Materials and Design**, v. 59, p. 1-9, 2014.

GHODS, P.; ISGOR, O. B.; BENSEBAA, F.; KINGSTON, D. Angle-resolved XPS study of carbon steel passivity and chloride-induced depassivation in simulated concrete pore solution. **Corrosion Science**, v. 58, p. 159-167, 2012.

GJØRV, O. E. **Durability design of structures in severe environments**. 1 ed. Abingdon: Taylor & Francis, 2009, 215 p.

GJØRV, O. E. **Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade**. FIGUEIREDO, E. P., HELENE, P. (Ed. Trad.). São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2015. 238 p.

GLEIZE, P. J. P. **Nanociência e Nanotecnologia dos Materiais Cimentícios**. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1 ed. São Paulo: IBRACON, n. 2, p. 1871 – 1884, 2011.

GOUDA, V.K. corrosion and corrosion inhibition of reinforcing steel: I. immersed in alkaline solutions. **Br. Corros. J.**, Cairo, v. 5, 1970.

GUNAY, H. B.; GHODS, P.; ISGOR, O. B.; CARPENTER, G. J. C. Characterization of atomic structure of oxide films on carbon steel in simulated concrete pore solutions using EELS. **Applied Surface Science**, v. 274, p. 195-202, 2013.

GÜNEYISI, E.; GESOGLU, M.; KARAOGLU, S.; MERMERDAS, K. Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes. **Construction and Building Materials**, v. 34, p. 120-130, 2012.

HAN, S.-H. Influence of diffusion coefficient on chloride ion penetration of concrete structure. **Construction and build materials**, v. 21, p. 370-378, 2007.

HANSSON, C. M. Comments on electrochemical measurements of rate of corrosion of steel in concrete. **Cement and concrete research**, v. 14, p. 574-584, 1984.

HASSAN, A. A. A.; LACHEMI, M.; HOSSAIN K. M.A. Effect of metakaolin and silica fume on the durability of self-consolidating concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, p. 801-807, 2012.

HASSAN, K.E.; CABRERA, J.G.; MALIEHE, R.S. The effect of mineral admixtures on the properties of high-performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 20, p. 267-271, 2000.

HAUSMANN, D. Steel corrosion in concrete. **Materials Protection**, v. 6, n. 11, p. 19-23, 1967.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. 231 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HOFFMANN, A. T. **Influência da adição de sílica ativa, relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concretos.** 2001. 132 p. Dissertação (Mestrado em engenharia civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate change 2014: Synthesis report.** Geneva 2, Switzerland, 2014, 40p.

KALOO, A.; MOBINI, M. H.; HOSSEINE, P. Influence of different types of nano-SiO<sub>2</sub> particles on properties of high-performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 188-201, 2016.

KARHUNEN, K; SEPPÄNEN, A.; LEHIKONEN, A.; MONTEIRO, P J.M.; KAIPIO, J P. Electrical Resistance Tomography imaging of concrete. **Cement and concrete research**, v. 40, p. 137-145, 2010.

KAYALI, O.; ZHU, B. Corrosion performance of medium-strength and silica fume high-strength reinforced concrete in a chloride solution. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, p. 117-124, 2005.

KELESTEMUR, O.; DEMIREL, B. Effect of metakaolin on the corrosion resistance of structural lightweight concrete. **Construction and Building Materials**, v. 81, p 172-178, 2015.

KHANZADI, M.; TADAYON, M.; SEPEHRI, H.; SEPEHRI, M. Influence of nano-silica particles on mechanical properties and permeability of concrete. *In: ZACHAR, J.; CLAISSE, P.; NAIK, T. R.; GANJIAN, E. (Ed.). Second Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, 2010. Proceedings...* Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italy, 2010.

KONTOLEONTOS, F.; TSAKIRIDIS, P. E.; MARINOS, A.; KALOIDAS, V.; KATSIOTI, M. Influence of colloidal nanosilica on ultrafine cement hydration: Physicochemical and microstructural characterization. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 347-360, 2012.

LATASTE, J.F.; SIRIEIX, C.; BREYSSE, D.; FRAPPA, M. Electrical resistivity measurement applied to cracking assessment on reinforced concrete structures in civil engineering. **NDT&E International**, v. 36, p. 383-394, 2003.

LI, Z.; DING, Z. Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag. **Cement and Concrete Research**, 2003, vol. 33, Issue 4, p. 579-584.

LI, Q.; GENG, H.; HUANG, Y.; SHUI, Z. Chloride resistance of concrete with metakaolin addition and seawater mixing: A comparative study. **Construction and Building Materials**, v. 101, Part 1, p. 184-192, 2015.

LIMA, M. B. **Avaliação da capacidade de proteção contra a corrosão da armadura induzida por cloretos de concretos com adições minerais e inibidores de corrosão.** 2009. 220 p. Dissertação (mestrado em construção civil). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

LOPES, A. N. M. **Mitigação da retração autógena em concretos de alta resistência contendo aditivo redutor de retração e seus efeitos na macro e microestrutura**. 2011. 281 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

MADANDOUST, R.; MOUSAVI, S. Y. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 752-760, 2012.

MADANI, H.; BAGHERI, A.; PARHIZKAR, T.; RAISGHASEMI, A. Chloride penetration and electrical resistivity of concretes containing nanosilica hydrosols with different specific surface áreas. **Cement and Concrete Composites**, v. 53, p. 18-24, 2014.

MALAGONI, M. A. **Contribuição ao estudo da durabilidade e do transporte de fluidos em concretos contendo adições minerais**. 2016. 174p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

MANCIO, M.; ZHANG, J. Y.; MONTEIRO, P. J. M. Nondestructive surface measurement of corrosion of reinforcing steel in concrete. **Canadian Civil Engineer**, Canada, v. 21, n. 2, p. 12-18, 2004.

MANGAT, P.; MOLLOY, B. Prediction of Long Term Chloride Concentration in Concrete. **Materials and Structures**. v. 27, n 170, p. 338-346, 1994.

MARDANI-AGHABAGLOU, A.; SEZER, G I.; RAMYAR, K. Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point. **Construction and Building Materials**, v. 70, p. 17-25, 2014.

MASLEHUDDIN, M.; AL-MANA, A. I.; SARICIMEN, H.; SHAMIM, M. Corrosion of reinforcing steel in concrete containing slag or pozzolans. **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 12, n. 1, p. 24-31, 1990.

MASSAZZA, F. Pozzolanic Cements. **Cement and Concrete Composites**. v. 15. p. 185-214, 1993.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. HASPARYK, N. P. (Ed. Trad.). 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 782 p. ISBN: 978-85-98576-21-3.

MEJLBRO, L. The Complete Solution of Fick's Second Law of Diffusion with TimeDependent Diffusion Coefficient and Surface Concentration. In: DURABILITY OF CONCRETE IN SALINE ENVIRONMENT, 1996. **Proceedings...** Lund: P. Sandberg (Ed.), May 1996. p. 127-158.

MELO, E. A. S. Investimentos em energia eólica no Brasil: aspectos de inserção, tecnologia e competitividade. **Concreto e Construções**, São Paulo: IBRACON, v.75, p. 74-77, 2014. ISSN: 1809-7197.

MENDES, M. V. A. R. **Avaliação das propriedades de transporte de massa em concretos contendo adições minerais**. 2009. 201 p. Dissertação (mestrado em construção civil). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

MONTEMOR, M.F.; SIMÕES, A.M.P.; FERREIRA, M.G.S. Chloride-induced corrosion on reinforcing steel: from the fundamentals to the monitoring techniques. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, p. 491-502, 2003.

MORRIS, W.; VICO, A.; VAZQUEZ, M.; Chloride induced corrosion of reinforcing steel evaluated by concrete resistivity measurements. **Electrochimica Acta**, v. 49, p. 4447-4453, 2004.

MORRIS, W.; VICO, A.; VAZQUEZ, M.; SANCHEZ, S.R. Corrosion of reinforcing steel evaluated by means of concrete resistivity measurements. **Corrosion Science**, v. 44, p. 81-99, 2002.

NATISHAN, P. M.; O'GRADY, W. E. Chloride Ion Interactions with Oxide-Covered Aluminum Leading to Pitting Corrosion: A Review. **Journal of The Electrochemical Society**, v. 161, n. 9, p. 421-432, 2014.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. CREMONINI, R. A. (Trad.). 5. ed., Porto Alegre: Bookman, 2016. 888 p.

NORDTEST. **Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments (NT BUILD 492)**. Espoo: NORDTEST: 8 p. 1999.

OKENIYI, O. J.; LOTO, C. A.; POPOOLA, A. P. I. Electrochemical Performance of Anthocleista djalonensis on Steel Reinforcement Corrosion in Concrete Immersed in Saline/Marine Simulating-Environment. **Metallurgy Materials Engineering**, v. 67, n. 6, p. 959-969, 2014.

OLIVEIRA, A. M. **Avaliação do desempenho de concretos com adições minerais quanto à corrosão das armaduras induzida por cloretos**. 2007. 255 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.

OLLIVIER, J. P.; TORRENTI, J. M. **A estrutura porosa dos concretos e as propriedades de transporte**. In: OLLIVIER, J. P.; VICHOT, A. **Durabilidade do concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. CASCUDO, O; CARASEK, H. (Ed. Trad.). 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 615 p. ISBN: 978-85-98576-22-0.

PAIVA, H.; VELOSA, A.; CACHIM, P.; FERREIRA, V. M. Effect of metakaolin dispersion on the fresh and hardened state properties of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 42, p. 607-612, 2012.

PAULA COUTO, A. B. **Influência das condições de cura nas características do cobrimento de diferentes concretos**. 2003. 160p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

- PAPADAKIS, V. G. Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress. **Cement and concrete research**, v. 30, p. 291-299, 2000.
- PIMENTEL GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. Piracicaba: Editora Nobel, 1990. 468 p.
- PIRES, P. F. **Estudo da carbonatação avançada em concretos contendo adições minerais**. 2016. 141 p. Dissertação (Mestrado em engenharia civil). Escola de engenharia civil, Universidade Federal de Goiás, 2016.
- POON, C.S.; KOU, S.C; LAM, L. Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete. **Construction and Building Materials**, v. 20, p. 858-865, 2006.
- PULLAR, S. P. **Corrosion damage concrete: assessment and repair**. London, Butterworths, 1987.
- RIBEIRO, D. V.; CUNHA, M. P. T. Deterioração das estruturas de concreto armado. In: RIBEIRO, D. V. (Ed.). **Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014a. p.87-118.
- SABET, F. A.; LIBRE, N. A.; SHEKARCHI, M. Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 175-184, 2013.
- SABIR, B. B.; WILD, S.; BAI, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. **Cement and Concrete Composites**, v. 23, n. 6, p. 441-454, 2001.
- SAID, A. M.; ZEIDAN, M. S.; BASSUONI, M. T.; TIAN, Y. Properties of concrete incorporating nano-silica. **Construction and Building Materials**. v. 36, p. 838-844, 2012.
- SAREMI, M.; MAHALLATI, E. A study on chloride-induced depassivation of mild steel in simulated concrete pore solution. **Cement and concrete research**, v. 32, p. 1915-1921, 2002.
- SHEKARCHI, M.; BONAKDAR, A.; BAKHSHI, M.; MIRDAMADI, A.; MOBASHER, B. Transport properties in metakaolin blended concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 2217- 2223, 2010.
- SHEKARCHI, M.; RAFIEE, A.; LAYSSI, H. Long-term chloride diffusion in silica fume concrete in harsh marine climates. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, p. 769-775, 2009.
- SILVA, E. F. **Variações dimensionais em concretos de alto desempenho contendo aditivo redutor de retração**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. 332 p.
- SINGH, L. P.; BHATTACHARYYA, S. K.; AHALAWAT, S. Preparation of Size Controlled Silica Nano Particles and Its Functional Role in Cementitious System. **Journal of Advanced Concrete Technology**. 2012, V. 10 N. 11 p. 345-352. DOI: 10.3151/jact.10.345.

SONG, H. –W.; LEE, C. –H.; ANN, K. Y. Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments. **Cement and concrete research**, v. 30, p. 113-121, 2008.

SOUZA, P. S. D. L. **Verificação da Influência do uso de metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

SOBOLEV, K.; GUTIÉRREZ, M. F. How Nanotechnology Can Change the Concrete World. **American Ceramic Society Bulletin**, v. 84, n. 10, p.16-19.

SUN, W.; ZHANG, Y.; LIU, S.; ZHANG, Y. The influence of mineral admixtures on resistance to corrosion of steel bars in green high-performance concrete. **Cement and concrete research**, v. 34, p. 1781-1785, 2004.

TEODORO, R. **Avaliação das características de diferentes metacaulins e sua influência na estrutura interna do concreto e em propriedades ligadas à durabilidade**. 2016. 191 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

TEODORO, R.; CASCUDO, O.; CARASEK, H. Avaliação da durabilidade do concreto com diferentes tipos de metacaulim. *In*: 2º encontro luso-brasileiro de degradação de estruturas de betão. **Anais...** Laboratório Nacional de Engenharia Civil: Lisboa, 2016a.

TEODORO, R.; CASCUDO, O.; CARASEK, H. Influência das características de diferentes tipos de metacaulim em propriedades mecânicas e absorção de água do concreto. *In*: 58º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais...** IBRACON: Belo Horizonte, 2016b.

TUUTTI, K. Corrosion of steel in concrete. Stockolm, Swedish **Cement and Concrete Research Institute**, 1982.

UJI, K; MATSUOKA, Y; MARUYA, T. Formulation of an Equation for Surface Chloride Content of Concrete due to Permeation of Chloride. *In*: CORROSION OF REINFORCEMENT IN CONCRETE, 1990. **Proceedings**. London: Ed. C. L. Page 1990. p. 285-297.

VALIPOUR, M.; PARGAR, F.; SHEKARCHI, M.; KHANI, S. Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 879-888, 2013a.

VALIPOUR, M.; PARGAR, F.; SHEKARCHI, M.; KHANI, S.; MORADIAN, M. In situ study of chloride ingress in concretes containing natural zeolite, metakaolin and silica fume exposed to various exposure conditions in a harsh marine environment. **Construction and Building Materials**, v. 46, p. 63-70, 2013b.

WEE, T. H.; MATSUNAGA, Y.; WATANABE, Y.; SAKAI, E. Microstructure and strength properties of high strength concretes containing various mineral admixtures. **Cement and concrete research**, v. 25, n. 4, p. 715-720, 1995.

WILD, S.; KHATIB, J. M.; JONES, A. Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 10, p. 1537-1544, 1996.

YUAN, Q.; SHI, C.; SCHUTTER, G.; AUDENAERT, K.; DENG, D. Chloride binding of cement-based materials subjected to external chloride environment – A review. **Construction and build materials**, v. 23, p. 1-13, 2009.

ZHANG, M. –H.; ISLAM, J.; PEETHAMPARAN, S. Use of nano-silica to increase early strength and reduce setting time of concretes with high volumes of slag. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, p. 650-662, 2012.

ZAHEDI, M; RAMEZANIANPOUR, A. A.; RAMEZANIANPOUR, A. M. Evaluation of the mechanical properties and durability of cement mortars containing nanosilica and rice husk ash under chloride ion penetration. **Construction and Building Materials**, v. 78, p. 354, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat. 2015.01.045

## APÊNDICE

Tabela 5.1 – Valores de resistência à compressão por amostra, média, desvio padrão e coeficiente de variação.

Relação ag/lig	Adição Mineral	Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à compressão média (MPa)	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
0,6	REF	3	25,3	26,0	0,95	3,63
		3	25,7			
		3	27,1			
		7	28,4	29,9	1,54	5,14
		7	29,9			
		7	31,5			
		28	32,0	34,9	2,76	7,91
		28	35,2			
		28	37,5			
		91	41,0	41,1	0,07	0,17
91	41,1					
0,4	REF	3	38,1	39,6	1,53	3,9
		3	39,6			
		3	41,2			
		7	42,1	46,0	3,92	8,5
		7	46,0			
		7	49,9			
		28	46,6	49,9	4,27	8,6
		28	48,3			
		28	54,7			
		91	65,3	68,3	3,23	4,7
		91	67,8			
91	71,7					
0,6	SN	3	21,6	22,4	1,12	4,97
		3	22,0			
		3	23,7			
		7	24,8	27,4	2,83	10,34
		7	26,9			
		7	30,4			
		28	40,1	40,2	0,07	0,18
		28	40,2			
		91	41,4	46,4	4,32	9,33
		91	48,4			
		91	49,3			

0,4	SN	3	44,1	44,8	0,59	1,3		
		3	45,0					
		3	45,2					
		0,6	MM	7	43,9	48,3	4,92	10,2
				7	47,3			
				7	53,6			
				28	60,5	61,9	1,31	2,1
				28	62,1			
				28	63,1			
		0,4	MM	91	63,5	68,3	4,32	6,3
				91	69,7			
				91	71,8			
0,6	MM			3	25,4	25,6	0,25	0,98
				3	25,6			
				3	25,9			
		0,4	MM	7	33,8	35,9	1,85	5,15
				7	36,9			
				7	37,1			
				28	35,6	37,4	2,47	6,63
				28	39,1			
				91	45,0			
		0,4	MM	91	46,3	47,2	2,71	5,74
				91	50,2			
				3	36,7			
3	41,5							
3	45,9							
0,6	MMX			7	62,1	64,0	2,69	4,19
		7	62,9					
		7	67,1					
		28	65,5	65,6	0,14	0,22		
		28	65,7					
		91	61,7					
0,4	MM	91	66,4	65,2	3,08	4,72		
		91	67,5					
		3	24,1				24,2	0,07
		3	24,2					
		7	36,6					
		0,6	MMX	7	36,6	36,6	0,00	0,00
				28	28,1			
				28	38,3			
				28	41,5	36,0	7,00	19,5
				91	39,6			
				91	42,7			
		0,4	MM	91	48,6	43,6	4,57	10,5

0,4	MMX	3	34,7	37,8	3,10	8,2
		3	37,9			
		3	40,9			
		7	51,5	55,1	3,11	5,6
		7	56,5			
		7	57,2			
		28	57,7	58,6	0,86	1,5
		28	58,8			
		28	59,4			
		91	55,1	61,2	7,17	11,7
		91	59,4			
		91	69,1			

Tabela 5.2 - Valores de módulo de elasticidade por amostra, média, desvio padrão e coeficiente de variação.

Relação ag/lig	Adição Mineral	Idade (dias)	Módulo de elasticidade (GPa)	Média do módulo de elasticidade (GPa)	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
0,6	REF	3	21,1	21,1	0,00	0,0
		3	21,1			
		7	27,7	27,7	0,00	0,0
		7	27,7			
		28	29,8	30,2	0,56	1,9
		28	30,1			
		28	30,9			
		91	42,3	43,4	1,56	3,6
		91	44,5			
0,4	REF	3	27,5	27,5	0,00	0,0
		3	27,5			
		7	30,3	30,3	0,00	0,0
		7	30,3			
		28	41,3	42,7	1,98	4,6
		28	44,1			
		91	41,7	45,3	3,99	8,8
		91	44,7			
		91	49,6			

0,6	SN	3	30,6	32,5	1,69	5,2
		3	33,3			
		3	33,7			
		7	32,1	34,9	2,49	7,1
		7	35,9			
		7	36,8			
		28	37,2	37,5	0,29	0,8
		28	37,7			
		28	37,7			
		91	36,2	38,1	2,32	6,1
		91	37,5			
		91	40,7			
0,4	SN	3	38,0	38,5	0,47	1,2
		3	38,7			
		3	38,9			
		7	39,4	40,5	1,00	2,5
		7	40,9			
		7	41,3			
		28	45,3	48,0	2,37	4,9
		28	49,3			
		28	49,5			
		91	42,7	45,5	2,91	6,4
		91	45,2			
		91	48,5			
0,6	MM	3	30,4	31,1	0,66	2,1
		3	31,2			
		3	31,7			
		7	40,8	43,8	2,91	6,6
		7	44,0			
		7	46,6			
		28	40,9	43,9	3,00	6,8
		28	43,9			
		28	46,9			
		91	41,2	44,1	3,74	8,5
		91	42,7			
		91	48,3			

0,4	MM	3	42,1	43,0	1,01	2,3
		3	42,9			
		3	44,1			
		7	44,6	45,5	0,95	2,1
		7	45,4			
		7	46,5			
		28	45,3	47,0	1,53	3,3
		28	47,3			
		28	48,3			
		91	47,9	48,0	0,14	0,3
91	48,1					
0,6	MMX	3	34,4	35,5	1,48	4,2
		3	36,5			
		7	43,2	44,4	1,77	4,0
		7	43,5			
		7	46,4			
		28	44,8	46,1	1,35	2,9
		28	46,0			
		28	47,5			
		91	36,5	36,9	0,75	2,0
		91	36,5			
91	37,8					
0,4	MMX	3	37,7	39,5	2,02	5,1
		3	39,2			
		3	41,7			
		7	45,7	47,1	2,23	4,7
		7	46,0			
		7	49,7			
		28	45,8	47,3	1,93	4,1
		28	46,7			
		28	49,5			
		91	39,0	39,0	0,06	0,2
91	39,1					