

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**UTILIZAÇÃO DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA
(MEV) PARA AVALIAÇÃO DA AÇÃO DE CLORETOS EM
COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA**

Renata Leal Henriques

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2019

RENATA LEAL HENRIQUES

**UTILIZAÇÃO DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA
(MEV) PARA AVALIAÇÃO DA AÇÃO DE CLORETOS EM
COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Especialização: Produção e Gestão do Ambiente Construído do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.

Área de concentração: Materiais de Construção Civil
Orientador: Prof. Dr. Aldo Giuntini de Magalhães

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2019

Dedico este trabalho, primeiramente, a Deus, onde ancoo minha fé nos momentos mais difíceis. Aos meus pais, Geraldo e Ana, pela dedicação, amor e apoio. Aos meus irmãos e amigos, todo o meu amor e eterna gratidão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelos grandes encontros que me proporcionou durante este ano e início de caminhada na pós graduação. Ninguém convive conosco por acaso, e agradecer é uma pequena forma de poder retribuir todo o bem que recebi para que este momento chegasse.

Aos meus pais, Ana e Geraldo, e meus irmãos Marcelo, Juliana e Flávia, agradeço por vocês fazerem deste meu sonho o de vocês também. Sem o apoio de nossa família não seria possível.

Agradeço, com muito afeto, às novas amigas que durante essa jornada compartilharam comigo mais do que momentos de conhecimento, em especial, ao Juliano, Beatriz e Carla, pelo companheirismo e pela amizade, acima de tudo.

De forma muito especial, agradeço ao meu Orientador, Professor Dr. Aldo Giuntini, que conduziu a realização deste trabalho com profissionalismo, confiança e palavras que sempre precisei.

Aos professores da UFMG do Curso de Especialização, agradeço por não somente conduzirem as disciplinas, mas também demonstrarem-se conselheiros.

Por fim, agradeço à minha avó Mariinha, minha eterna saudade, meu eterno amor.

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades,
lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram
conquistadas do que parecia impossível.”

Charles Chaplin

RESUMO

Atualmente um dos problemas encontrados quanto à corrosão de estruturas em concreto armado, está ligado à ação dos íons cloreto no mesmo. Este, por sua vez, atua na despassivação de uma fina camada protetora que a pasta, altamente alcalina de cimento Portland, forma sobre o aço. A incidência desta manifestação patológica, tem voltado o interesse da pesquisa científica no sentido de se propor soluções para reduzir a permeabilidade do concreto a tais agentes deletérios. Uma justificativa neste sentido está voltada à demanda por materiais mais duráveis, ou seja, aqueles que desempenham suas funções preconizadas em projeto, com devida eficiência ao longo de sua útil, visando também uma sustentabilidade ambiental. Para tal é necessário não somente que os materiais sejam projetados de forma correta, mas também que a utilização de matérias primas e meios de processamento, bem como a sua manutenção sejam adequados. Uma das vias para penetração de cloretos ao interior da pasta de cimento, é por meio de uma estrutura de poros do tipo interconectados. Neste sentido, o presente trabalho tem por objetivo apresentar diferentes soluções, segundo a análise de estudos publicados em revistas Qualis A1, que tratem da migração de íons cloreto. Como ferramenta de caracterização da microestrutura, todos os artigos em destaque utilizaram da técnica de microscopia eletrônica de varredura para apresentar e discutir os resultados apresentados.

Palavras-chave: migração de cloretos, microscopia eletrônica de varredura, durabilidade, microestrutura.

ABSTRACT

Currently one of the problems encountered in the corrosion of structures in reinforced concrete is related to the action of the chloride ions on it. This, in turn, acts in the depassivation of a thin protective layer that the paste, highly alkaline Portland cement, forms on the steel. The incidence of this pathological manifestation has returned the interest of scientific research to propose solutions to reduce the permeability of concrete to such deleterious agents. One justification in this sense is the demand for more durable materials, that is, those that perform their functions recommended in project, with due efficiency throughout its life cycle, aiming at also environmental sustainability. This requires not only that the materials are designed correctly, but also that the use of raw materials and processing media as well as their maintenance are appropriate. One of the routes for penetration of chlorides into the cement paste is by means of a pore structure of the interconnected type. In this sense, the present work has as objective to present different solutions, according to the analyses of studies published in journals Qualis A1, that deal with the migration of chloride ions. As a tool to characterize the microstructure, all the articles featured the scanning electron microscopy technique to present and discuss the presented results.

Keywords: migration of chloride, scanning electron microscopy, durability, microstructure.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 3.1 – Desenho esquemático dos componentes do MEV..... | 08 |
| Figura 3.2 – Influência do tempo (idade) de hidratação sobre a permeabilidade, porosidade e resistência..... | 12 |
| Figura 3.3 – Imagem típica de elétron retroespalhado de uma argamassa de cimento Portland (200 dias de idade) com constituintes microestruturais distintos.. | 13 |
| Figura 3.4 – Microscopia da pasta de cimento..... | 15 |
| Figura 3.5 – Imagem de MEV dos cristais de $CA(OH)_2$ na zona de transição..... | 16 |
| Figura 3.6 – Diagrama de Pourbaix para o ferro em solução aquosa..... | 19 |
| Figura 3.7 – Elementos do mecanismo de corrosão..... | 20 |
| Figura 4.1 - Imagens MEV do pó fino de vidro..... | 25 |
| Figura 4.2 - Imagens MEV (a) REF..... | 26 |
| Figura 4.3 - Imagens MEV (b) 30%GP; (c) 60%GP..... | 26 |
| Figura 4.4 – (a) Conteúdo de cloreto; (b) Coeficiente de difusão de cloretos..... | 27 |
| Figura 4.5 – (a) Pós cura (b) Pós ensaio álcali-agregado..... | 29 |
| Figura 4.6 – Relação entre resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos A, B e C; em diferentes idades..... | 30 |
| Figura 4.7 – Imagem MEV da superfície do concreto após 3 meses de imersão em água..... | 30 |
| Figura 4.8 – Corpos de prova após 630 dias de imersão em solução: Apenas sulfato (S): (a) CEMI e (b) CEMI-LF..... | 32 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.9 – Corpos de prova após 630 dias de imersão em solução: Combinação de sulfato e 0,5% de cloreto (SC5): (a) CEMI e (b) CEMI-LF..... | 32 |
| Figura 4.10 – Corpos de prova após 630 dias de imersão em solução: Combinação de sulfato e 1,0% de cloreto (SC10): (a) CEMI e (b) CEMI-LF..... | 32 |
| Figura 4.11 – Corpos de prova após 630 dias de imersão em solução: Combinação de sulfato e 2,0% de cloreto (SC20): (a) CEMI e (b) CEMI-LF..... | 33 |
| Figura 4.12 – MEV – amostra CEMI-LF imersa em SC5..... | 33 |
| Figura 4.13 – MEV – amostra CEMI imersa em SC5..... | 34 |
| Figura 4.14 – MEV – amostra CEMI-LF imersa em SC20..... | 34 |
| Figura 4.15 – MEV – amostra CEMI imersa em SC20..... | 35 |
| Figura 4.16 – MEV – amostra CEMI-LF imersa em SC5..... | 35 |
| Quadro 3.1 – Quadro relativo aos principais compostos do cimento Portland..... | 10 |
| Quadro 3.2 – Limites de composição do cimento Portland..... | 10 |
| Quadro 3.3 – Relação a/c e o tempo de segmentação da rede capilar das pastas de CP..... | 14 |
| Quadro 3.4 – Classes de agressividade ambiental..... | 23 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 4.1 – Dosagem dos corpos de prova..... | 24 |
| Tabela 4.2 – Dosagem dos corpos de prova..... | 28 |
| Tabela 4.3 – Dosagem dos corpos de prova..... | 31 |

LISTA DE UNIDADES

| | |
|--------------------|-----------------------------|
| ° | grau |
| °C | grau Celsius |
| m | metro |
| m ² | metro quadrado |
| µm | micrômetro |
| ml | mililitro |
| mm | milímetro |
| % | porcentagem |
| kg/ m ³ | quilograma por metro cúbico |
| GPa | Giga Pascal |
| MPa | Mega Pascal |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| MEV | Microscopia Eletrônica de Varredura |
| DRX | Difratometria de Raio X |
| NBR | Norma Brasileira |
| a/c | Relação água/cimento |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|----------------------|------------------------------|
| Ca(OH)_2 | Hidróxido de cálcio |
| CaCO_3 | Carbonato de cálcio |
| CaO | Óxido de cálcio |
| CaSO_4 | Sulfato de cálcio |
| CO_2 | Dióxido de carbono |
| CP | Cimento Portland |
| C-S-H | Silicato de cálcio hidratado |
| Fe | Ferro |
| H_2O | Água |
| OH | Hidróxido |

SUMÁRIO

| | |
|---|------|
| RESUMO | vi |
| ABSTRACT | vii |
| LISTA DE ILUSTRAÇÕES | viii |
| LISTA DE TABELAS | x |
| LISTA DE UNIDADES | xi |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS | xii |
| LISTA DE SÍMBOLOS | xiii |
| 1. INTRODUÇÃO | 01 |
| 1.1 Objetivo geral | 02 |
| 1.2 Objetivos específicos | 03 |
| 1.3 Estrutura do trabalho | 03 |
| 2. METODOLOGIA | 05 |
| 3. REVISÃO DA LITERATURA | 07 |
| 3.1 Microscopia Eletrônica de Varredura | 07 |
| 3.2 O Cimento Portland | 09 |
| 3.2.1 A hidratação do cimento Portland | 11 |
| 3.3 O Concreto de Cimento Portland | 13 |
| 3.3.1 A durabilidade e permeabilidade do concreto | 16 |
| 3.4 A Penetração dos íons cloreto no concreto | 17 |
| 3.4.1 Corrosão em concreto armado | 17 |
| 3.4.2 Migração de íons cloreto | 22 |
| 4. EXEMPLOS DE USO DO MEV NO ESTUDO DA MIGRAÇÃO DE CLORETOS EM COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA | 24 |

| | |
|--|-----------|
| 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 37 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 39 |

1

INTRODUÇÃO

O concreto é um material de construção mais usado no mundo. A razão disso está relacionada ao seu baixo custo, na facilidade de lançamento e disponibilidade praticamente universal (NONAT, 2014). Entende-se por concreto um material composto que consiste essencialmente de um meio contínuo aglomerante, dentro do qual estão mergulhadas partículas ou fragmentos de agregados, podendo ou não conter aditivos (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

O cimento hidráulico mais utilizado para fazer concreto é o cimento Portland, composto fundamentalmente de clínquer, sendo este produzido por calcinação a 1450°C de uma mistura finamente moída e homogeneizada de calcário e argila, para formar silicatos de cálcio, como também aluminatos e ferroaluminato tetracálcico; e sulfato de cálcio (NONAT, 2014).

Uma das importantes características da pasta de cimento está em seu caráter básico. Após a mistura de um concreto à base de cimento Portland, os principais compostos anidros do clínquer hidratam-se em contato com a água e, já nos primeiros momentos, pode-se medir um pH bastante básico, na ordem de 13,5 a 14 no líquido intersticial devido à presença, em grande quantidade, de íons OH⁻. Mesmo após o enrijecimento da solução o caráter básico é mantido, devido ao decréscimo da concentração de cal na mesma ao longo do tempo (BAROGHELBOUNY; CAPRA; LURENS, 2014). Este meio favorece a proteção das armaduras de aço contra a corrosão, uma vez que propicia a formação de uma fina camada passiva de óxidos protetores. A penetração de cloretos pode destruir essa passividade, dando início assim a um processo corrosivo na armadura.

A durabilidade do concreto é uma das principais razões da especificação desse material em diversas aplicações. Quando é realizado um controle tecnológico adequado ele se torna estável,

podendo resistir à deterioração ao longo de muitos anos. No entanto, em condições de ataque de origem mecânica, física ou química, sua durabilidade pode ser comprometida (GARCIA, 2015). As características de porosidade afetam diretamente o desempenho dos concretos, estes, quando na forma de poros abertos e interconectados permitem a penetração de agentes agressivos para o interior do mesmo (OLLIVIER; TORRENTI, 2014).

No entanto, é possível definir os objetivos de durabilidade e escolher com precisão as características do concreto em função da agressividade do meio no qual se encontra a estrutura e aperfeiçoar suas propriedades a fim de adaptá-las à duração de uso desejada. As especificações são concernentes ao tipo e à dosagem mínima de cimento, à compacidade mínima, ao valor máximo da relação água/cimento, ao cobrimento mínimo das armaduras e ao teor máximo de cloretos no concreto (ROGEAU; GUIRAUD, 2014). Neste sentido a pesquisa científica vem apresentando novas formulações de concretos, com adições e substituições que buscam proporcionar o desenvolvimento de materiais menos permeáveis e, conseqüentemente, mais duráveis.

A estrutura físico/química do concreto passa por variações com o passar de sua idade, tornando difícil seu estudo sobre a óptica da ciência e engenharia dos materiais. Neste sentido, as técnicas de caracterização estrutural de materiais, dentre elas a microscopia eletrônica de varredura, têm permitido relações entre as dimensões de composição, estrutura e processamento com as suas propriedades, contribuindo fortemente para o desenvolvimento de materiais com melhor desempenho e mais econômicos nos pontos de vista de prejuízos ambientais e econômicos.

1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral apresentar uma análise de diferentes estudos científicos, envolvendo a relevante temática da durabilidade do concreto, mais especificamente no que tange a avaliação da migração de íons cloreto por meio do uso da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

1.2 Objetivos específicos

Este estudo tem como objetivos específicos:

- a) Realizar uma revisão bibliográfica sobre as características físico-químicas do cimento Portland e do concreto, descrevendo como as mesmas influenciam na durabilidade deste material de construção;
- b) Apresentar, a partir de um estudo da literatura, os conceitos e técnicas de ensaios pertinentes a migração de cloretos em concreto e da microscopia eletrônica de varredura;
- c) Avaliar, com base na análise bibliográfica de três artigos diferentes entre si, publicados em revistas Qualis-Periódicos A1;
 - *“Properties of high volume glass powder concrete”*
 - *“Durability of lightweight concrete with expanded glass and silica fume”*
 - *“Impact of chloride-rich environments on cement past mineralogy”*
- d) Descrever as metodologias de pesquisa experimental utilizadas pelos autores e avaliar o efeito da migração de íons cloretos obtida pelos mesmos.

1.3 Estrutura do trabalho

Por se tratar de um trabalho que envolve como estratégia metodológica a revisão bibliográfica, o mesmo encontra-se estruturado em cinco capítulos.

No capítulo 2, são descritos os materiais e os métodos utilizados nesse trabalho.

No capítulo 3, é feita uma revisão da literatura, na qual se procura fornecer uma visão sistêmica em cada um dos seus tópicos, procurando apresentar as informações mais relevantes sobre o tema em estudo. Sendo assim, primeiramente, são apresentados os conceitos básicos referentes às características relacionadas ao cimento Portland, a hidratação da pasta do cimento, as particularidades quanto ao concreto e sua influencia sobre a durabilidade das estruturas em concreto armado. Posteriormente, dando continuidade ao tema, são abordadas questões

relacionadas à migração de íons cloreto em concreto e uma sucinta apresentação sobre a ferramenta de microscopia eletrônica de varredura aplicada em três diferentes trabalhos científicos.

No capítulo 4, é apresentada uma análise crítica com relação aos resultados apresentados no capítulo supracitado, bem como uma interpretação dos artigos, e as discussões realizadas pelos autores nos mesmos quanto à importância do estudo de fatores que influenciem nas propriedades dos materiais e durabilidade.

O capítulo 5 apresenta as considerações finais, e no capítulo 6 são apresentadas as referências bibliográficas deste estudo.

Ao longo de todo o texto, apesar das recomendações da NBR 14724 (ABNT, 2011), a identificação das figuras será feita da maneira clássica, ou seja, aparecerá em sua parte inferior recebendo uma numeração sequencial associada ao capítulo em que se encontra. Do mesmo modo, somente serão explicitadas as fontes de referências que não forem produzidas pelo autor, especificamente para este trabalho.

2

METODOLOGIA

O presente trabalho tem como principal objetivo a análise e discussão de uma seleção de artigos, cuja temática principal das pesquisas científicas tenham sido com enfoque nos efeitos da migração de cloretos em concreto, e, na utilização da técnica de análise microestrutural pela microscopia eletrônica de varredura para verificação de seus efeitos no material. Desse modo, foi estabelecido o método da pesquisa bibliográfica para realização da pesquisa, sendo a mesma de caráter exploratório e descritivo desta área de estudo.

Neste sentido, foi realizada uma pesquisa na literatura nacional e internacional sobre os conceitos e características do concreto e seus constituintes, assim como das definições no que diz respeito a durabilidade e vida útil das estruturas de concreto e sua importância no cenário atual da construção civil. Além disso, procurou-se apresentar como é feita a microscopia eletrônica de varredura.

Para tal, foram consultadas as normatizações técnicas brasileiras que regulam a utilização e fabricação de cimentos e concreto, livros publicados, além de teses, dissertações, revistas e artigos, de Qualis A1, encontrados nos bancos de dados dos portais da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), da Biblioteca da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e em sites de outras universidades, por meio dos seguintes descritores: concreto, cloretos, durabilidade, microscopia eletrônica, *concrete*, *durability*, *chloride*.

Após realizada a busca e coleta dos dados para a elaboração do trabalho, foi realizada uma leitura de toda documentação obtida e posterior seleção daquelas que mais se adequavam aos objetivos do mesmo. A leitura prévia quanto ao tema foi de fundamental importância para que

houvesse um entendimento do objeto de estudo, permitindo assim a aquisição de informações de fato relevantes para a compreensão do assunto.

Por fim, foram selecionados 3 artigos, os quais exemplificam a utilização da ferramenta microscopia eletrônica de varredura, e foram utilizados para a elaboração de análise crítica, de forma qualitativa, sobre a influencia das características físico-químicas do concreto e seus efeitos quando submetidos ao ataque por agentes deletérios, como íons cloreto.

3

REVISÃO DA LITERATURA

O presente capítulo dedica-se à compreensão sobre os aspectos que influenciam a formação da estrutura dos concretos de cimento Portland e suas implicações na propriedade de permeabilidade de agentes deletérios, mais especificamente no caso da migração de íons cloreto. Aborda, portanto, uma revisão geral sobre tal material de construção quanto a sua composição e propriedades. E, apresenta também, com especial destaque, estudos usando da investigação de estruturas de concretos por meio da análise de imagens, obtidas com a ferramenta de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

3.1 Microscopia Eletrônica de Varredura

O microscópio eletrônico de varredura (MEV), em *inglês scanning electron microscopy* (SEM), é um dos mais versáteis instrumentos disponíveis para a observação e análise das características microestruturais de materiais sólidos.

Trata-se de um tipo de microscópio utilizado para a caracterização e análise da microestrutura de amostras, podendo ser empregado em diversos campos do conhecimento, pois, além de gerar imagens com aspecto tridimensional e com alta resolução, fornece informações sobre a natureza química do material, além de permitir a identificação da estrutura, da morfologia, dos elementos químicos e da topografia da superfície da amostra (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007). O uso da técnica de análise imagens em conjunto com MEV tem se tornado, nos últimos anos, uma ferramenta importante para o estudo de materiais cimentícios, tais como argamassas e concretos (CORREIA *et al*, 2014).

O MEV convencional apresenta uma coluna óptico-eletrônica adaptada a uma câmara porta amostra aterrado, sistema eletrônico, detectores e sistema de vácuo, Figura 3.1, (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

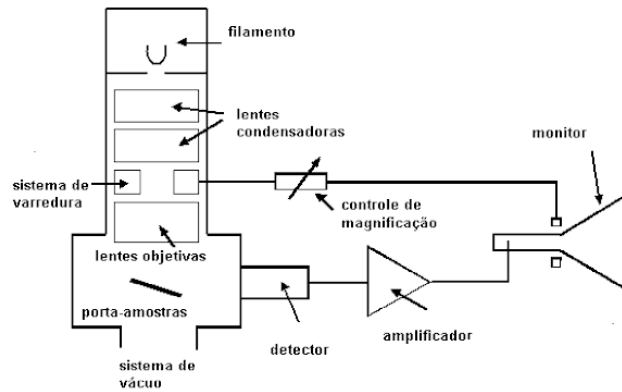


Figura 3.1 – Desenho esquemático dos componentes do MEV
Fonte: DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007, p. 14.

O princípio de funcionamento de um MEV consiste em utilizar um feixe de elétrons de pequeno diâmetro para explorar a superfície da amostra, ponto a ponto, provocando uma série de emissão de radiação. O sinal recolhido pelo detector que transforma o sinal captado em imagem de elétrons retroespalhados (*backscattered electron* – BSE), aqueles que sofreram espalhamento elástico e provêm de camadas mais superficiais da amostra; ou imagem de elétrons secundários (*secondary electrons* – SE), os quais são de baixa energia e (<50eV), e formam imagens com alta resolução (3-5 nm). As imagens obtidas por BSE permitem a caracterização da composição química da amostra e as de SE, além de apresentarem alta resolução, fornecem a topografia de superfície (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

Trata-se de uma técnica fundamental de análise de pastas de cimento Portland, pois permite a identificação das fases e de seus respectivos tamanhos. Os primeiros trabalhos que utilizavam MEV em materiais cimentícios usavam imagens geradas por SE (superfície das amostras eram fraturadas), mas essas apresentavam poucas informações, então, no início da década de 80, começou a ser adotada a utilização de BSE nas pesquisas com este tipo de material (GARCIA, 2015). Em baixas ampliações, podem ser obtidas imagens do arranjo dos agregados, poros grandes, pasta e defeitos. Já em ampliações elevadas, são observadas a morfologia das fases amorfas (C-S-H) e cristalinas (etringita e monossulfatos) e poros de ordem muito pequena. Além disso, a variação de contraste na microestrutura possibilita a quantificação, pela observação das

imagens, dos diferentes constituintes microestruturais (porosidade, anidros e hidratos). Por fim, a combinação do recurso de microscopia com a espectroscopia de energia dispersiva oferecidos pelo equipamento são importantes ferramentas para o estudo da química destes materiais (SCRIVENER, 2004).

3.2 O Cimento Portland

O Cimento Portland é um material de uso expressivo na construção civil. No Brasil, segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – SNIC, foram produzidas aproximadamente 54 milhões de toneladas de cimento no ano de 2017 (SNIC, 2017). Seu emprego no concreto, material mais consumido mundialmente, se dá devido ao seu baixo custo, facilidade de lançamento e disponibilidade (NONAT, 2014).

O cimento Portland é um material aglomerante pulverulento, que se hidrata na presença de água formando uma pasta resistente, capaz de aglutinar agregados dando origem às argamassas e concretos (RIBEIRO; PINTO; STARLING, 2006).

Os cimentos tipo Portland são obtidos através da formação do clínquer, por meio da calcinação, a temperaturas próximas dos 1.500°C, de uma mistura bem proporcionada de calcário (carbonato de cálcio) e argilas (silicatos de alumínio e ferro), assim como uma certa quantidade de gipsita (gesso com grau de finura elevado), material controlador de pega, e, eventualmente, de substâncias ricas em sílica, alumina ou ferro (SOUZA; RIPPER, 1998).

É um ligante hidráulico, obtido a partir do processo de moagem do clínquer Portland, em conjunto de uma ou mais formas de sulfato de cálcio, com proporções que variam de 3% a 5% em massa e, conforme o tipo de cimento, podem haver eventuais adições ativas durante a sua fabricação (BATTAGIN; BATTAGIN, 2017).

A composição mineralógica média do clínquer de cimento Portland está apresentada no Quadro 3.1. Para efeitos de notação cimentícia, cabe ressaltar que na química dos cimentos costuma-se utilizar uma nomenclatura particular para demonstrar as transformações químicas, as quais utilizam a inicial dos óxidos em lugar dos símbolos clássicos (NONAT, 2014).

Quadro 3.1 – Quadro relativo aos principais compostos do cimento Portland

| Constituinte | Notação cimentícia | Fórmula química | % em massa das diferentes fases no clínquer |
|------------------------------|--------------------|---|---|
| Silicato Tricálcico | C ₃ S | Ca ₃ SiO ₅ | 60-65 |
| Silicato Dicálcico | C ₂ S | Ca ₂ SiO ₄ | 10-20 |
| Aluminato Tricálcico | C ₃ A | Ca ₃ Al ₂ O ₆ | 8-12 |
| Ferro Aluminato Tetracálcico | C ₄ AF | Ca ₄ Al ₂ Fe ₂ O ₁₀ | 8-10 |

Fonte: Adaptado de NONAT, 2014, p. 18.

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 16697:2018, os cimentos Portland são designados por seu tipo que correspondem a adições e propriedades especiais. O Quadro 3.2 estabelece os limites mínimos e máximos admissíveis na composição de cada tipo de cimento (ABNT, 2018).

Quadro 3.2 – Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa)

| Designação normatizada | Sigla | Classe de resistência | Sufixo | Clínquer + sulfatos de cálcio | Escória granulada de alto-forno | Material Pozolânico | Material carbonático |
|--|----------------|---------------------------|------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------|----------------------|
| Cimento Portland comum | CP I | 25, 32 ou 40 ^c | RS ^a | 95 – 100 | 0 – 5 | | |
| | CP I-S | | | 90 - 94 | 0 | 0 | 6 – 10 |
| Cimento Portland composto | CP II-E | | | 51 - 94 | 6 - 34 | 0 | 0 – 15 |
| | CP II-F | | | 71 - 94 | 0 | 6 - 14 | 0 – 15 |
| | CP II-Z | | 75 - 89 | 0 | 0 | 11 – 25 | |
| Cimento Portland de alto-forno | CP III | | BC ^b | 25 - 65 | 36 - 75 | 0 | 0 - 10 |
| Cimento Portland pozolânico | CP IV | | | 45 - 85 | 0 | 15 - 50 | 0 – 10 |
| Cimento Portland de alta resistência inicial | CP V | | ARI ^d | | 90 - 100 | 0 | 0 |
| Cimento Portland Branco | Estrutural | CPB | | 75 - 100 | - | - | 0 – 25 |
| | Não estrutural | CPB | - | 50 - 74 | - | - | 26 – 50 |

^a O sufixo RS significa resistente a sulfatos e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos na norma, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.

^b O sufixo BC significa baixo calor de hidratação e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos na norma, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.

^c As classes 25, 32 e 40 representam os valores mínimos de resistência à compressão aos 28 dias de idade, em megapascais (MPa), conforme método de ensaio estabelecido pela ABNT NBR 7215.

^d Cimento Portland de alta resistência inicial, CP V, que apresenta a 1 dia de idade resistência igual ou maior que 14 MPa, quando ensaiado de acordo com a ABNT NBR 7215 e atende aos demais requisitos estabelecidos nesta.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16697, 2018, p. 9.

A produção de cimentos Portland com adições minerais, como escoria de alto forno, cinza volante, pozolanas artificiais e filer calcário, apresenta inúmeras vantagens técnicas

relacionadas com a maior durabilidade de estruturas de concreto, devido às características de baixa permeabilidade, resistência ao ataque de cloretos e sulfatos, prevenção das reações álcali-agregado, elevada resistência à compressão em idades mais avançadas, além de diversificar as aplicações e características específicas do cimento (SILVA; BATAGGIN; GOMES, 2017).

Considerando os desafios de produção de cimento em um cenário de necessidade de redução de impactos ambientais, o uso de adições minerais permite diminuir as emissões de CO₂ e de outros gases de efeito estufa, além de minimizar a extração de jazidas esgotáveis e, também em função da redução de consumo de clínquer, diminui-se a queima de combustíveis, com repercussão relevante na economia de energia (SILVA; BATAGGIN; GOMES, 2017).

3.2.1 A Hidratação do cimento Portland

O cimento Portland anidro não aglomera areia e agregado graúdo; ele só adquire a propriedade adesiva quando misturado à água. Isso acontece porque a reação química do cimento com a água, comumente chamada de hidratação do cimento, gera produtos que possuem características de pega e endurecimento (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

O mecanismo de hidratação inicia-se com a dissolução do grão anidro em meio aquoso, que forma espécies químicas diferentes. Quando a dissolução atinge o nível de saturação, ocorre a combinação entre essas espécies químicas e a água, levando a precipitação de sólidos hidratados. As fases precipitadas possuem composições diferentes daquelas presentes nos constituintes dos ligantes originais. O mecanismo de dissolução-precipitação continua enquanto houver água suficiente. Assim, pequenos núcleos de produtos hidratados formados inicialmente vão crescendo, unindo-se uns aos outros e formando um novo sólido contínuo (SILVA; BATAGGIN; GOMES, 2017).

Quanto à formação dos produtos de hidratação, imediatamente após o contato do cimento com a água, ocorre a dissolução dos álcalis, sulfatos e aluminatos, com a formação de etringita e grande desprendimento de calor, esta reação tem sua velocidade diminuída rapidamente, e durante o período de indução a concentração dos íons Ca⁺² atinge a supersaturação em seus instantes iniciais. Neste estágio são formadas finas camadas de C-S-H, silicato de cálcio hidratado, ao redor de partículas de clínquer e CH, cálcio hidratado (SILVA, 1995).

Os aluminatos são conhecidos por hidratarem muito mais rapidamente que os silicatos. Sendo assim, o enrijecimento (perda de consistência) e a pega (solidificação) características da pasta de cimento Portland, são amplamente determinados por reações de hidratação envolvendo os os mesmos. Por outro lado, os silicatos, que compõe aproximadamente 75% do cimento Portland comum, têm papel importante na determinação das características de endurecimento (taxa de desenvolvimento de resistência) (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

A velocidade de reação do C_2S é inferior à do C_3S porque a estrutura cristalina do silicato dicálcio é muito menos aberta, o que torna a penetração das moléculas de água dentro do reticulado cristalino mais lenta. No entanto, a velocidade mais baixa de reação do C_3A , em presença de gesso, é geralmente atribuída à formação de uma película de etringita que, recobrando os grãos anidros de C_3A , diminui sensivelmente sua velocidade de hidratação (SILVA, 1995). Deve ser enfatizado que o processo pelo qual o cimento endurece não é um processo de secagem, mas de hidratação, no qual a água participa efetivamente em uma reação química de união (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Desse modo, o subsequente decréscimo da concentração de íons Ca^{+2} na fase líquida renova a aceleração da dissolução do C_3S , sendo liberada grande quantidade de calor, a porosidade total da pasta decresce devido à contínua deposição de C-S-H e outros produtos de hidratação, que produzem a solidificação da pasta de cimento (SILVA, 1995). Na Figura 3.2 apresenta-se a influência do tempo de hidratação sobre a permeabilidade, porosidade e resistência da pasta de cimento.

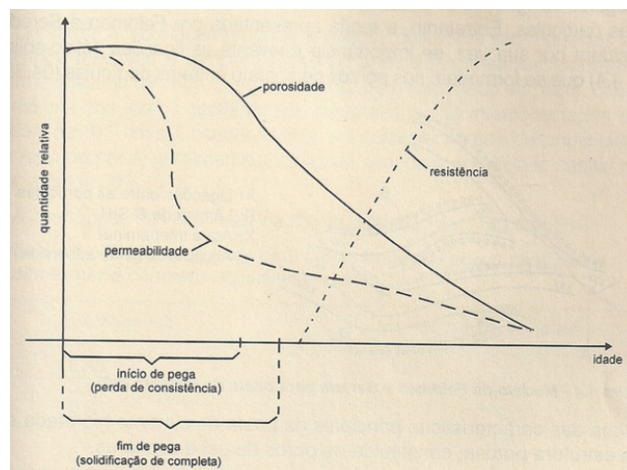


Figura 3.2 – Influência do tempo (idade) de hidratação sobre a permeabilidade, porosidade e resistência

Fonte: SILVA, 1995, p. 29.

Em termos de interpretação e análise da microestrutura, em imagens obtidas por MEV, é possível observar distintas fases. O CH precipita nos poros cheios de água, enquanto os depósitos de C-S-H em torno dos grãos de cimento, como pode-se observar na Figura 3.3.

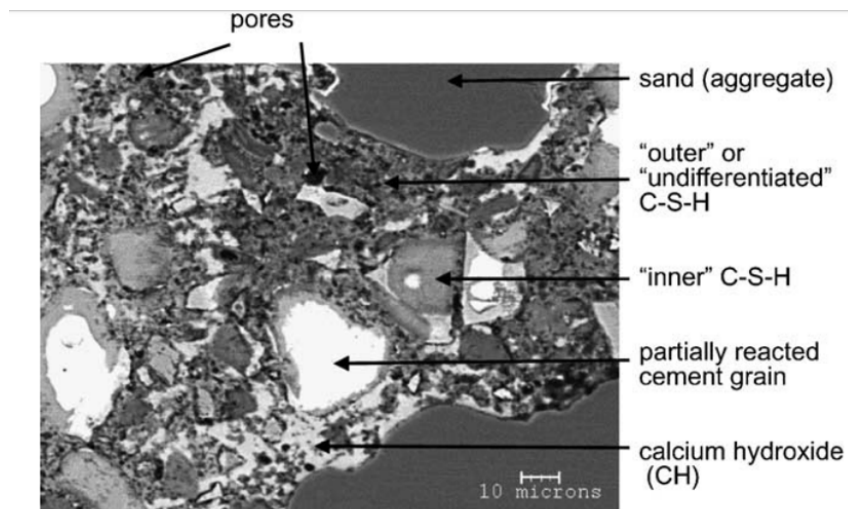


Figura 3.3: Imagem típica de elétron retroespalhado de uma argamassa de cimento Portland (200 dias de idade), com constituintes microestruturais distintos

Fonte: SCRIVENER, 2004, p. 937.

As características de finura ou a área específica também são importantes para a solubilidade. Em primeiro lugar, a área de contato do grão com a água é fundamental na cinética da reação e na precipitação de compostos hidratados, de tal modo que, dentro de certos limites, o aumento da área específica aumenta a velocidade de evolução da resistência mecânica e assegura propriedades e características importantes da mistura no estado fresco, como a trabalhabilidade, coesão e redução de exsudação. Por outro lado, o aumento da quantidade de partículas muito finas de elevada energia superficial deve também ser controlado para não prejudicar a mistura ou exigir grande quantidade de água ou uso de aditivos (SILVA; BATTAGIN; GOMES, 2017).

3.3 O Concreto de Cimento Portland

O material mais largamente utilizado na indústria da construção civil é o concreto, este consiste essencialmente de um meio contínuo aglomerante, dentro do qual são mergulhadas partículas ou fragmentos de agregados (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Ou seja, obtido pela composição do cimento, agregados e água, podendo conter aditivos que também influenciam o seu desempenho (AMBROZEWICZ, 2012). A proporção dos seus componentes (dosagem ou

traço) devem atender às condições requeridas de resistência, trabalhabilidade e durabilidade, que são propriedades fundamentais do concreto (RIBEIRO; PINTO; STARLING, 2006).

Quando o cimento é adicionado à água, forma-se uma pasta que envolve as partículas de agregados com diversas dimensões para produzir um material que nas primeiras horas, apresenta um estado capaz de ser moldado em fôrmas das mais variadas formas geométricas. Com o tempo, a mistura endurece pela reação irreversível de água com o cimento, adquirindo resistência mecânica capaz de torna-lo um material de excelente desempenho estrutural, sob os mais diversos ambientes de exposição (HELENE; ANDRADE, 2017).

As condições de hidratação do cimento são fundamentais para o bom desempenho e de durabilidade do concreto. A umidade do ambiente exerce grande influencia sobre a hidratação do cimento e sobre a microestrutura que se desenvolve. No Quadro 3.3 aponta-se o tempo de hidratação necessário para segmentar (interromper) a rede de poros capilares. Assim, é importante proteger o concreto fresco (cura) de uma saída brusca de água durante os períodos indicados. A estrutura porosa do cimento hidratado é constituída de poros capilares e de poros intrínsecos dos produtos de hidratação. A dimensão dos poros capilares, por ser muito maior, propicia um desempenho preponderante por parte dos mesmos nos mecanismos de transporte e durabilidade. Sendo assim, a relação água/cimento deve ser dimensionada com cautela (OLLIVIER; TORRENTI, 2014).

Quadro 3.3 Relação a/c e o tempo de segmentação da rede capilar das pastas de CP

| Relação a/c | Duração da hidratação |
|--------------------|------------------------------|
| 0,40 | 3 dias |
| 0,45 | 7 dias |
| 0,50 | 14 dias |
| 0,60 | 6 meses |
| 0,70 | 1 ano |
| >0,70 | Não ocorre segmentação |

Fonte: Adaptado de OLLIVER; TORRENTI, 2014, p. 58.

Para que sejam obtidas características essenciais do concreto, tais como facilidade de manuseio quando fresco, boa resistência mecânica, durabilidade e impermeabilidade quando endurecido,

é fundamental conhecer alguns fatores que influenciam em sua qualidade. Dentre eles, cabe ressaltar a boa qualidade dos materiais para produção do concreto; proporcionamento adequado das quantidades de cimento, agregados e água; sua manipulação adequada desde a mistura até o transporte e lançamento; cálculo estrutural; execução das fôrmas; execução da armadura (quando se trata do tipo concreto armado); concretagem e cura cuidadosa (AMBROZEWICZ, 2012).

A nível microscópico, na presença de agregado, a estrutura da pasta, na vizinhança de partículas grandes de agregado, é comumente muito diferente da estrutura da matriz de pasta ou argamassa do sistema. Sendo assim, muitos aspectos do comportamento do concreto, sob diferentes condições, podem ser explicados somente quando a pasta cimento-agregado é tratada como uma terceira fase da estrutura (zona de transição) do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

A micrografia da Figura 3.4, obtida pelo MEV, através de elétrons secundários, apresenta parte da microestrutura do cimento hidratado, evidenciando o C-S-H, $CA(OH)_2$ e os vazios capilares.

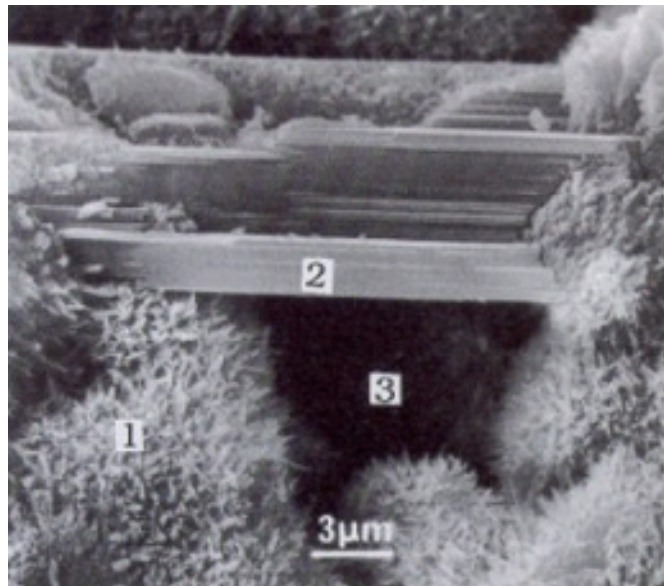


Figura 3.4: Microestrutura da pasta de cimento
Fonte: SILVA *apud* MORANVILLE, 2005, p. 21.

A zona de transição é caracterizada por ser uma região com maior porosidade e heterogeneidade que o restante da pasta. Este aumento na quantidade de poros é atribuído à elevação da relação a/c na mistura, em decorrência do filme de água que se forma ao redor do agregado graúdo. Os

espaçamentos maiores permitem a formação de grandes cristais de Ca(OH)_2 , Figura 3.5 (MEHTA; MONTEIRO, 1994)

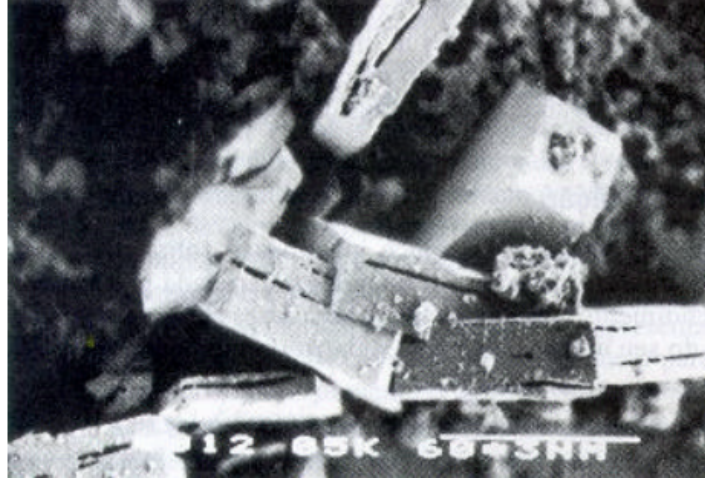


Figura 3.5: Imagem de MEV dos cristais de Ca(OH)_2 na zona de transição.
Fonte: MEHTA, MONTEIRO, 1994, p. 38.

3.3.1 A Durabilidade e permeabilidade do concreto

Uma vez que o concreto é tido como o material mais utilizado na indústria da construção civil, há uma visível preocupação em torno de sua durabilidade e vida útil. Quando o mesmo é produzido sem a devida cautela, podem haver implicações futuras como o aparecimento prematuro de manifestações patológicas, causando assim graves problemas quanto a sua segurança e duração.

A durabilidade do concreto de cimento Portland é definida como sua capacidade de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração; isto é, o concreto durável conservará sua forma original, qualidade e capacidade de utilização quando exposto ao seu meio ambiente (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Segundo a ABNT NBR 6118:2014, a durabilidade das estruturas de concreto requer cooperação e atitudes coordenadas de todos os envolvidos nos processos de projeto, construção e utilização (ABNT, 2014).

Sendo assim, as estruturas de concreto devem ser projetadas e constituídas de modo que, sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado do mesmo, conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o prazo correspondente à sua vida útil (ABNT, 2014).

De modo geral, a durabilidade do concreto pode ser atribuída, em grande parte, à dificuldade de penetração dos agentes agressivos na rede de poros do mesmo (OLLIVIER; TORRENTI, 2014). Sob condições adversas, o concreto é potencialmente vulnerável a diversas ações, tais como: gelo, ataque por sulfato, reação álcali-agregado e corrosão do aço. Cada um desses processos envolve o movimento de água ou outros fluidos, transportando agentes agressivos através da estrutura porosa do concreto (SILVA, 2000). Dessa forma, a durabilidade é uma característica imprescindível do concreto, para isso, o volume de vazios no interior da massa deve ser o mínimo possível, diminuindo assim a permeabilidade, dificultando a penetração de substâncias agressivas (AMBROZEWICZ, 2012).

A permeabilidade de um material é definida pela aptidão deste de permitir a passagem de um fluido, quando sujeito a um gradiente de pressão. Trata-se, portanto, de uma propriedade macroscópica dos materiais porosos que contêm uma porosidade aberta interconectada. Concretos duráveis são, em geral, concretos de baixa permeabilidade, na medida em que uma permeabilidade menor limita a penetração de agentes agressivos para o interior do concreto (OLLIVIER; TORRENTI, 2014).

3.4 A penetração dos íons cloro no concreto

Existem três fluidos muito importantes para a durabilidade que podem penetrar no concreto: a água, pura ou com íons agressivos, o gás carbônico e o oxigênio. Eles podem se movimentar através do concreto de diferentes formas, mas todo transporte depende, essencialmente, da estrutura da pasta de cimento hidratada (NEVILLE, 2016).

3.4.1 Corrosão em concreto armado

O concreto armado é largamente utilizado há mais de um século, porque se trata de um material de construção versátil, econômico e durável. A utilização de armaduras de aço nas zonas tracionadas, em razão da baixa resistência à tração do concreto, permite a concepção de estruturas para os mais variados empregos, sendo um dos papéis do concreto o de fornecer à armadura um ambiente protetor (BAROGHEL-BOUNY; CAPRA; LAURENS, 2014).

A corrosão do aço no concreto tem merecido atenção especial, devido à grande ocorrência em certos tipos de estruturas e altos custos de reparos. A corrosão foi primeiramente observada em estruturas inseridas em atmosfera marinha (SILVA, 1995).

Para o processo corrosivo iniciar-se, um certo período de tempo é normalmente requerido, e esse é denominado de “período de iniciação”. O intervalo de tempo ou comprimento desse período é função da rapidez de neutralização da alcalinidade ou penetração de substâncias agressivas, no concreto circundante ao aço, e da concentração dessas substâncias, as quais são requeridas para iniciar o processo corrosivo. Dentre as diversas substâncias agressivas, os S^{2-} (sulfetos), Cl^- (cloretos), CO_2 (dióxidos de carbono), NO_3^- (nitritos), SO_2 e SO_3 (óxidos de enxofre), fuligem, etc.; podem estar contidos ou serem adsorvidos pelo concreto. As substâncias agressivas não permitem a formação de película passivadora ou a destroem, caso exista, acelerando dessa forma a corrosão (SILVA, 1995).

O período de iniciação é capital no tocante à preservação das armaduras, uma vez que é ele que controlará o início dos fenômenos de corrosão. Considerando que o cobrimento no concreto é um elemento essencial de proteção, apenas controlar sua espessura na necessariamente garantirá a durabilidade. Suas características de transporte (permeabilidade, difusividade) são essenciais, na medida em que asseguram sua função efetiva de barreira contra a entrada dos agentes agressivos. O ambiente (temperatura, umidade) exerce, igualmente, um papel importante sobre a resistência dessa barreira (BAROGHEL-BOUNY; CAPRA; LAURENS, 2014).

O concreto normalmente, proporciona uma excelente proteção à corrosão do aço. A alta alcalinidade da solução dos poros do concreto, $pH \geq 12,5$, a qual circunda o aço, resulta na formação, sobre a superfície deste, de uma película ou capa passivadora. Esta película passivante, caracteriza-se por ser constituída de óxidos (na maioria das vezes), ter espessura na ordem de $0,4 \text{ \AA}$, baixa condutividade iônica (para evitar a reação de corrosão), baixa solubilidade, boa aderência ao aço, largo espectro de potenciais no qual permanece estável (ela só é estável quimicamente em meio alcalino). Quando o pH cai abaixo de 11 (carbonatação) ou em presença de cloretos, essa película pode ser destruída (SILVA, 1995).

O aço é dito passivo, quando ele resiste substancialmente à corrosão, em um meio onde existe uma grande tolerância termodinâmica para a passagem do estado metálico para o iônico, Figura 3.6, (SILVA, 1995).

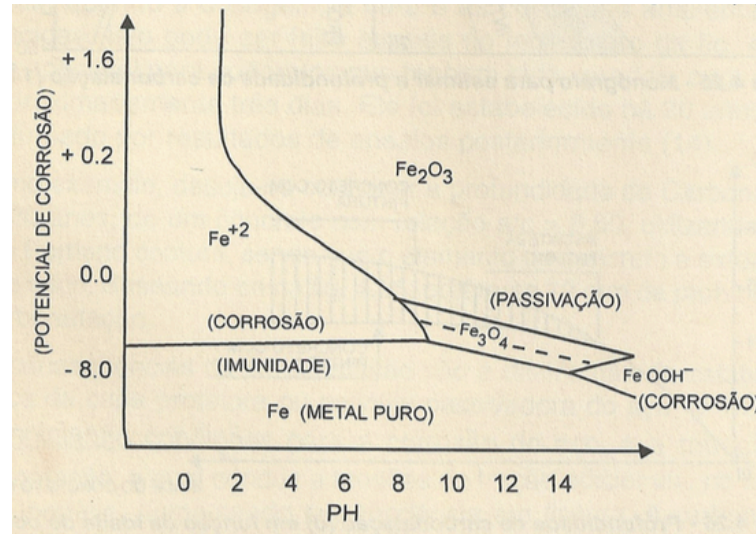


Figura 3.6 – Diagrama de Pourbaix para o ferro em solução aquosa
Fonte: SILVA, 1995, p. 76.

Além da formação da película microscópica passivante, o concreto pode ser proporcionado para ter uma baixa permeabilidade, a qual minimiza a penetração de substâncias que induzem a corrosão. A baixa permeabilidade também aumenta a resistividade elétrica do concreto, a qual impede o fluxo das correntes corrosivas eletroquímicas. Por causa desta proteção inerente, a corrosão do aço não ocorre na maioria dos elementos de concreto ou estruturas (SILA, 1995).

O aço embutido na pasta de cimento hidratada rapidamente forma uma fina camada de passivação. Essa camada de óxido ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$) adere fortemente ao aço e confere a ele uma proteção completa contra a reação com o oxigênio e a água, ou seja, contra a ocorrência de corrosão. A manutenção desse estado é condicionada, portanto, a um pH adequadamente elevado da água nos poros em contato com a camada de passivação. Desse modo, quando o pH baixo atinge a região próxima à armadura, o filme de óxido protetor é removido, possibilitando a ocorrência da corrosão, desde que haja o oxigênio e a umidade necessários para as reações (NEVILLE, 2016).

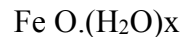
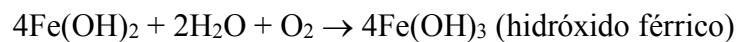
A corrosão do aço no concreto é um processo eletroquímico. Os potenciais eletroquímicos para formar as células de corrosão podem ser gerados de duas formas (MEHTA; MONTEIRO, 1994):

- Células de composição podem ser formadas quando dois metais diferentes embutidos no concreto, tais como barras de aço e eletrodutos de alumínio, ou quando existem variações significativas nas características superficiais do aço;

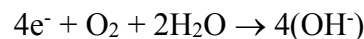
- Células de concentração podem ser formadas devidas diferenças na concentração de íons dissolvidos na vizinhança do aço, tais como álcalis, cloretos e oxigênio.

Como resultado, um dos dois metais (ou algumas partes do metal quando apenas um metal está presente) torna-se anódico e o outro, catódico. As mudanças químicas fundamentais que ocorrem nestas áreas são:

Reações anódicas:



Reações catódicas:



Essas reações são desencadeadas quando ocorre a despasseivação do aço, e na presença de um eletrólito e de oxigênio, além da diferença de potencial. Os cátions ferrosos formados pela dissolução do metal na fase anódica são transferidos para a solução dos poros, enquanto os elétrons livres migram para a fase catódica, e, na presença de água (eletrólito), ocorre a formação dos íons hidroxila (OH^{-}). Como existe uma contínua migração de íons através do eletrólito, ocorre a formação de ferrugem (produto da corrosão) pela combinação entre os íons hidroxila e os íons ferrosos, Figura 3.7, (CRAUSS, 2010).

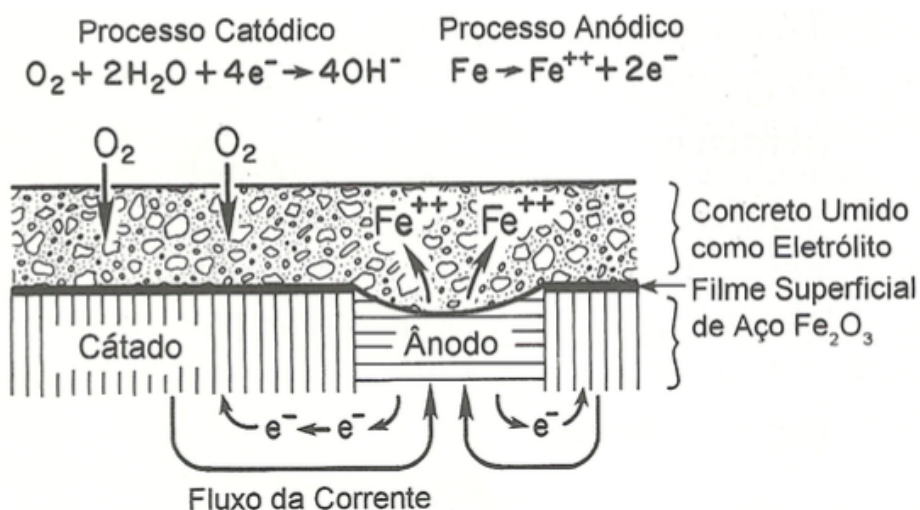


Figura 3.7 – Elementos do mecanismo de corrosão

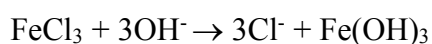
Fonte: Mehta; Monteiro, 1994, p. 170.

A transformação do aço metálico em ferrugem é acompanhada por um aumento no volume o qual, dependendo do estado de oxidação, pode ser até 600% do metal original. Acredita-se que esse aumento de volume seja a principal causa da expansão e fissuração do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

A corrosão das armaduras nas estruturas de concreto pode ser induzida por dois fenômenos distintos. Pela carbonatação do concreto, dada pelo avanço de uma frente de CO₂ da superfície em direção ao interior do concreto ou pela penetração de íons cloreto, caso das estruturas em ambiente marinho (presentes em zonas de maré, sujeitas a respingos ou à nevoa salina) ou expostas aos sais de degelo nos ambientes sujeitos à neve e ao gelo (contato direto, projeções, escoamento etc. (BAROGHEL-BOUNY; CAPRA; LAURENS, 2014). Ela pode ser classificada quanto ao seu aspecto e distribuição, podendo ocorrer de forma generalizada, em toda região da barra, ou de forma localizada, que pode estar associada à despassivação pontual do aço, resultante da ação de cloretos ou fissuras, chamada de corrosão por pites (HELENE, 1990).

A contaminação por íons cloreto pode ocorrer da própria composição do concreto, devido a presença dos mesmos na água ou mesmos nos agregados e aditivos que por ventura contenham CaCl₂. Ou ainda podem estar presentes no ambiente, como citado acima. Os cloretos são encontrados no concreto em formas diferentes: combinados quimicamente ao C-S-H ou como cloroaluminatos (sal de Friedel), adsorvidos fisicamente às paredes dos poros, ou livres na solução dos mesmos no concreto. Mesmo que apenas os cloretos livres sejam capazes de despassivar e desencadear o processo corrosivo das armaduras, uma parte dos cloretos combinados pode se tornar disponível às reações de corrosão, em condições que favoreçam, como em temperaturas elevadas ou ocorrência de carbonatação (CRAUSS, 2010).

Os íons cloreto são especialmente agressivos, pois, diferentes das soluções ácidas, eles podem proporcionar a danificação das armaduras mesmo em condições de alta alcalinidade da solução dos poros, visto que tais íons não são consumidos no processo corrosivo, permanecendo então disponíveis para novas reações, conforme abaixo (HELENE, 1993).



O íon cloreto participa da reação apenas como catalisador para a formação do óxido expansivo, sendo liberados para novas reações, permitindo assim o desenvolvimento da corrosão. Este processo tende à geração de microfissuras na camada de revestimento, devido a forças expansivas da formação da ferrugem, que expõe ainda mais a estrutura à entrada deste agente corrosivo, a tal ponto de ocorrerem manifestações como lascamentos e deslocamentos do concreto que recobre as armaduras (CRAUSS, 2010).

3.4.2 Migração de íons cloreto

O mecanismo de migração iônica dos cloretos, um processo eletrólito, é governado pela condutividade da solução dos poros, o que depende da concentração dos diversos íons presentes nessa solução.

A penetração dos íons cloreto no concreto requer a presença de uma fase líquida. Em meio saturado como, por exemplo, em estruturas imersas na água do mar, os cloretos penetram no concreto por difusão, regidos por um gradiente de concentração (entre a superfície contendo cloretos e o interior, que é isento desses íons). Quando a estrutura de concreto está submetida a ciclos de molhagem e secagem (zonas de maré, exposição à nevoa salina ou aos sais de degelo), os cloretos podem penetrar no concreto por absorção capilar e migrar, com a fase líquida, por convecção para dentro da zona atingida pelos ciclos (BAROGHEL-BOUNY; CAPRA; LAURENS, 2014).

Segundo a norma ABNT NBR 6118, Projeto de estruturas de concreto: Procedimentos (ABNT, 2014):

a despassivação por ação de cloretos consiste na ruptura local da camada de passivação, causada por elevado teor de íon-cloro. As medidas preventivas consistem em dificultar o ingresso dos agentes agressivos ao interior do concreto. O revestimento das armaduras e o controle da fissuração minimizam este efeito, sendo recomendável o uso de um concreto com pequena porosidade. O uso de cimento composto com adição de escória ou material pozzolânico é também recomendável nestes casos

Ainda segundo a norma ABNT 6118 (ABNT, 2014), nos projetos de estruturas correntes, a agressividade ambiental deve ser classificada de acordo com os riscos apresentados no Quadro 3.4, e pode ser avaliada (de maneira simples), segundo suas condições de exposição. Neste caso, as estruturas expostas à cloretos se enquadram na classe de agressividade III ou IV, forte e elevado.

Quadro 3.4 Classes de agressividade ambiental

| Classe de agressividade ambiental | Agressividade | Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto | Risco de deterioração da estrutura |
|--|----------------------|---|---|
| I | Fraca | Rural | Insignificante |
| | | Submersa | |
| II | Moderada | Urbana ^{a,b} | Pequeno |
| III | Forte | Marinha ^a | Grande |
| | | Industrial ^{a,b} | |
| IV | Muito forte | Industrial ^{a,c} | Elevado |
| | | Respingos de maré | |

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestidos com argamassa e pintura).

^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: Adaptado de ABNT, 2014, p.17.

4

EXEMPLOS DE USO DO MEV NO ESTUDO DA MIGRAÇÃO DE CLORETOS EM COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA

Du e Tan (2017), no artigo intitulado “*Properties of high volume glass powder concrete*”, publicado na revista *Cement and Concrete Composites*, discutiram a utilização de materiais com propriedades cimentícias em substituição ao cimento Portland em concreto. Dos estudos preliminares à pesquisa realizada, foi destacada a importância do reaproveitamento de resíduos da indústria na fabricação de cimento, tendo em vista questões ambientais com relação a disposição de resíduos sólidos e redução de consumo de clínquer. Neste sentido, foram moldados concretos, em diferentes dosagens de substituição com 0% (referência), 15%, 30%, 45% e 60%, de cimento Portland por pó fino de vidro, conforme Tabela 4.1. Também foram moldados corpos de prova sem agregados, para verificação da atividade pozolânica do resíduo (DU; TAN, 2017).

Tabela 4.1 Dosagem dos corpos de prova

| Amostra | Dosagem (kg/m ³) | | | | | |
|---------|------------------------------|---------|-------------|-----------------|----------------|-----------------------------|
| | Água | Cimento | Pó de vidro | Agregado Graúdo | Agregado miúdo | Aditivo super plastificante |
| REF | 185 | 380 | 0 | 825 | 960 | 3.8 |
| 15GP | 185 | 323 | 57 | 825 | 948 | 3.2 |
| 30GP | 185 | 266 | 114 | 825 | 936 | 3.0 |
| 45GP | 185 | 209 | 171 | 825 | 925 | 3.9 |
| 60GP | 185 | 152 | 228 | 825 | 913 | 4.5 |

Fonte: Adaptado de DU; TAN, 2017, p. 24.

Para a reciclagem, o resíduo passou previamente por moagem, para obtenção da finura desejada. Para ilustrar a textura da amostra, usou-se a microscopia eletrônica de varredura, com imagem obtida pela detecção de elétrons secundários, Figura 4.1 (DU, TAN, 2017).

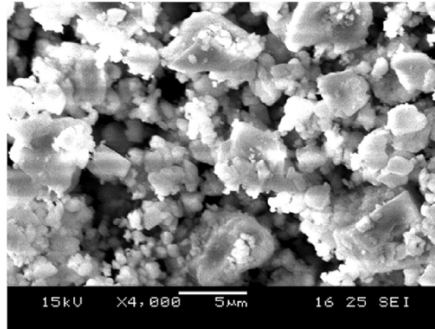


Figura 4.1 Imagem MEV do pó fino de vidro
Fonte: Du; Tan, 2017, p. 23.

A investigação do desempenho das amostras de concreto, todos os espécimes foram armazenados em água até a idade da realização dos ensaios de 7, 28 e 365 dias. As normas utilizadas pelos autores foram da ASTM (*American Society for Testing and Materials*). Para determinação da resistência à compressão, ASTM C 39; porosidade, ASTM C 642; taxa de absorção de água, ASTM C 1585 (DU, TAN, 2017).

Para avaliar a resistência à penetração de cloretos, foram realizados testes acelerados e não acelerados, segundo as normas ASTM 1202 e NT Build 492, respectivamente. O coeficiente de difusão de cloreto foi calculado analisando-se o teor de cloretos em diferentes profundidades do concreto, sendo determinado a cada 10 mm de profundidade e seguindo os parâmetros designados pela NT Build 443 (para penetração acelerada de cloreto) (DU, TAN, 2017).

Dos ensaios realizados, verificou-se que quanto maior foi o teor de substituição de pó de vidro, menor foi a quantidade de hidróxido de cálcio identificada, indicando que os produtos da hidratação do cimento reagiram com o resíduo, numa reação pozolânica, com destaque para valores em torno de 45%GP. Tal incremento e redução dos íons Ca^{+2} propiciaram uma redução do pH na solução dos poros do concreto (DU, TAN, 2017).

Quanto a permeabilidade a água, em função do volume total de poros abertos e maiores que 100 nm, a mesma foi aumentada continuamente às maiores substituições de cimento por pó de

vidro, ou seja, o volume de poros foi aumentado conforme se incrementava resíduo (DU, TAN, 2017). É importante ressaltar que poros abertos (com distribuição e tamanho suficientes) são caminhos para água, bem como íons para permear o concreto.

Além do estudo da porosidade, foram observadas, por MEV, amostras planas de concreto referência e com os teores de 30% e 60% de substituição. Comparativamente, os autores identificaram que para o concreto de referência, Figura 4.2 (a), uma microestrutura mais porosa pôde ser observada, certamente devido a uma maior relação água/cimento.

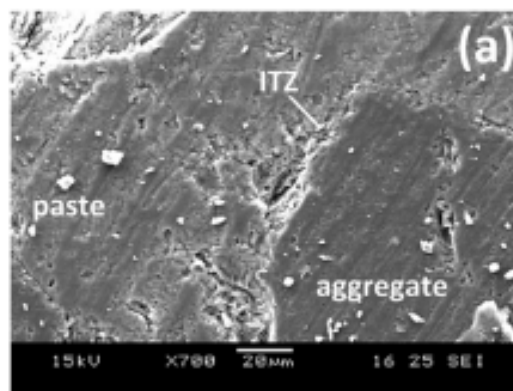


Figura 4.2 Imagem MEV: (a) REF
Fonte: DU; TAN, 2017, p. 26.

Em contrapartida, as microestruturas das interfaces da amostra com 30% de pó de vidro, Figura 4.3 (b), e 60%, Figura 4.3 (c), se mostraram mais compactas, demonstrando que a reação pozolânica do vidro possibilitou a formação de uma pasta mais densa, devido a formação de C-S-H. Demonstrando que a utilização deste material alternativo pode possibilitar uma melhoria nas características de durabilidade do concreto, deste que usado em dosagens adequadas (DU, TAN, 2017).

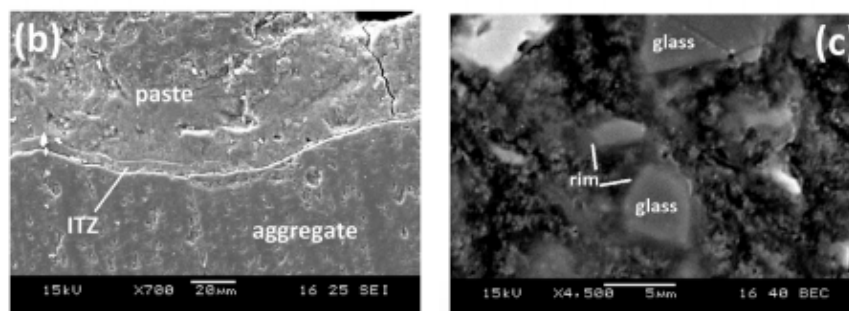


Figura 4.3 Imagem MEV: (b)30%GP; (c)60%GP
Fonte: DU; TAN, 2017, p. 26.

No que tange aos resultados relativos à migração e difusão de íons cloretos, os autores observaram que a amostra de referencia foi a que apresentou teores mais altos, no ensaio realizado com 56 dias de imersão. As curvas apresentam os perfis obtidos para conteúdo, Figura 4.4 (a), e difusão de cloretos, Figura 4.4 (b) (DU, TAN, 2017).

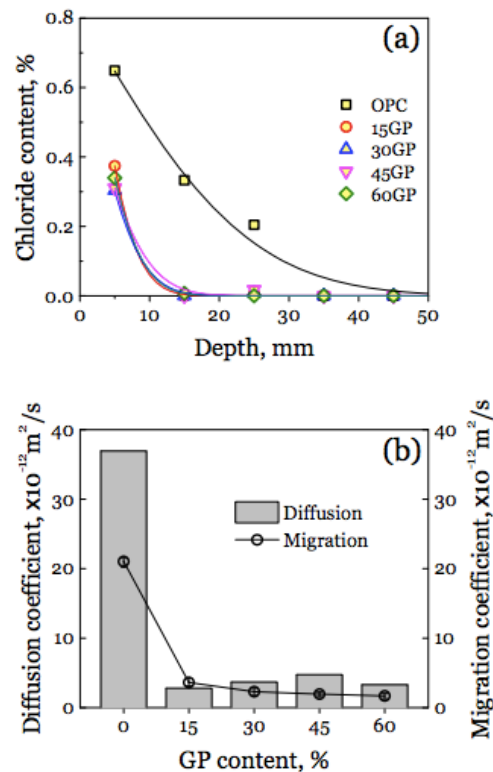


Figura 4.4 (a) Conteúdo de cloreto;
(b) Coeficiente de difusão de cloretos
Fonte: DU; TAN, 2017, p. 28.

Por fim, concluiu-se que a utilização de pó de vidro, como um substituinte do cimento Portland em concreto pode ser uma rota viável para reduzir a disposição deste passivo ambiental e auxilia no desempenho e durabilidade de concretos (DU, TAN, 2017).

Carsana e Bertolini (2017), no artigo “Durability of lightweight concrete with expanded glass and silica fume”, publicado na *ACI Materials Journal*, apresentaram uma estudo da utilização de resíduos de vidro como uma alternativa sustentável de uso como agregado leve. Os agregados leves foram investigados quanto ao desempenho de durabilidade foram o vidro expandido e a sílica ativa, em substituição parcial da fração fina de agregado natural.

Os autores apresentam utilização de agregados não convencionais, tais como vidro expandido, como uma alternativa de reciclagem para melhoria da sustentabilidade na construção civil. Porém, há uma preocupação dos riscos de uma ação deletéria em função de uma possível expansão devido à reações do tipo álcali-agregado, como no caso de resíduos. Foi proposto a utilização da combinação de vidro expandido com sílica ativa na dosagem de concretos leves estruturais, e a verificação de seus efeitos de melhora de transporte e propriedade de isolamento do compósito de matriz cimentícia. Verificou-se, portanto, a estabilidade deste agregado embutido nesta matriz (CARSANA; BERTOLINI, 2017).

Foram desenvolvidas três misturas de concreto contendo agregado de vidro expandido, conforme Tabela 4.2, cimento Portland e 10% em massa de sílica ativa. As amostras foram submetidas a ensaios nos estados fresco e endurecido e também microscopia eletrônica de varredura do agregado e do concreto (CARSANA; BERTOLINI, 2017).

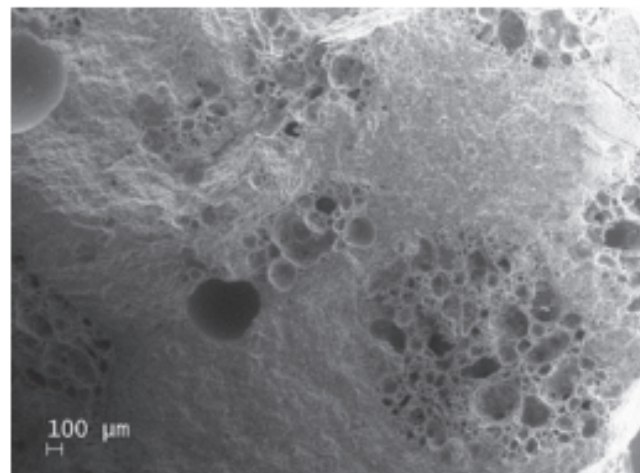
Tabela 4.2 Dosagem dos corpos de prova

| Amostra | Dosagem (kg/m ³) | | | | | |
|---------|------------------------------|--------------|------|-----------------------|-----------------|------|
| | Cimento Portland | Sílica ativa | Água | Agregado convencional | Vidro expandido | a/c |
| A | 474 | 47.4 | 200 | 948 | 95 | 0,42 |
| B | 452 | 45 | 179 | 965 | 91 | 0,39 |
| C | 420 | 42 | 169 | 977 | 112 | 0,40 |

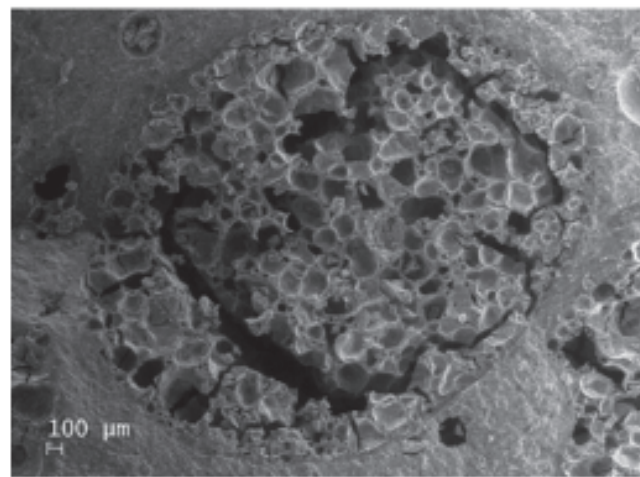
Fonte: Adaptado de CARSANA; BERTOLINI, 2017, p. 208.

A resistência à penetração de cloretos foi medida em corpos de prova cilíndricos, de acordo com o ensaio preconizado pela norma do Nordeste NT-BUILD-492, para estimar o coeficiente de difusão (CARSANA; BERTOLINI, 2017).

Na verificação da reação álcali-agregado, através de testes de expansão do concreto, foi observado que a presença do vidro expandido não provocou nenhuma deterioração ou rachadura no concreto. Nas imagens obtidas por MEV, os autores constataram que as fraturas internas ocorreram somente entre as partículas de vidro, Figura 4.5 (b), enquanto a interface entre matriz e cimento, Figura 4.5 (a) permaneceu intacta, porém, esta observação demonstrou que o resíduo não está imune ao ataque de álcalis (CARSANA; BERTOLINI, 2017).



(a)



(b)

Figura 4.5 Amostras (a) Pós cura; (b) Pós ensaio álcali-agregado
Fonte: CARSANA, BERTOLINI, 2017, p. 210.

Com relação aos ensaios de resistência mecânica à compressão e módulo de elasticidade, ambos realizados com diferentes idades, para as três dosagens, os autores confirmaram que houve uma falta de homogeneidade no concreto A, nas primeiras idades. O equivalente ocorreu para os concretos B e C, para idade de 28 dias não foram verificados grandes ganhos de resistência, como pode-se observar na Figura 4.6 (CARSANA; BERTOLINI, 2017).

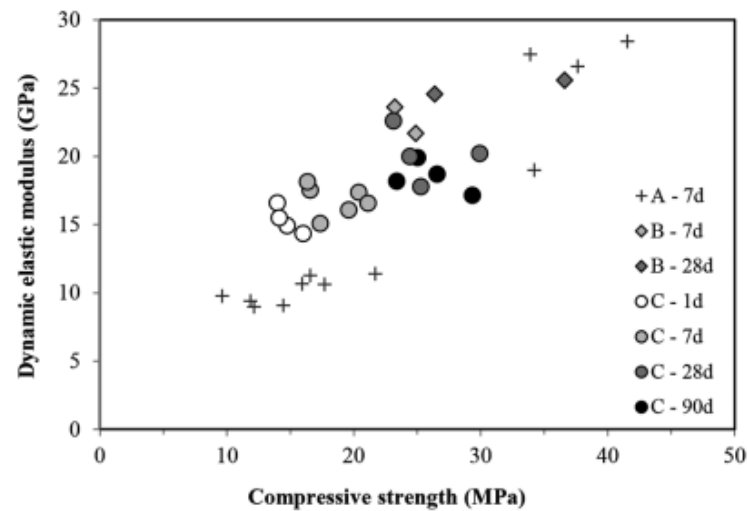


Figura 4.6 Relação entre resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos A, B e C; em diferentes idades.

Fonte: CARSANA, BERTOLINI, 2017, p. 211.

No geral, os resultados não mostraram uma evidência clara de perda de resistência. No entanto, quando os autores avaliaram as amostras por MEV, detectaram uma degradação das partículas de vidro expandido no concreto, Figura 4.7, mostrando que parte do resíduo pode ter sido atacado pelos álcalis produzidos na hidratação do cimento, sob condições de imersão permanente em água (CARSANA; BERTOLINI, 2017)

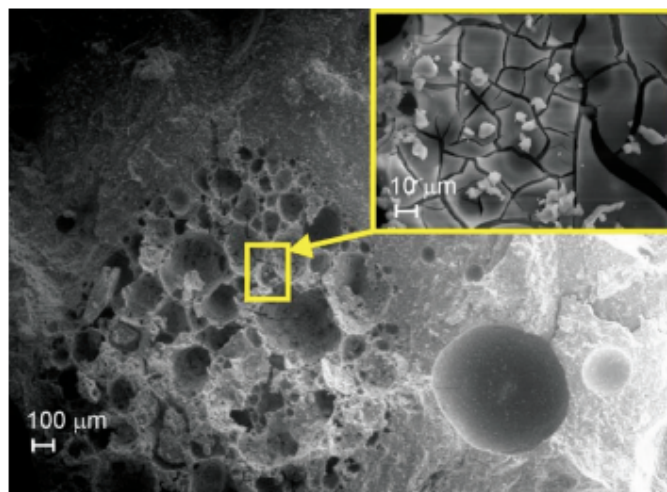


Figura 4.7 Imagem de MEV da superfície do concreto, após 3 meses de imersão em água

Fonte: CARSANA, BERTOLINI, 2017, p. 211.

Entretanto, de acordo com os autores, supõe-se que a alta porosidade das partículas de vidro expandido causaram um efeito positivo na pasta de cimento endurecida. O concreto se mostrou

altamente resistente a penetração de cloretos, comparando-o ao concreto normatizado para aplicado em ambientes agressivos (CARSANA; BERTOLINI, 2017).

O terceiro, e último artigo a ser apresentado, foi publicado em 2015 por Ashraf *et al* (2015) na revista *Construction and Building Materials*, cujo título é: “*The effect of chloride on cement mortar subjected to sulfate exposure at low temperatura*”. Neste trabalho foram avaliados o efeito do ataque por cloreto e sulfato no desempenho de compósitos de matriz cimentícia feitos com dois tipos de cimento Portland, dosados com substituição parcial de 10% calcário.

Os autores discorrem, numa breve revisão teórica, que quando os componentes estruturais de concreto estão expostos ao ataque por sulfatos, e baixas temperaturas, podem ser levados a deterioração devido à formação de fases como a etringita, gipsita e taumasita. Segundo Ashraf *et al* (2015), há dois mecanismos de formação da taumasita, resultado da reação entre o C-S-H, sulfato de cálcio, carbonato de cálcio e água; e como reação entre a etringita, C-S-H e íons carbonato na presença de excesso de água.

As ações dos íons cloreto, neste caso, são evidenciadas em estruturas expostas ao mar, áreas áridas ou quando o cloreto de sódio é usado como sal de degelo durante o inverno. Neste sentido, foram estudadas amostras moldadas, conforme dosagem da Tabela 4.3, numa relação a/c de 0,6 e o cimento Portland comercial CEMI e com adição de 10% de calcário, CEMI-LF, contendo 3,5% de carga calcária foram utilizados na composição (ASHRAF *et al*, 2015).

Tabela 4.3 Dosagem dos corpos de prova

| Amostra | Dosagem – Traço | | | |
|---------|------------------|----------|------|-------|
| | Cimento Portland | Calcário | Água | Areia |
| CEMI | 1 | 0 | 0,6 | 2,5 |
| CEMI-LF | 0,9 | 0,10 | 0,6 | 2,5 |

Fonte: Adaptado de ASHRAF *et al*, 2015, p. 103.

Por observação visual, foi identificado que os primeiros sinais de deterioração foram detectados nos cantos e todas as amostras aos 630 dias de imersão, ficando mais evidente nas amostras com utilização de cimento com CEMI-LF, com 10% de substituição. Foi utilizada uma solução com apenas sulfato (S), onde os corpos de prova foram imersos, CEMI, Figura 4.8 (a), e CEMI-LF, Figura 4.8 (b);

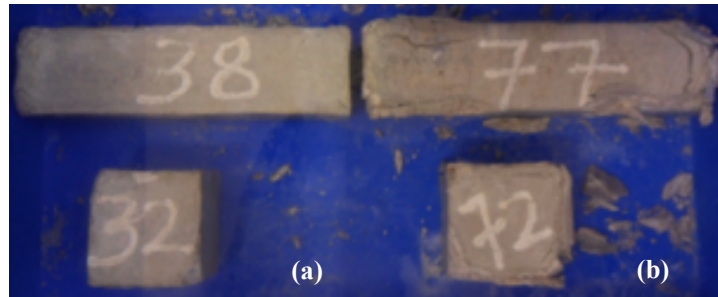


Figura 4.8 Corpos de prova após 630 dias de imersão em solução
 Solução: Apenas sulfato (S): (a) CEMI e (b) CEMI-LF
 Fonte: Adaptado de ASHRAF *et al*, 2015, p. 104.

Além desta, foram feitas soluções com combinações de sulfato e cloreto. A aparência de deterioração dos corpos de prova pós imersão de 630 em solução sulfato e 0,5% de cloreto (SC5) pode ser vista na Figura 4.9 (a), para CEMI, e na Figura 4.9 (b), o CEMI-LF.

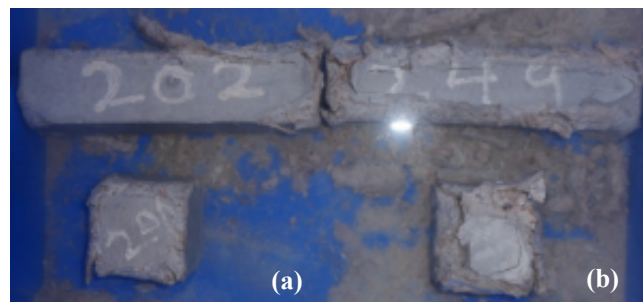


Figura 4.9 Corpos de prova após 630 dias de imersão em solução
 Solução: Combinação sulfato e 0,5% de cloreto (SC5):
 (a) CEMI e (b) CEMI-LF

Fonte: Adaptado de ASHRAF *et al*, 2015, p. 104.

A aparência de deterioração dos corpos de prova pós imersão de 630 em solução sulfato e 1,0% de cloreto (SC10) pode ser vista na Figura 4.10 (a), para CEMI, e na Figura 4.10 (b), o CEMI-LF.



Figura 4.10 Corpos de prova após 630 dias de imersão em solução
 Solução: Combinação sulfato e 1,0% de cloreto (SC10):
 (a) CEMI e (b) CEMI-LF

Fonte: Adaptado de ASHRAF *et al*, 2015, p. 104.

Do mesmo modo, a aparência de deterioração dos corpos de prova pós imersão de 630 em solução sulfato e 2,0% de cloreto (SC20) pode ser vista na Figura 4.11 (a), para CEMI, e na Figura 4.11 (b), o CEMI-LF.



Figura 4.11 Corpos de prova após 630 dias de imersão em solução
Solução: Combinação sulfato e 2,0% de cloreto (SC20):
(a) CEMI e (b) CEMI-LF

Fonte: Adaptado de ASHRAF *et al*, 2015, p. 104.

Foram obtidas imagens por microscopia eletrônica de varredura das amostras de argamassa armazenadas por 450 dias nas soluções SC5 e SC20. A avaliação das imagens mostrou que o dano a amostra CEMI-LF no SC5, Figura 4.12, com a formação de taumasita na parte externa da mesma.

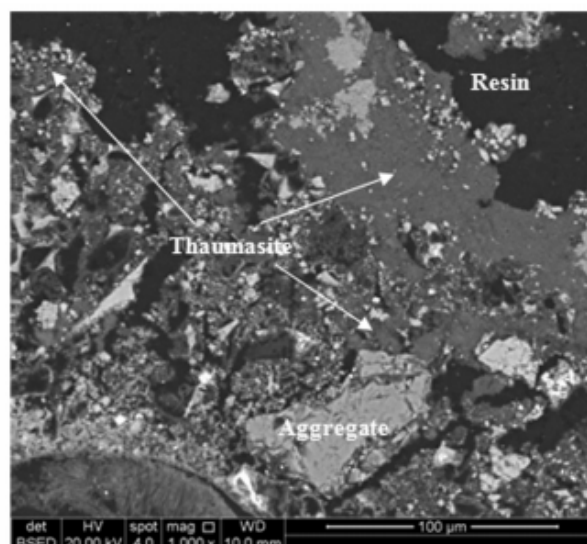


Figura 4.12 MEV – amostra CEMI-LF imersa em SC5
Fonte: Adaptado de ASHRAF *et al*, 2015, p. 107.

Um ataque semelhante, porém em menores proporções foram observados na amostra CEMI, Figura 4.13, também armazenadas em SC5.

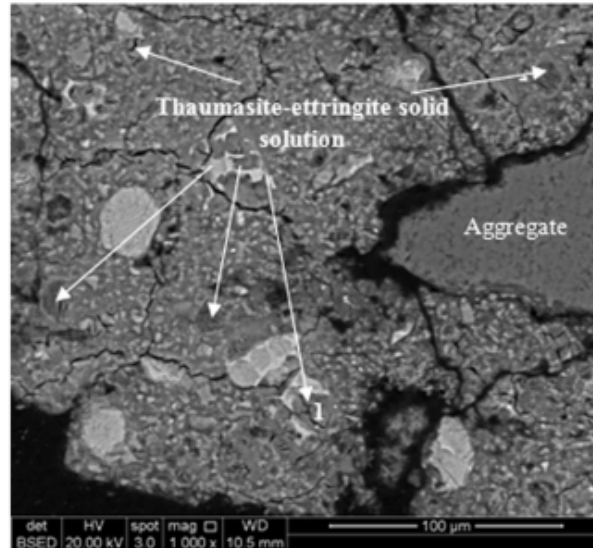


Figura 4.13 MEV – amostra CEMI imersa em SC5

Fonte: Adaptado de ASHRAF *et al*, 2015, p. 108.

Nas imagens das argamassas CEMI-LF, exposta à solução SC20, Figura 4.14 e CEMI, Figura 4.15, não foram verificados danos nos espécimes submetidos ao SC20, indicando que a formação da thaumasita não causou danos às amostras ou que os mesmos podem ocorrer de forma mais lenta.

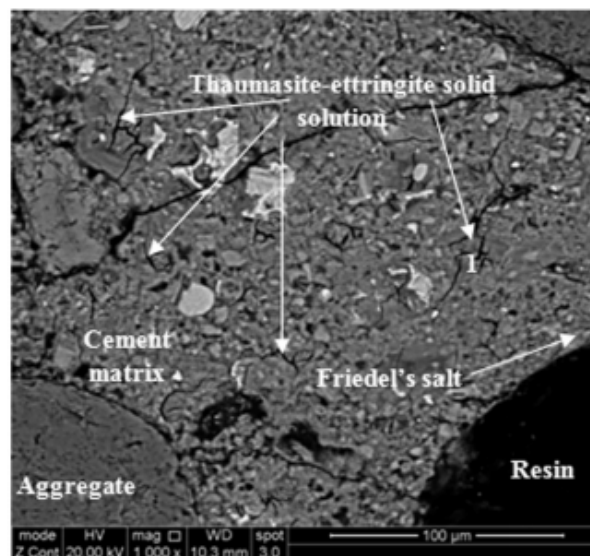


Figura 4.14 MEV – amostra CEMI-LF imersa em SC20

Fonte: Adaptado de ASHRAF *et al*, 2015, p. 108.

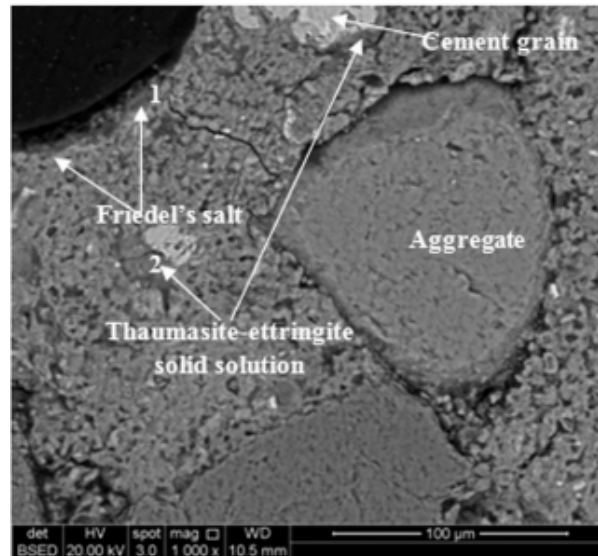


Figura 4.15 MEV – amostra CEMI imersa em SC20
 Fonte: Adaptado de ASHRAF *et al*, 2015, p. 108.

Por fim, na imagem de MEV, Figura 4.16 pode ser observada a forma e composição das agulhas formadas na superfície deteriorada do corpo de prova CEMI-LF, após 360 dias de imersão em SC5 (ASHRAF *et al*, 2015).

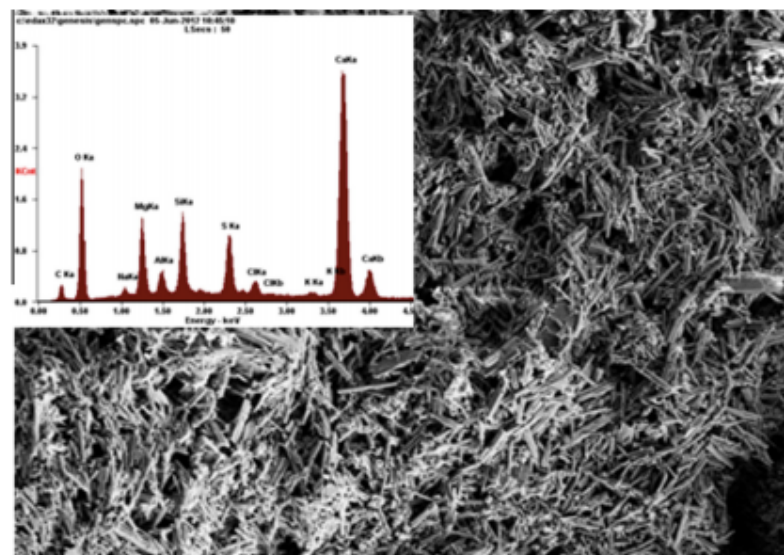


Figura 4.16 MEV – amostra CEMI-LF imersa em SC5
 Fonte: Adaptado de ASHRAF *et al*, 2015, p. 109.

Os autores avaliaram, de modo geral, que os resultados experimentais obtidos por MEV apontam que a presença de cloreto e sua concentração tem impacto significativo no desempenho de compósitos de matriz cimentícia, causando numa deterioração maior quando utilizou-se

cimento com substituição parcial de calcário. Observou-se também que a solubilidade da calcita foi reduzida, em teores de maior concentração de cloretos, favorecendo a redução da entrada e interação química no material, devido à formação de uma barreira física no material.

Uma questão evidente na leitura de todos os artigos foi a preocupação dos autores a respeito a durabilidade e a sua relação com a proteção das estruturas de concreto com relação a limitar a entrada de agentes deletérios na mesma. O caso da penetração de cloretos, como citado na revisão de literatura, atua privando a armadura de uma camada passivadora, tornando-o susceptível à corrosão.

Neste sentido, os autores afirmam que a extensão das reações entre cloreto e cimento dependem da temperatura, concentração e pH. Quando o meio da pasta de cimento é mais permeável, a entrada de íons pode desencadear um processo corrosivo, que devido a ferrugem pressupõe uma tensão e expansão no concreto endurecido, causando rachaduras no mesmo.

5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente monografia apresentou o método de estudo de uma revisão bibliográfica sobre os aspectos teóricos que norteiam a temática da durabilidade de materiais compósitos de matriz cimentícia, mais especificamente quanto submetidos a ação de íons cloreto. A partir do levantamento bibliográfico realizado neste trabalho, ficou evidente a importância do estudo destes materiais, dado seu amplo consumo pela indústria da civil.

De modo geral, o trabalho procurou expor as definições quanto à composição do cimento, bem como suas possíveis variações permitidas pela normatização brasileira. Além disso, buscou-se apresentar como ocorre o processo de hidratação da pasta de cimento Portland e como as reações provenientes desta etapa são importantes para determinar a qualidade do concreto.

A microestrutura, com relação às formações de fases na pasta de cimento e estrutura de poros foram mostradas com destaque para favorecer a durabilidade do concreto. Esta, por sua vez, é fundamental, pois, estes podem afetar na proteção das estruturas contra o ataque de agentes deletérios.

Em condições normais, a armadura de aço presente em estruturas de concreto armado encontra-se protegida fisicamente por uma barreira que consiste no cobrimento do concreto. Essa barreira atua dificultando o ingresso de substâncias que podem desencadear o processo de corrosão do metal, limitando também a entrada de água e oxigênio no material. Além disso, alta alcalinidade do meio possibilita a formação de uma fina camada passivadora na armadura e o torna menos susceptível ao processo de corrosão.

Entretanto, o sistema de poros interconectados presente na microestrutura do concreto, e sua tendência a fissuração, fazem com que o mesmo não se torne uma barreira perfeita ao aço. Neste sentido, a pesquisa científica vem apresentando excelentes avanços, tanto no estudo de incorporação de materiais alternativos. As soluções estudadas seguem uma linha de utilização de materiais alternativos para incorporação no concreto, com vistas a reduzir sua permeabilidade, ou seja, melhorar seu desempenho impedindo a penetração de íons agressivos.

Os íons cloreto presentes no concreto podem ser oriundos de diferentes fontes. No concreto endurecido, os cloretos podem penetrar na estrutura pelo contato diretamente com a água do mar, pela presença de nevoa salina, pelos sais de degelo ou mesmo em aditivos ou agregados contaminados. Os mesmos podem penetrar na estrutura de matriz cimentícia por penetração de água e difusão de íons. Este agente deletério deve ter um controle rigoroso de entrada no material, principalmente em estruturas de concreto armado, uma vez que podem auxiliar no processo de corrosão do aço.

A microscopia eletrônica de varredura se mostrou como uma ferramenta complementar ao estudo das microestruturas, possibilitando uma observação excelente da morfologia das amostras em todos os trabalhos avaliados.

Ficou evidente, portanto, que a questão da durabilidade visa atender não somente às questões da qualidade dos materiais de construção, mas também a uma demanda atual pela redução de geração de resíduos sólidos e também no endereçamento de resíduos provenientes de outros segmentos da indústria. A construção civil vem, num sentido mais amplo, incorporando tal questão no desenvolvimento de materiais alternativos e, além disso, duráveis. Ou seja, atendem à capacidade de utilização determinada em projeto, sem comprometer seu desempenho de vida útil.

6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 6118: *Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. 3. ed. Rio de Janeiro, 2014.

AMBROZEWICZ, L. H. P. *Materiais de construção: normas, especificações, aplicação e ensaios de laboratório*. 1. ed. São Paulo: Pini, 2012.

BAROGHEL-BOUNY, V.; CAPRA, B.; LAURENS, S. A durabilidade das armaduras e do concreto de cobertura. . In: _____. *Durabilidade do concreto: bases científicas para formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente*. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. p. 255-326.

BATTAGIN, F. A.; BATTAGIN, S. L. I. Cimento Portland. In: _____. *Materiais de construção civil e princípios da ciência e engenharia dos materiais*. 3. ed. vol. 1. São Paulo: IBRACON, 2017. p. 761-792.

CALLISTER, D. W.; RETHWISCH, G. D. *Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução*. LTC. 8. ed. Rio de Janeiro, 2012.

CORREIA, L. S.; MATOS, W. B.; SANTOS, G.; DEZANET, A.; STRINGARI, D.; SCHACKOW, A.; SEGADÃES, M. A. *Uso de análise de imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura para caracterização de materiais de construção contendo rejeitos de tijolos*. 21º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Cuiabá, 2014.

CRAUSS, C. *Penetração de cloretos em concretos com diferentes tipos de cimento submetidos a tratamento superficial*. 165 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2010.

DEDAVID, A. B.; GOMES, I. C.; MACHADO. *Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparo de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores*. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

ABDALKADER, M. H. A.; LYNSDALE, J. C.; CRIPPS, J. *The effect of chloride on cement mortar subjected to sulfate exposure at low temperature*. Construction and Building Materials, 78, p.102-111, 2015.

DU, H.; TAN, H. K. Properties of high volume glass powder concrete. Cement and Concrete Composites, 75, p. 22-29, 2017.

GARCIA, S. C. D. Análise da microestrutura de pasta de cimento Portland com tratamento térmico por meio de segmentação de imagens e ensaio de ultra-microdureza. 100 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

HELENE, L. R. P. *Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado*. Tese – Universidade de São Paulo: Escola Politécnica, São Paulo, 1993.

HELENE, P.; ANDRADE, T. Concreto de Cimento Portland. In: _____. *Materiais de construção civil e princípios da ciência e engenharia dos materiais*. 3. ed. vol. 2. São Paulo: IBRACON, 2017. p. 970-1005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, M. J. P. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. 1. ed. São Paulo: Pini, 1994.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto*. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NONAT, A. A hidratação dos cimentos. In: _____. *Durabilidade do concreto: bases científicas para formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente*. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. p. 17-40.

OLLIVIER, P. J.; TORRENTI, M. J. A estrutura porosa dos concretos e as propriedades de transporte. In: _____. *Durabilidade do concreto: bases científicas para formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente*. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. p. 41-112.

RIBEIRO, C. C.; PINTO, S. D. J.; STARLING, T. *Materiais de construção civil*. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006.

ROUGEAU, P.; GUIRAUD, P. A durabilidade no contexto normativo europeu. In: _____. *Durabilidade do concreto: bases científicas para formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente*. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. p. 209-236.

SCRIVENER, L. K. *Backscattered electron imaging of cementitious microstructures: understanding and quantification*. Cement and Concrete Composites, 26, p.935-945, 2004.
SILVA, A. F. P. *Durabilidade das estruturas de concreto aparente em atmosfera urbana*. 1. ed. São Paulo: Pini, 1995.

SILVA, G. M.; BATTAGIN, F. A.; GOMES, V. Cimentos Portland com adições minerais. In: _____. *Materiais de construção civil e princípios da ciência e engenharia dos materiais*. 3. ed. vol. 1. São Paulo: IBRACON, 2017. p. 793-841.

SILVA, J. I. *Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura*. 279 p. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

CARSANA, M.; BERTOLINI, L. *Durability of lightweight concrete with expanded glass and silica fume*. ACI Materials Journal, 114-M19, p.207-214, mar-abr, 2017.

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. *Produção nacional de cimento por regiões e estados*. 2017. Disponível em: <<http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1537281236.pdf>>. Acesso em: 10 dez. 2018.

SILVA, B. J. G. *Estudo do comportamento do concreto de cimento Portland produzido com a adição do resíduo de polimento de porcelanato*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

SOUZA, M. C. V.; RIPPER, T. *Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto*. 1. ed. São Paulo: Pini, 1998.