

Análise da durabilidade de concreto armado com fissuras induzidas por carregamento

S. M. M. Pinheiro¹ , M. P. Costa Junior^{1*} 

* Autor de Contato: milton.paulino@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i2.510>

Recepção: 11/09/2020 | Aceitação: 11/03/2021 | Publicação: 01/05/2021

RESUMO

O objetivo desse trabalho é verificar a relação entre a ação de carregamentos induzindo fissuras e a durabilidade do concreto armado. Foram produzidos corpos-de-prova prismáticos e durante o período de dois anos estas amostras foram submetidas à névoa salina artificial, estando sob a ação de carregamento central permanente, carregamento central de curta duração e sem carregamento (referência), sendo realizados ensaios de penetração de cloretos e análise microestrutural, além do mapeamento das fissuras. Verificou-se que o carregamento não influenciou nos resultados de penetração de cloretos, porém, nas micrografias e microanálises das amostras fissuradas observou-se a formação de produtos de deterioração e possíveis microorganismos, em comparação aos corpos-de-prova que não sofreram carregamento.

Palavras-chave: durabilidade; carregamento; fissura; cloretos; microscopia.

Citar como: Pinheiro, S. M. M., Costa Junior, M. P. (2021), “Análise da durabilidade de concreto armado com fissuras induzidas por carregamento”, Revista ALCONPAT, 11 (2), pp. 17 – 37, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i2.510>

¹ Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho o autor M.P.Costa Junior contribuiu com a ideia original, coleta de dados, metodologia experimental, discussão dos resultados e redação do trabalho. O autor S.M.M. Pinheiro contribuiu com análise microestrutural e revisão do texto.

Licença Creative Commons

Copyright (2021) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no segundo número do ano 2022, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do primeiro número do ano de 2022.

Durability analysis of reinforced concrete with loading induced cracks

ABSTRACT

The objective of this study is to verify the relationship between the action of loads inducing cracks and the durability of reinforced concrete. Prismatic specimens were produced and for two years these samples were subjected to artificial salt spray, under the action of different types of loading and unloaded (reference), with moist curing for 7 days. Chloride penetration tests and microstructural analysis were carried out. It was observed that loading did not influence the results of chloride penetration. However, it was observed that in the micrographs and microanalysis of the cracked samples the clearer formation of deterioration products and possible microorganisms, compared to the samples that did not suffer loading.

Keywords: durability; loading; cracking; chlorides; microscopy.

Análisis de durabilidad del hormigón armado con fisuras inducidas por la carga

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es verificar la relación entre la acción de cargas que inducen fisuras y la durabilidad del hormigón armado. Fueron producidos modelos de prueba (especímenes) prismáticos y durante dos años estas muestras fueron sometidas a niebla salina artificial, bajo la acción de una carga central permanente, carga central a corto plazo sin carga (referencia), con un curado de 7 días. Se realizaron pruebas de penetración de cloruros y análisis microestructurales, además del mapeo de fisuras. Se encontró que la carga no influyó en los resultados de penetración de cloruros, sin embargo, se observa que las micrografías y microanálisis muestran una formación de productos de deterioro y posibles microorganismos, en comparación con las probetas que no sufrieron carga.

Palabras clave: durabilidad; carga; craqueo; cloruros; microscopía.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos para o uso exclusivo do título da revista No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

As causas do processo de deterioração do concreto armado estão diretamente relacionadas a ação dos agentes agressivos. Dentre os vários agentes existentes (dióxido de carbono, íons cloreto e ataque de sulfatos), estão à ação deletéria dos cloretos e do dióxido de carbono (CO_2), que têm sido muito estudados nos últimos anos e que ainda são um grande desafio para o bom desempenho das estruturas de concreto armado. Assim, as estruturas que estão expostas ao ambiente marinho e ao urbano demandam uma qualidade mínima do material para assegurar sua vida útil de projeto e sua durabilidade (ANDRADE, 2005; CASCUDO, 2005; SILVESTRO et.al., 2021).

Além das causas químicas, ressaltam-se também as causas do processo mecânico de deterioração como a sobrecarga e as cargas cíclicas; cujo principal sintoma é a fissuração do concreto. Essas fissuras devem ser controladas, principalmente por três motivos: durabilidade por risco de corrosão da armadura, aparência estética e exigências funcionais como higiene (proliferação de fungos, micro-organismos, etc.) e permeabilidade a gases e à água (GHALI and FAVRE, 1994; HEARN and FIGG, 2001).

Em condições naturais de exposição, a durabilidade do concreto é controlada pela sua habilidade de impedir o transporte de íons e fluidos. Muitas vezes o concreto está sujeito a vários tipos de sollicitação (térmica, mecânica, etc) que geram tensões de tração que excedem a resistência do material gerando fissuras, que podem afetar o transporte de agentes agressivos à mistura (LIM et al, 2000; HEARN and FIGG, 2001; MEHTA and MONTEIRO, 2014).

Fissuras manifestadas devido à ação de cargas externas podem agir como um fator importante para a entrada de agentes agressivos como íons cloreto e o CO_2 (carbonatação). Porém, estudos mostram que as fissuras não são o maior fator para deterioração da estrutura por corrosão (entrada de agentes agressivos) se elas não excederem aberturas estipuladas pelas normas internacionais e NBR 6118 (ABNT, 2014). Neste caso, a qualidade do concreto de cobrimento e o próprio cobrimento nominal são mais relevantes para a sua durabilidade (KONIN et.al., 1998; HELENE and DINIZ, 2001; ALEXANDER et al, 2001; CASCUDO, 2005).

Independente de carregamento, as características das fissuras (conectividade, abertura, largura, comprimento) exercem um papel fundamental na durabilidade das estruturas de concreto. Nesse sentido, a NBR 6118 (ABNT, 2014) estabelece abertura máxima característica para fissuração (identificado na norma como W_k) e proteção das armaduras quanto à durabilidade. Essa norma define a abertura máxima de fissuras de 0,4mm para concreto armado, que varia em função da classe de agressividade ambiental, do tipo de estrutura de concreto e as combinações de ações de serviço.

A penetração e difusão de íons cloretos podem ocorrer pela fissura conforme esquematizado na Figura 1.

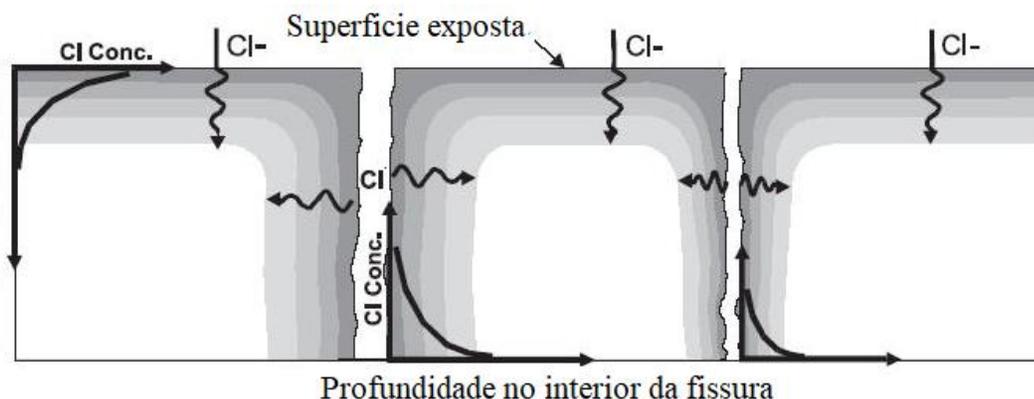


Figura 1. Penetração de cloretos na superfície e entre as fissuras (ISMAIL et.al., 2006).

As fissuras agem como porta de entrada para agentes agressivos, que acarretam um efeito significativo sobre a difusão de cloretos, pois facilitam o deslocamento desses agentes através do concreto, sendo a sua intensidade diretamente dependente abertura das fissuras (WANG et.al., 2016).

Quando os íons cloreto estão no interior da fissura, eles podem penetrar em diferentes profundidades, a partir da superfície no seu interior, ficando dissolvidos na fase aquosa dos poros, formando os cloretos livres, que podem desencadear o processo de deterioração do material. Observa-se também que a concentração de cloretos é alta na superfície exposta do concreto, porém, ao penetrar na abertura de fissura ela diminui com o aumento da profundidade a partir da superfície do material (ISMAIL et.al., 2006; FIGUEREDO, 2005; WIN et.al., 2004).

Além dos cloretos livres nas soluções dos poros do concreto, pode-se encontrá-los também: combinados quimicamente ao C-S-H, ou como cloroaluminatos, adsorvidos fisicamente às paredes dos poros ou livres nas soluções dos poros do concreto (ROMANO, 2009; CRAUSS, 2010).

Dos íons cloreto que penetram no concreto, parte liga-se ao aluminato tricálcico (C_3A) formando principalmente cloroaluminato de cálcio, também conhecido como sal de Friedel - $C_3A.CaCl_2.10H_2O$, o qual se incorpora às fases do cimento hidratado. Outra parte é absorvida na superfície dos poros e o restante fica dissolvido na fase aquosa dos poros, que formam os cloretos livres que são perigosos e causam danos à estrutura (HELMUTH and STARK, 1992; FIGUEREDO, 2005; CRAUSS, 2010).

De modo geral, sempre haverá um estado de equilíbrio entre as três formas de ocorrência desses íons, de forma que sempre existirá certo teor de Cl^- livre na fase líquida do concreto (HELMUT and STARK, 1992; FORTES and ANDRADE, 1995; CASCUDO, 1997). Cimentos com baixos teores de C_3A têm menor capacidade de imobilizar íons cloreto pela formação do cloroaluminato de cálcio hidratado. Com a formação desse composto há uma diminuição da concentração de íons cloreto livres na solução aquosa dos poros do concreto.

A penetração dos cloretos na forma de cloretos livres depende de fatores como o tipo de íons positivos (cátions) associados aos cloretos, o momento de acesso ao concreto antes ou após seu endurecimento, a presença de outro íon negativo (ânion) como o sulfato, o tipo de cimento usado na produção de concreto, a qualidade de produção e cura do concreto, a umidade ambiente, a relação água/cimento, o estado de carbonatação e o consumo de cimento por m^3 de concreto. Analisando a resistência à penetração de íons cloreto, Leng et.al. (2000) e Oh et.al. (2002) verificaram que a difusão de íons cloreto aumenta com o aumento da relação água/cimento, e cimentos com cinzas volantes e escória de alto forno têm alta resistência à difusão (HELENE, 1997; SONG et.al., 2008; LAWRENCE, 2006).

Nesse contexto, esse artigo apresenta uma análise da durabilidade em concreto armado sob diferentes condições de carregamento, durante o período de 24 meses. Foram analisados profundidade de penetração de íons cloretos, além da análise microestrutural.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O programa experimental foi conduzido com as seguintes etapas: caracterização dos materiais, dosagem dos corpos-de-prova. Após a dosagem foram moldados dois tipos de corpos-de-prova (prismáticos e cilíndricos).

Após moldagem e desforma, os corpos-de-prova prismáticos passaram por cura úmida durante 7 dias, sendo então aplicados diferentes tipos de carregamentos e submetidos a névoa salina, em ambiente natural até as datas de ensaios (idades de 6, 12, 18 e 24 meses). Nessas idades foram avaliadas as profundidades de cloretos e realizada a Análise microestrutural (MEV e EDS).

Quanto aos corpos-de-prova cilíndricos, após moldagem eles foram desformados e curados (cura úmida) por 28 dias. Finalizado esse período, foram realizados ensaios de resistência compressão

axial.

O trabalho finalizou com a análise dos resultados e considerações finais. Todas essas etapas serão mais detalhadas a seguir.

Quanto aos materiais, o cimento Portland utilizado nesse trabalho foi o CP III 40-RS (cimento Portland de Alto-Forno), cujo teor de escória granulada de alto-forno no cimento pode chegar a 75%. Foram utilizados os seguintes materiais para composição da mistura: areia (média) de rio, disponível e utilizada na região de Campinas – SP, pedra britada 9,5/25 (B1 - basalto) com dimensão máxima característica de 19mm e aditivo polifuncional a base de lignosulfonato, com massa específica de 1,18 g/cm³. Na produção dos corpos-de-prova prismáticos de concreto foi utilizada uma barra de aço CA50 com diâmetro nominal de 10 mm.

As misturas experimentais escolhidas em função da dosagem do concreto utilizado nesta pesquisa, cuja proporção adotada aglomerante:agregados foi de 1:5 em massa. Neste sentido, atendendo a esse requisito, o traço adotado foi de 1:2:3 (cimento:areia:brita) (em massa), com a relação água/cimento de 0,42.

A escolha da proporção cimento: areia: brita de 1:2:3 ocorreu por apresentar bom teor de argamassa. A relação água/cimento de 0,42 foi adotada com o objetivo de obter concretos mais resistentes quando expostos em meios agressivos, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014). A classe adotada para os concretos moldados neste estudo foi C50. O traço e a relação água/cimento adotados neste trabalho vêm sendo utilizados e avaliados desde 2000 dentro do projeto de pesquisa sobre durabilidade da camada de cobertura, no laboratório de materiais de construção da Unicamp.

A quantidade de aditivo utilizado foi a necessária para se manter uma trabalhabilidade adequada à moldagem dos corpos-de-prova em mesa vibratória, em função da baixa relação água/cimento empregada. O índice de consistência, determinado pelo ensaio de abatimento (de 4 ± 1 cm), foi encontrado por meio de um tronco de cone (conforme a NBR 16889, 2020). Esse valor de abatimento, apesar de não ser muito utilizado em obras correntes, foi adotado para o concreto, pois se desejava obter uma trabalhabilidade mínima em que o concreto fosse moldado para a produção de corpos-de-prova prismáticos com a vibração mecânica.

O consumo de materiais empregados para a moldagem dos corpos-de-prova prismáticos e cilíndricos pode ser observado na tabela 1.

Tabela 1. Especificação dos materiais utilizados no trabalho experimental.

	Cimento (Kg/m³)	Aditivo (Kg/m³)	Areia (Kg/m³)	Brita (Kg/m³)	Água (Kg/m³)
1 : 2 : 3 : 0,42	398	2,4	796	1194	167

Foram moldados corpos-de-prova cilíndricos, empregados para caracterização do concreto, avaliando a sua propriedade mecânica (resistência à compressão axial) (Tabela 2).

Tabela 2. Série de corpos-de-prova cilíndricos.

Séries	Tipo de cura	Data de ensaio
M6um	Imersa até a data de ensaio	28 dias
M12um		
M18um		
M24um		

A mistura utilizada foi mecânica, em betoneira de eixo inclinado. Para cada série foram moldados 4 corpos-de-prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura e ensaiados na idade de 28 dias, segundo a NBR 5739 (ABNT, 2018). Os corpos-de-prova foram moldados em duas camadas,

em mesa vibratória, no tempo necessário para permitir a compactação adequada do concreto no molde, de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015).

Após a moldagem, os corpos-de-prova foram cobertos com lona plástica até o momento da desforma, que ocorria após 48 horas do momento da moldagem. Esse prazo de desmoldagem foi adotado em função da desforma dos corpos-de-prova prismáticos. Em seguida, os corpos-de-prova foram submetidos à cura imersa por 28 dias.

Foram moldados 6 corpos-de-prova prismáticos para cada idade (6, 12, 18 e 24 meses), sendo 2 corpos-de-prova da amostra sem carregamento, 2 corpos-de-prova da amostra sob carregamento central de curta duração e 2 corpos-de-prova da amostra sob carregamento central permanente, nas dimensões de 1,39x0,1x0,1m. Os moldes foram definidos nessas dimensões em função de serem as mesmas utilizadas em outras pesquisas realizadas no Laboratório de Materiais de Construção da Unicamp.

A mistura do concreto para a produção dos corpos-de-prova prismáticos foi mecânica em betoneira de eixo inclinado. Foi utilizada uma barra de aço CA50 com diâmetro nominal de 10 mm ($\varnothing 10$), com cobrimento nominal de 30 mm, embora a corrosão do aço não seja escopo deste trabalho. O cobrimento adotado (30 mm) foi definido em função do trabalho realizado por Martins (2001), além do trabalho de Midness e Young (1981), Illston (1994), Alexander et.al. (2001) e Figueiredo e Nepomuceno (2004).

Os corpos-de-prova prismáticos foram moldados de dois em dois. Para manter o cobrimento foram colocados 3 espaçadores de 30mm ao longo da barra de aço. Na figura 2 pode-se observar as dimensões do corpo-de-prova prismático e posição da barra de aço.

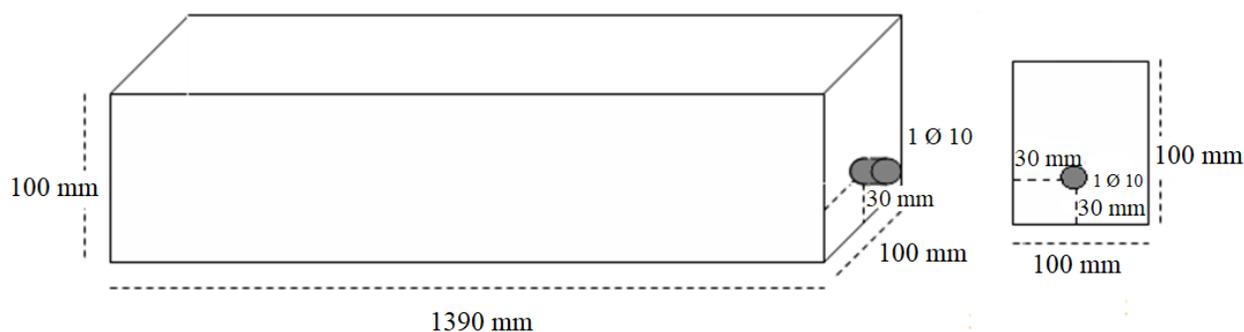


Figura 2. Esquema de dimensões dos corpos-de-prova prismáticos.

Após a moldagem, os corpos-de-prova prismáticos permaneceram nas formas por 48 horas, cobertos com lona plástica. Esse prazo foi adotado porque não se conseguia desformar e principalmente transportar esses corpos-de-prova antes de 48 horas, pois fissuravam durante o manuseio.

Concluído esse prazo, eles passaram por cura úmida, onde foram imersos em água saturada de cal até a idade de 7 dias. Esse período foi definido baseado nas recomendações de Thomaz (2005), Castro (2003), Braun (2003) e ACI 308 (2016), que determinaram no mínimo 7 dias de cura, independente do tipo de cimento adotado. Além das referências citadas, a idade de 7 dias de cura foi adotada em função de ser esse o prazo utilizado nas obras brasileiras para a cura de peças estruturais.

Foi definida a forma de carregamento dos corpos-de-prova prismáticos, que teriam as seguintes situações:

- Sem carregamento (SC). Foi adotado para servir como referência na comparação entre os dois outros tipos de carregamento.
- Carregamento central de curta duração (CCCD). Aplicação de uma força concentrada P no corpo-de-prova prismático até o surgimento da primeira fissura, e retirada em seguida. Optou-se pela escolha desse carregamento para verificar o desempenho do concreto em

uma situação de fissuras que podem surgir ao longo da vida útil da estrutura devido à ação de carregamentos pontuais, ou seja, casos em que há uma sobrecarga de curta duração na estrutura, com o surgimento de fissura. Nesse caso, como o carregamento é de curta duração, a fissura pode desaparecer na retirada do carregamento, mas tensões e microfissuras internas no material já ocorreram;

- Carregamento central permanente (CCP). Os corpos-de-prova prismáticos sofreram carregamento até a data dos ensaios de durabilidade. Esse tipo de carregamento foi escolhido para que o corpo-de-prova prismático tivesse fissuras superficiais e que se mantivessem abertas ao longo de todo o período de exposição, até as datas de ensaio. Assim, nas datas de ensaio pode-se observar a influência da fissura na profundidade de penetração de cloretos e na microestrutura do concreto.

Para a abertura máxima de fissuras, foi adotado como parâmetro o limite que estabelece a norma NBR 6118 (ABNT, 2014) para a durabilidade, relacionada à fissuração e proteção da armadura, em função da classe de agressividade ambiental. Assim, a abertura máxima de fissuras nos corpos-de-prova prismáticos, que ficaram sob carregamento constante, foi entre 0,3 mm e 0,4 mm (Figura 3). As aberturas de fissuras foram mapeadas ao longo do tempo, até a data de ensaio dos corpos-de-prova.



Figura 3. Medida da abertura de fissura no centro do corpo-de-prova prismático com fissurômetro.

Os corpos-de-prova prismáticos ficaram sob carregamento constante até as datas de ensaios. O esquema apresentado na Figura 4 mostra os corpos-de-prova prismáticos biapoiados em corpos-de-prova cilíndricos de concreto (10x20 cm) com um pórtico central composto de duas chapas de aço e duas barras rosqueadas (de 9,5 mm, 3 porcas, 3 arruelas e duas chapas de aço de 8x300x100 mm) aplicando o carregamento de 250 kgf, ocasionando fissuras no centro da vigas, com aberturas de até de 0,3 mm (dentro dos limites da norma NBR 6118). O carregamento era realizado aplicando-se um torque de 0,5 Kgf.m, com torquímetro, nas barras rosqueadas e, conseqüentemente, a força concentrada era aplicada no corpo-de-prova prismático ocasionando a fissura.



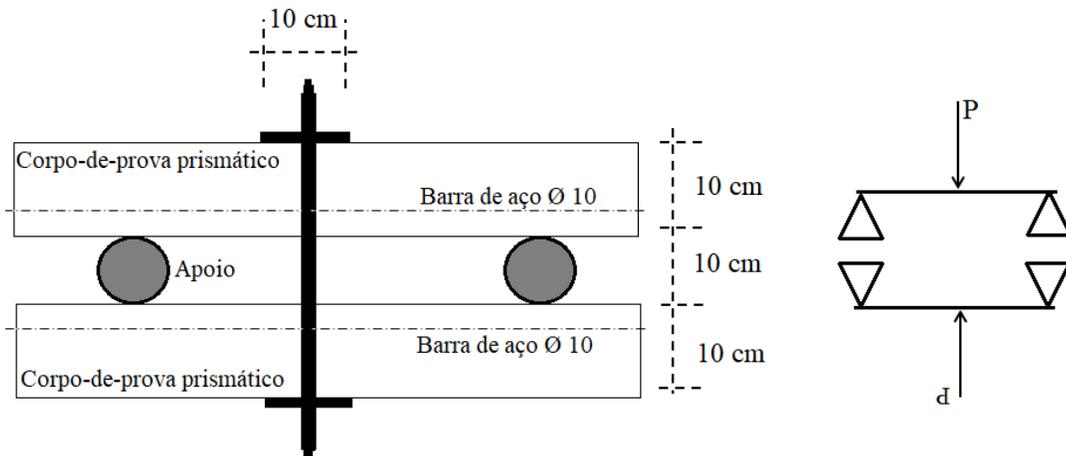


Figura 4. Carregamento central permanente (CCP) nos prismas.

Na Tabela 3 pode-se observar a sequência adotada para as amostras de cada série de moldagem, nas diferentes condições de carregamento e data de ensaios de durabilidade.

Tabela 3. Amostras de cada série de moldagem, nas condições de carregamento.

Amostra	Amostra Sem Carregamento	Amostra sob Carregamento Central de Curta Duração	Amostra sob Carregamento Central Permanente	Data de ensaio
M6um	M6umSC	M6umCCCD	M6umCCP	06 meses
M12um	M12umSC	M12umCCCD	M12umCCP	12 meses
M18um	M18umSC	M18umCCCD	M18umCCP	18 meses
M24um	M24umSC	M24umCCCD	M24umCCP	24 meses

Após a cura úmida de sete dias, os corpos-de-prova passaram por névoa salina até a idade de ensaio. O objetivo da névoa foi simular um ambiente salino, nesse sentido foi borrifada manualmente uma solução de NaCl nos corpos-de-prova prismáticos até seu umedecimento, com uma periodicidade de 3 vezes por semana e três vezes ao dia.

A concentração de sal na água de mar é de 35 gramas de NaCl para cada litro de água. Neste sentido, foi utilizada essa quantidade de 35 g/l de NaCl para a solução simulando a névoa salina.

A aspersão da solução de cloretos ocorreu até as datas de ensaios dos corpos-de-prova prismáticos. A escolha dessa metodologia foi em função do trabalho de Arya e Darko (1996) que realizaram ensaios de corrosão em vigas de concretos empregando o mesmo procedimento.

Para determinar a profundidade de penetração de cloretos, rompeu-se a seção transversal das amostras, cuja avaliação é realizada pela aspersão de nitrato de prata (solução 0,1N) na superfície do concreto, ocorrendo uma reação fotoquímica, onde os cloretos livres presentes no concreto reagem com os íons de prata da solução de nitrato de prata formando um precipitado branco. Nas regiões onde não há íons cloreto ou cloretos combinados, há o surgimento de uma coloração marrom, o óxido de prata, devido à reação entre os íons de prata e as hidroxilas presentes nos poros do material cimentício (Jucá et.al., 2002; Real et.al., 2015). Através deste método, objetiva-se avaliar se a frente de cloretos alcançou as armaduras. Podem-se observar as etapas de realização do ensaio na Figura 5.

O corte nesses corpos-de-prova prismáticos foi realizado nos terços médios, onde se tem a visão das áreas comprimidas e tracionadas dos corpos-de-prova prismáticos.



Figura 5. Ensaio de penetração de cloretos com aspersão de nitrato de prata.

Para a análise microestrutural foram retiradas amostras dos corpos-de-prova prismáticos logo após o corte ou ruptura das mesmas e antes da realização dos ensaios de durabilidade, para que as amostras não fossem contaminadas com as soluções de nitrato de prata (Figura 6). Nesse trabalho só foram apresentados os resultados de análise microestrutural aos 6 meses e 24 meses, que foram as primeiras e últimas idades de ensaios, respectivamente.

As amostras foram retiradas das áreas de cobertura, com profundidade máxima de 1,5 cm. Em corpos-de-prova fissurados foram retiradas amostras na região fissurada (se retirou a amostra exatamente na abertura da fissura ou o mais próximo dela), sempre na região rompida do corpo-de-prova prismático, para serem observadas ao MEV. Devido ao fato do concreto não ser um material condutor, as amostras precisaram ser metalizadas com ouro. Essas amostras foram retiradas com talhadeira de aço e martelo. As observações foram realizadas no Laboratório Nacional de Luz Sincontron (LNLS), em Campinas, Estado de São Paulo.

A medida de energia (EDS) foi adotada nesse trabalho. Neste caso tem-se a vantagem da rapidez na identificação dos elementos químicos presentes (Dedavid et al, 2007).

Área onde era retirada amostra para ensaios de microestrutura

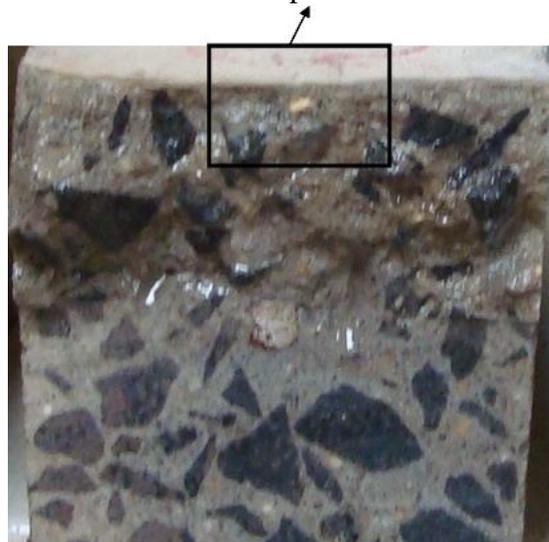


Figura 6. Local onde era retirada a amostra para ensaios de microestrutura.

Os resultados obtidos foram analisados por meio de técnicas de estatística descritiva (cálculo da média, desvio padrão) para caracterizar as variáveis (propriedades do concreto e comportamento quanto à cloretos).

Para determinar diferenças estatisticamente significantes (o nível de significância adotado foi de 5%) entre as médias dos resultados, foram utilizados testes de hipóteses paramétricas -ANOVA e DUCAN (Montgomery, 1991).

Foi utilizado o programa statgraphics para realização dos testes estatísticos. O programa construiu vários testes para comparar as médias de penetração de cloretos entre todas as amostras. O teste F da tabela ANOVA verificou se há diferenças significativas entre as médias dos resultados, em relação aos tipos de cura e de carregamento.

3. RESULTADOS

Os resultados de resistência à compressão axial aos 28 dias de idade do concreto, referente às moldagens realizadas nos corpos-de-prova cilíndricos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Resultados de resistência à compressão axial.

Concreto (corpos-de-prova cilíndricos)	Cura dos corpos-de-prova cilíndricos	Idade de ruptura	Resistência à compressão axial (MPa)	Desvio padrão	Coefficiente de variação
M6um	Imersa até 28 dias	28 dias	66,2	4,3	6,6
M12um			50,2	2,6	5,3
M18um			59,7	4,1	7,0
M24um			56,8	2,6	4,6

Como pode se observar na Tabela 4, as médias dos resultados de resistência à compressão axial ficaram na faixa de 44MPa a 66MPa e os resultados decrescem nesta ordem: M6um, M18um, M24um, M12um. Essa diferença de resultados pode ter sido ocasionada por vários motivos, como temperatura e umidade no momento da moldagem, assim como o transporte, mistura, lançamento, adensamento e cura do concreto utilizado.

Quanto ao coeficiente de variação, ao se utilizar o parâmetro da norma ACI 214R (2002) para verificar como foi a variação atribuída a amostragem, a preparação da amostra, cura e ensaio de laboratório, observa-se que, na classificação apresentada por essa norma, o coeficiente de variação das amostras M12um e M24um são considerados bons ($<5,5$), com exceção das amostras M18um e M6um, que apesar de elevados valores de resistência, são considerados fracos ($>5,5$).

Como verificado na literatura, a resistência à compressão de concretos com a utilização de cimentos com altos teores de escória tende a aumentar com o tempo e o ganho de resistência pode se dar em períodos mais longos. Estudos, como o de Khatib e Hibbert (2005), apontam para um crescimento ainda maior após os 28 dias de idade, nesse sentido pode-se esperar um melhora ainda maior nos resultados de resistência desse trabalho.

Ao longo do período que os corpos-de-prova prismáticos submetidos ao carregamento central permanente ficaram expostos em ambiente, foi realizado o mapeamento das fissuras, como apresentado na Figura 7 (6 meses de idade) e Figura 8 (24 meses de idade).

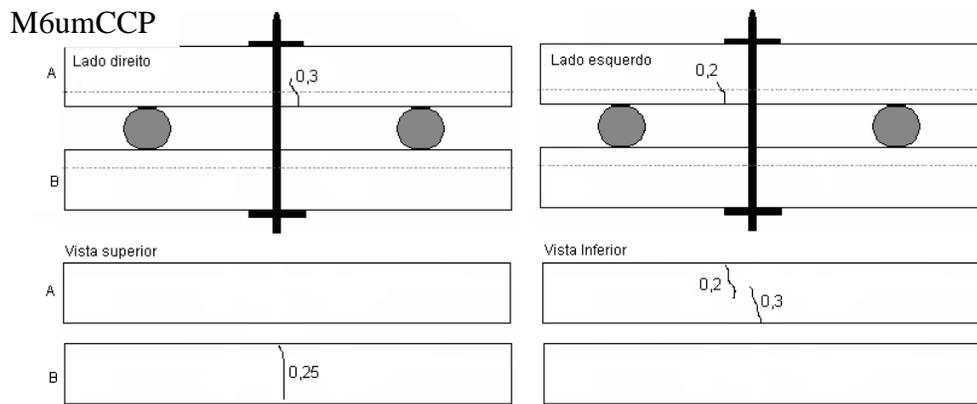


Figura 7. Mapeamento das fissuras nos concretos que ficaram sob carregamento central permanente por 6 meses (M6umCCP).

Os concretos M6umCCP da Figura 7 tiveram aberturas de fissuras de 0,2mm e 0,3mm. Ao longo do período de exposição houve um aumento 0,3 mm para 0,4 mm e 0,25 mm para 0,35 mm. Observou-se nos primeiros seis meses de idade que o pórtico utilizado para a aplicação do carregamento, assim como o monitoramento da abertura de fissura foi eficaz, uma vez que a abertura de fissuras ficou na faixa de 0,3mm e 0,4mm, conforme delineado no programa experimental.

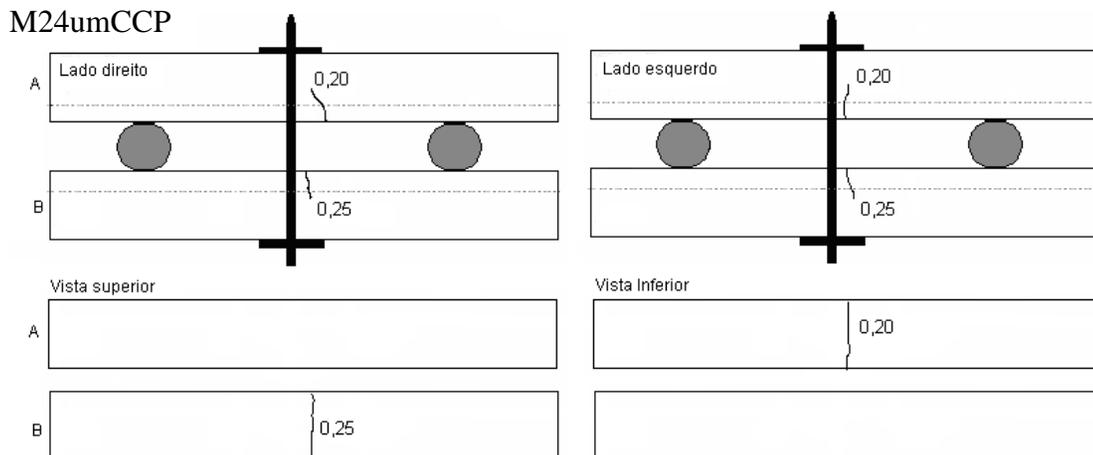


Figura 8. Mapeamento das fissuras nos concretos que ficaram sob carregamento central permanente por 24 meses (M24umCCP).

As fissuras nos corpos-de-prova prismáticos M24umCCP (submetidos à cura úmida) ficaram com aberturas variando entre 0,20 mm a 0,25 m. Aos 24 meses o comportamento das fissuras foi similar às outras idades. As aberturas iniciais eram de 0,2mm a 0,25mm, e chegando a 0,4mm nas idades de ensaio.

Alguns fatores podem ter ocasionado o aumento da abertura de fissuras nos corpos-de-prova ao longo do tempo, entre eles pode-se destacar a carga aplicada permanentemente nesses concretos e o tempo que eles ficaram submetidos a essa carga. Era de se esperar que a abertura de fissuras não fosse permanecer constante pelas próprias propriedades do material (como fluência), mesmo com o suporte da barra de aço. O torque aplicado nos corpos-de-prova também pode ter influenciado nas aberturas de fissuras, pois apesar do valor de torque ter sido definido experimentalmente, cada concreto (nas idades de ensaio e cura) pode apresentar respostas diferentes, como observado no mapeamento, em que algumas amostras tiveram abertura de fissuras maiores.

Em estudos realizados por Vidal et al (2004; 2007) e François et al (2006), que mapearam aberturas das fissuras decorrentes de carregamento, sob ambiente salino por 14 e 17 anos, respectivamente, pode-se observar dois tipos de fissuras, as transversais, induzidas pela ação de carregamento (flexão), e as longitudinais na viga que são referentes à corrosão da armadura, ou seja, fissuras que coincidem com a armadura.

3.1 Profundidade de penetração de cloretos

Na Tabela 5 são apresentados os resultados de profundidade de penetração de cloretos nos concretos sem carregamento, sob carregamento central de curta duração e sob carregamento central permanente.

Tabela 5. Profundidade de penetração de cloretos sob diferentes condições de carregamento e sem aplicação de carga.

Amostra	Média (mm)	Desvio padrão
M6umSC	0,1	0,1
M12umSC	2,2	0,6
M18umSC	2,3	1,3
M24umSC	2,6	0,7
M6umCCCD	0,2	0,0
M12umCCCD	2,2	0,7
M18umCCCD	1,9	1,1
M24umCCCD	2,5	0,6
M6umCCP	3,3	1,8
M12umCCP	1,7	0,8
M18umCCP	0,3	0,0
M24umCCP	3,0	1,0

Na Tabela 6 são apresentadas as comparações estatísticas entre os três tipos de carregamento utilizados neste trabalho: carregamento permanente pontual - CCP, carregamento de curta duração - CCCD, sem carregamento - SC, nas diferentes idades de ensaio, para os resultados de penetração de cloretos.

Tabela 6. Comparação entre os resultados de penetração de cloretos.

Concreto (corpos-de-prova prismáticos)	Idade de ensaio	Diferença entre resultados de penetração de cloretos
M6umCCP – M6umCCCD	6 meses	Não (Penetr.cloretos CCP > Penetr.cloretos CCCD)
M6umCCP – M6umSC		Não (Penetr.cloretos CCP > Penetr.cloretos SC)
M6umCCCD - M6umSC		Não (Penetr.cloretos CCCD > Penetr.cloretos SC)
M12umCCP – M12umCCCD	12 meses	Não (Penetr.cloretos CCP < Penetr.cloretos CCCD)
M12umCCP – M12umSC		Não (Penetr.cloretos CCP < Penetr.cloretos SC)
M12umCCCD – M12umSC		Não (Penetr.cloretos CCCD = Penetr.cloretos SC)
M18umCCP – M18umCCCD	18 meses	Não (Penetr.cloretos CCP < Penetr.cloretos CCCD)
M18umCCP – M18umSC		Não (Penetr.cloretos CCP < Penetr.cloretos SC)
M18umCCCD – M18umSC		Não (Penetr.cloretos CCCD < Penetr.cloretos SC)
M24umCCP – M24umCCCD	24 meses	Não (Penetr.cloretos CCP > Penetr.cloretos CCCD)
M24umCCP – M24umSC		Não (Penetr.cloretos CCP > Penetr.cloretos SC)
M24umCCCD – M24umSC		Não (Penetr.cloretos CCCD < Penetr.cloretos SC)

Aos 6 meses e aos 24 meses a penetração de cloretos foi maior em concretos submetidos ao carregamento central permanente em relação aos concretos sob carregamento central de curta duração e sem carregamento; porém, nesses casos não houve diferença significativa entre os resultados. Aos 12 meses de idade, os concretos com carregamento central permanente tiveram valores de penetração de cloretos menor que os concretos submetidos ao carregamento de curta duração e sem carregamento, e nesse caso também não houve diferenças significativas entre os resultados.

Ao longo dos 24 meses de idade a ação de carregamento, quer seja de curta duração ou permanente, não influenciou significativamente nos resultados de penetração de cloretos em quase todas as idades estudadas.

Ao comparar esses resultados com os obtidos em pesquisas de Vidal et al (2004), Vidal et al (2007) e François et al (2006), observa-se que o fator tempo e o ambiente salino são fundamentais para que o carregamento e, conseqüentemente, a abertura de fissuras, influencie nos resultados de penetração de cloretos. Pesquisas como a de Vidal et al (2007), que deixaram as amostras expostas em ambientes sob névoa salina por um período de mais de 10 anos, obtiveram resultados significativos apenas após 5 anos de exposição. Neste sentido, períodos mais longos devem ser considerados em pesquisas futuras.

Analisando o comportamento de amostras com diferentes porcentagens de escória de alto-forno, submetidas a um carregamento contínuo, An Cheng et al (2005) verificaram que a abertura de fissuras afeta o tempo de início de corrosão de armaduras. Os corpos-de-prova com maior abertura de fissuras foram as que iniciaram primeiro o processo corrosivo; porém, a quantidade de escória adicionada à mistura não influenciou nos resultados, ou seja, com o aumento do teor de escória de alto-forno não teve uma diminuição na velocidade e propagação da corrosão da armadura.

De acordo com o Ayra e Darko (1996) a frequência do aparecimento de fissuras tem influência na intensidade de corrosão que a estrutura está sujeita. Quanto maior a quantidade de fissuras, maior é a intensidade de corrosão no concreto armado. Um fato a ser destacado, neste caso, é a importância do concreto de cobrimento para diminuir esse processo. Da mesma forma, essa espessura pode ser um fator tão importante nesse contexto quanto à própria incidência de fissuras na estrutura. Assim, atenta-se para a importância de estudos sobre o concreto de cobrimento, o que possibilita a obtenção de informações relevantes que contribuem para a produção de concretos duráveis.

Quanto ao período de cura adotado, Thomaz (2005) verificou que o tempo de cura úmida de 7 dias é suficiente para que o concreto adquira as propriedades desejadas, porém, esse prazo depende do

tipo de cimento e da relação água/cimento utilizada. No entanto, quando se utiliza cimentos com adições minerais um tempo maior de cura é necessário, como é o caso de cimento com escória de alto-forno, em que seu processo de hidratação é mais lento que o cimento comum (Çakir; Akoz, 2006; Furnas, 1997; Thomaz, 2005).

Observa-se também em estudos como o de Castro (2003) e Braun (2003) que cimentos com maior teor de adição, como o CP III 32, necessitam de um período maior de cura, em comparação aos outros tipos de cimentos.

3.2 Avaliação da microestrutura

Aos seis meses de idade apenas dois tipos de amostras foram selecionados para ensaios de microestrutura. Essas amostras foram retiradas da região tracionada dos corpos-de-prova prismáticos sem carregamento (SC) e submetidos ao Carregamento Central Permanente (CCP). Ambos ficaram em cura úmida por 7 dias antes de sofrer carregamentos. Na Figura 9 é apresentada uma amostra sem carregamento.

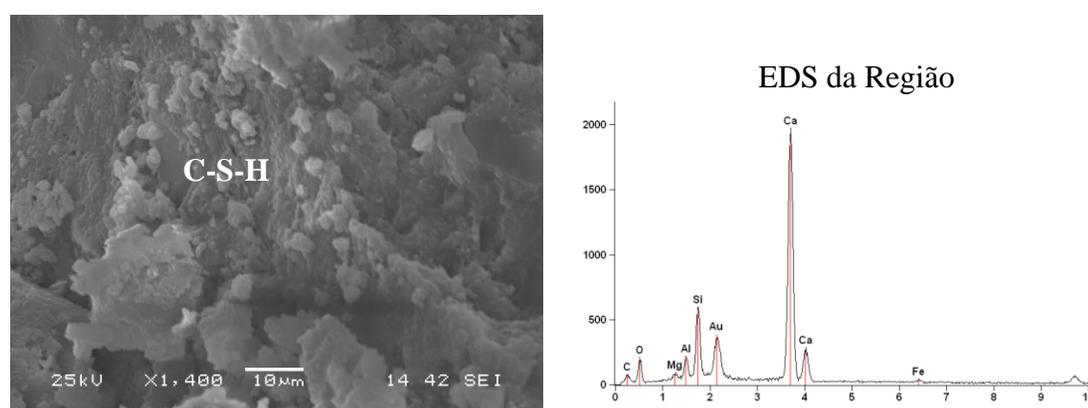


Figura 9. Concreto submetido à cura úmida, sem carregamento, aos seis meses de idade.

Na Figura 9 observa-se uma área com morfologia densa e amorfa (C-S-H Tipo III ou IV), o que é mais comum nesse caso por se tratar de amostras em idades mais avançadas. Cheng et al (2005) observaram nas micrografias de concreto com diferentes teores de escória de alto-forno em elevadas porcentagens, uma estrutura mais densa, com poucas agulhas de etringita e com poros capilares menores que 50 nm, que podem ter sido preenchidos por produtos como o C-S-H. O pico de Au surgiu no EDS da região da Figura 9 pode ser em função da metalização com ouro.

A fase C-S-H ocupa um volume de 50% a 60% de sólidos da pasta de cimento, sendo o principal responsável pelas propriedades da pasta, como a resistência à compressão axial. Sua estrutura depende da temperatura e do espaço livre na mistura para sua hidratação (Baroghel-Bouny, 1994; Irassar, 2004). Essa fase pode ser encontrada nas seguintes morfologias: Tipo I – fibrosas, normalmente em forma de “ouriço”, quando a hidratação está em desenvolvimento (primeiras idades) para fora do grão de C_3S com espaço disponível suficiente; Tipo II – alveolar ou reticulado, também chamado de “favo de mel”, que ocorre em conjunto com o C-S-H Tipo I; Tipo III e IV – proeminente em idades mais avançadas, constitui uma morfologia densa e amorfa, difícil de ser definida e pode constituir uma boa parcela dos produtos hidratados totais. Os produtos característicos em estágios mais avançados da hidratação são o C-S-H tipo III e IV e mais $Ca(OH)_2$ (Taylor, 1997; Ghosh, 2002).

De acordo com Kurdowski (2014) existem 4 formas morfológicas da fase C – S – H: fibroso, malha, partículas isométricas e esféricos conglomerados, pertencentes ao C – S – H interno e identificados como um gel firme sob um microscópio eletrônico

Na Figura 10 observa-se a microestrutura do concreto submetido ao carregamento central permanente em cura úmida por 7 dias, aos seis meses de idade e na Figura 11 é apresentada a

microanálise em três pontos desse mesmo concreto.

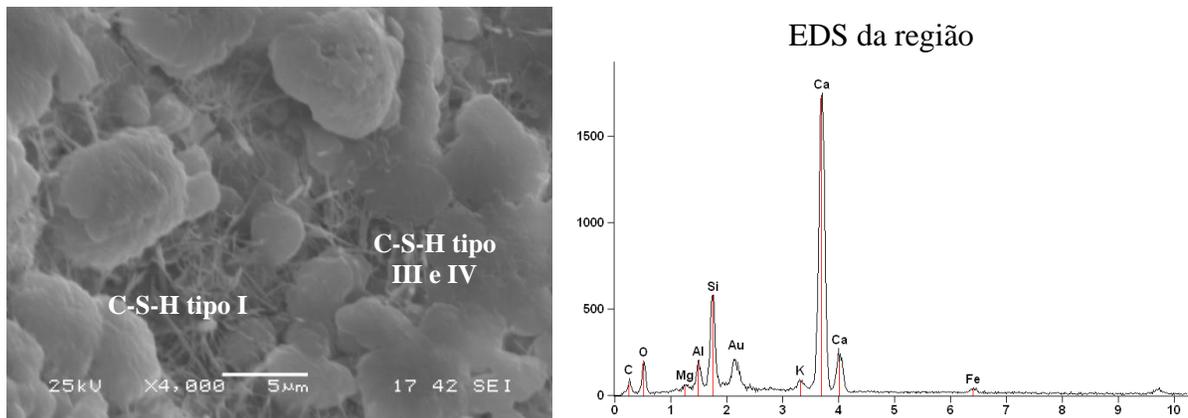


Figura 10. Concreto submetido à cura úmida por 7 dias e carregamento central permanente, aos seis meses de idade.

Na imagem da Figura 10 observam-se algumas agulhas, mas no EDS o elemento enxofre (S) não está presente para que se configurasse uma etringita. Nesse caso podem ser agulhas de C-S-H, com morfologia fibrosa (Tipo I) (Taylor, 1997; Ghosh, 2002). Observam-se também as fases C-S-H tipo III e tipo IV.

Em misturas utilizando cimento de alto-forno, a morfologia fibrilar do C-S-H do cimento Portland sem adições (clínquer Portland), é gradualmente substituída por uma morfologia diferente, que Richardson (1999) denomina de “folha” ou “tipo lâminas”. Esse autor relata que essa mudança de morfologia é responsável pelo melhor desempenho e maior durabilidade das misturas com essa adição. Morfologias essas ainda não observadas na idade de 6 meses de ensaio.

A Figura 11 apresenta três pontos selecionados do concreto submetido à cura úmida por 7 dias e carregamento central permanente. Na composição elementar pelo EDS dos três pontos encontram-se os mesmos elementos Ca, Si, Al e Mg.

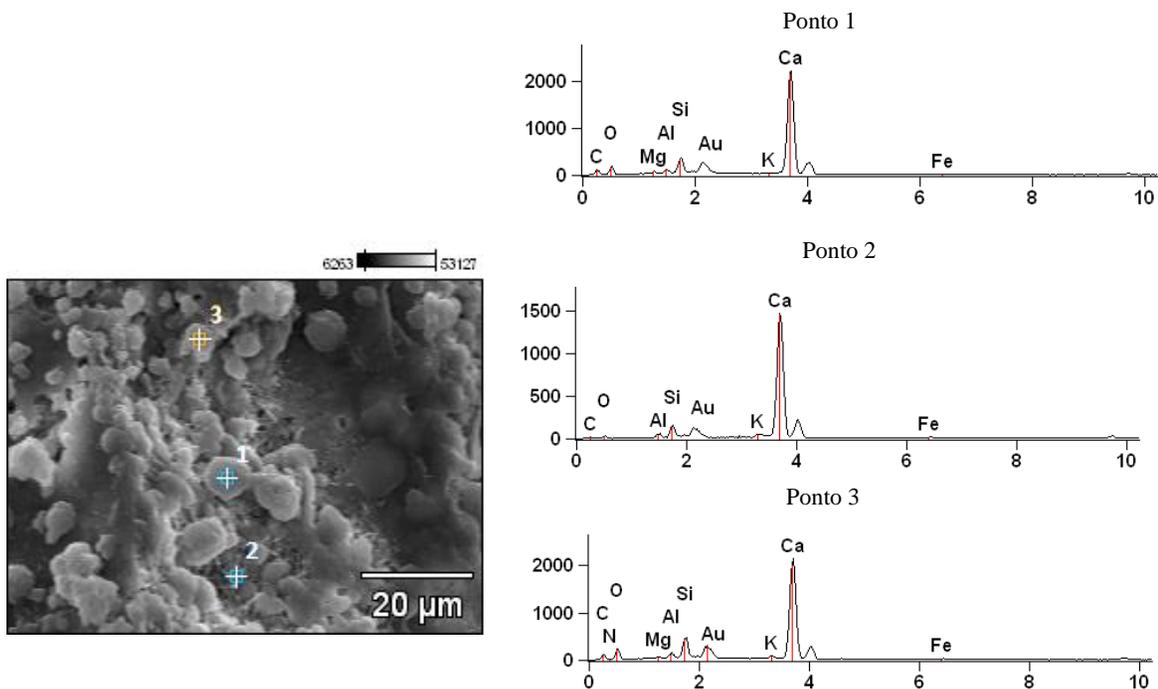


Figura 11 – Microanálise EDS em três pontos do concreto sob carregamento central permanente (CCP).

Na microanálise detectou-se a presença dos elementos Ca, K, Si, Al, Mg, O e C, que são típicos dos produtos de hidratação do cimento.

O C-S-H resultante da hidratação do cimento Portland e da escória de alto-forno apresentam morfologias semelhantes; porém, o grão de escória apresenta elevadas porcentagens de Mg e Al (Richardson, 1999).

Na Figura 12 é apresentada a micrografia de uma amostra de concreto sem carregamento, submetidas à cura úmida por 7 dias, aos 24 meses de idade.

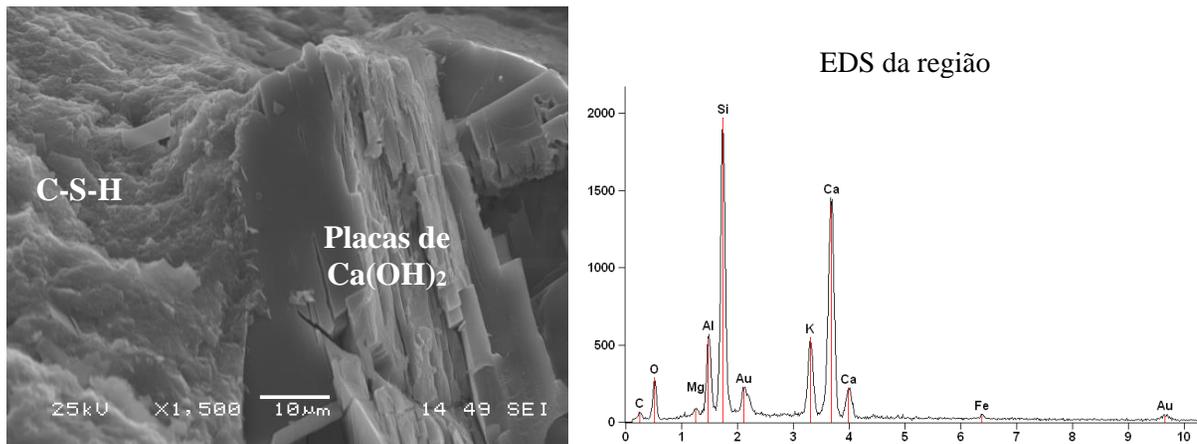


Figura 12. Micrografia e microanálise da amostra de concreto sem carregamento, aos 24 meses de idade.

Na Figura 12 nota-se a presença de possíveis placas de Ca(OH)₂ e C-S-H. Como verificado por Baroghel-Bouny (1994) Mehta e Monteiro (2008), a fase correspondente ao Ca(OH)₂ mantém a alta alcalinidade do sistema, preservando a estabilidade do C-S-H e do concreto de cobertura.

O Ca(OH)₂ ocupa um volume de sólidos de 20% a 25% na pasta de cimento hidratada. Por ter uma composição com estequiometria definida, se formam em grandes cristais com morfologia prismática hexagonal. Essa morfologia pode variar também em função da temperatura de hidratação e das impurezas presentes. Devido a esses fatores, podem-se formar pilhas de grandes placas.

Essa fase mantém a elevada alcalinidade do sistema, preservando a estabilidade do C-S-H e da camada de cobertura da armadura (BAROGHUEL-BOUNY, 1994; CASTRO, 2003).

Na Figura 13 são exibidas as micrografias e EDS do concreto submetido ao carregamento central de curta duração, aos 24 meses de idade.

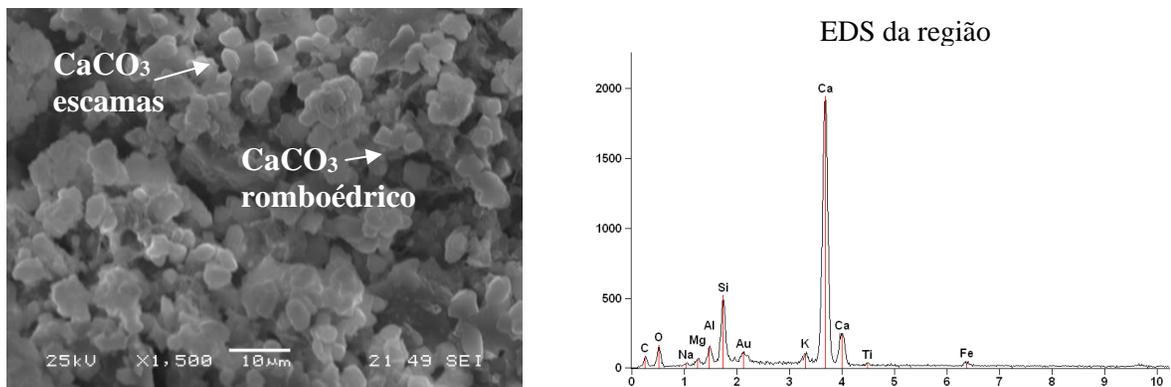


Figura 13 – Micrografia e microanálise da amostra de concreto submetido ao carregamento central de curta duração, aos 24 meses de idade.

Na Figura 13 pode-se observar a formação do carbonato de cálcio na forma de cristais romboédricos e em forma de escamas, sobre um C-S-H poroso e possivelmente carbonatado. Observa-se nos compostos hidratados formados, a presença de carbonato de cálcio (CaCO_3), com morfologias distintas sobre C-S-H que também já pode estar em processo de modificação pela ação do tempo, e devido a sua porosidade. A fase C-S-H porosa e a formação de CaCO_3 indicada na Figura 13 foi observada também por Sakar et al (2001) em seu estudo, com o CaCO_3 em forma de escamas, porém, em grande quantidade.

Os sais dissolvidos na água do mar são principalmente cloretos e sulfatos. No caso dos íons cloretos (Cl^-), quando em contato com a alumina, o monocloroaluminato se cristaliza em forma de placas hexagonais instáveis. O cloreto entra na rede cristalina dos silicatos hidratados (C-S-H) e transforma as fibras em redes reticuladas, tornando essa fase mais porosa. Regourd et al (1980) observaram também a presença de CaCO_3 em micrografias de amostras de concretos (compostos hidratados do cimento Portland) expostos à névoa salina.

Na Figura 14 é apresentada a micrografia e microanálise do concreto submetido ao carregamento central permanente (CCP), aos 24 meses de idade.

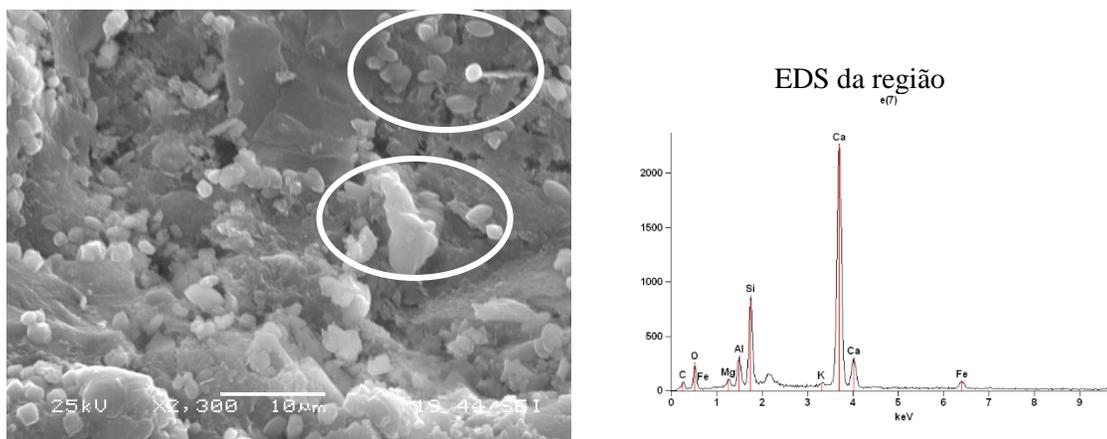


Figura 14. Micrografias e microanálises dos concretos com carregamento central permanente.

Na amostra da Figura 141 observa-se área com uma microestrutura mais densa, com diferentes morfologias de CaCO_3 ; porém, alguns produtos que chamaram atenção, e que estão em destaque nessa micrografia. Por sua morfologia podem configurar matéria orgânica, sendo provavelmente microorganismos (Ribas Silva, 1996). Porém, para se confirmar essa hipótese seria necessária uma análise microbiológica, que não foi realizada por não ser objeto desse estudo. Nesse caso, a fissura induzida por carregamento poderia ter propiciado a entrada desses microorganismos, uma vez que não foram observados nos concretos SC e CCCD.

Ao comparar as micrografias, quanto aos carregamentos CCCD e CCP e sem carregamento (SC), observa-se que a amostra com maior compacidade e menor quantidade de poros é a referência (SC). Quanto aos compostos formados, nas micrografias do concreto CCCD pode ser vista a fase C-S-H carbonatada. Quando submetido ao carregamento central permanente, a fase de C-S-H está densa com a formação de microorganismos, e a porosidade nesse caso não é elevada, provavelmente pela cura úmida aos 7 dias. E no concreto de referência (SC) tem-se a formação do Ca(OH)_2 , assim como a fase do C-S-H densa e homogênea. Observa-se assim a influência das fissuras na durabilidade do material, uma vez que no concreto com as placas de Ca(OH)_2 tem-se uma maior alcalinidade do sistema e a preservação da fase C-S-H, conseqüentemente, da camada de cobrimento (Baroghel-Bouny, 1994; Mehta, Monteiro; 2008).

4. CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos de penetração de cloretos observou-se que a abertura de fissuras não influenciou na entrada de íons cloretos na estrutura, não havendo diferenças significativas entre os tipos de carregamento e o concreto de referência (sem carregamento).

Estudos realizados na Europa sobre o tema utilizam períodos maiores de exposição ao ambiente externo para obtenção de resultados mais expressivos quanto ao comportamento da fissura na penetração de íons cloretos no concreto. Nesse sentido vê-se que para os concretos estudados, um período maior seria necessário para que houvesse resultados mais significativos entre os tipos de carregamento e sem carregamento. Alguns fatores também podem ter contribuído para esse resultado, ressaltando-se nesse caso a utilização de cimento com adição de escória de alto-forno, que é mais resistente ao ataque de cloretos, em comparação ao CO₂. A névoa salina utilizada parece também não ter contribuído o suficiente para que se pudessem ter diferenças entre os tipos de carregamento e sem carregamento.

Ao comparar as tolerâncias de abertura de fissura da norma brasileira com as normas internacionais verifica-se que as aberturas permitidas para a norma brasileira são maiores. Apesar das condições climáticas na Europa, por exemplo, ser bem diferentes que o Brasil onde se tem variações de temperatura que oscilam de -5°C a 30°C como é o caso da França e no Brasil tem-se variações que giram em torno de 20°C a 35°C, porém, vê-se que o controle tecnológico de qualidade dos materiais e execução no Brasil tende a ser menos rigoroso, com isso as aberturas de fissuras podem ser um agravante nesse contexto. Por outro lado, observa-se nesse estudo que nas situações climáticas brasileiras, até a idade de dois anos não houve diferenças significativas entre os resultados de amostras sob a condição de carregamento determinada nesse estudo a de referência ou seja, sem carregamento.

Até os 12 meses observou-se nas micrografias e microanálises a formação de produtos de hidratação do cimento, sendo encontrado principalmente as fases C-S-H, além de cristais de Ca(OH)₂, agulhas de etringita e de C-S-H e grãos de escória com diferentes dimensões. Os produtos de deterioração (CaCO₃ e C-S-H carbonatado) foram encontrados a partir dos 18 meses, nas situações de carregamento e cura. Porém, apenas aos 24 meses fica mais evidente que nos concretos submetidos aos tipos de carregamento (CCP e CCCD) foi observada a presença de CaCO₃ e C-S-H carbonatado e na amostra sem carregamento foram encontradas apenas fases de C-S-H e Ca(OH)₂. No entanto, no concreto com abertura de fissuras (CCP) foram encontrados possíveis microorganismos, que pode ter entrado pela fissura.

Do ponto de vista microestrutural observou-se que aos 24 meses o carregamento influenciou nos resultados das amostras estudadas, uma vez que nos concretos com abertura de fissuras foram visualizados na microscopia a presença de microorganismos em amostras submetidas a carregamento permanente. Esses compostos só foram encontrados nos concretos com abertura de fissuras (em carregamento central permanente). Nesse sentido, vê-se que a fissura pode ter sido um caminho para entrada desses microorganismos, as quais podem ter consequências na durabilidade, como verificado na literatura.

Assim, observa-se que a fissura (quando constantemente aberta) pode influenciar na microestrutura do concreto ao longo do tempo, em função do caminho preferencial para entrada de agentes agressivos e microorganismos. Fato esse que não foi observado nos concretos com carregamento de curta duração e sem carregamento.

5. REFERÊNCIAS

ACI – American Concrete Institute (2016). *Standard practice for curing concrete. ACI 308-2016*. ACI Committee 308, 2016.

- Alexander, M. G., Mackechnie, J. R., Ballim, Y. (2001), *Use of durability indexes to achieve durable cover concrete in reinforced concrete structures*. Materials science of concrete VI. Ed. By Sidney Mindess, Jan Skalny. Published by American Ceramic Society.
- Andrade, T. (2005), *Tópicos de durabilidade do concreto. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. Ed. G.C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2 v. Volume 2. p. 753-792.
- Arya, C., Ofori-Darko, F. K. (1996). *Influence of crack frequency on reinforcement corrosion in concrete*. Cement and Concrete Research, v.26, No. 3, p. 345-353, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(96\)85022-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(96)85022-8)
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2014). *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2020). *NBR 16889: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2015). *NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). *NBR 5739: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Baroghel-Bouny, V. (1994), *Caractérisation des patês de ciment et des bétons – Méthodes, analyses, interpretations*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, IST – Section des publications.
- Braun, V. (2003), “*Influência das condições de moldagem e cura nas características do cobrimento de diversos concretos*”. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Goiás – UFG.
- Çakir, Ö., Aköz, F. (2006), *Effect of curing conditions on the mortars with and without GGBFS*. Construction and Building Materials. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.08.013>
- Cascudo, O. (2005), “*Inspeção e diagnóstico de estrutura de concreto com problemas de corrosão da armadura*”. In: *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. Ed. G.C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2 v. Volume 2. p. 985-1016.
- Cascudo, O. (1997), *O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas*. São Paulo: Pini; Goiânia, GO: Editora UFG.
- Castro, A. (2003), *Influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito a carbonatação*. Dissertação de mestrado, Universidade de Goiás.
- Cheng, A., Huang, R., Wu, J., Chen, C. (2005), *Influence of GGBS on durability and corrosion behavior of reinforced concrete*. Materials Chemistry and Physics, v. 93, p. 404–411. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2005.03.043>
- Crauss, C. (2010), *Penetração de cloretos em concretos com diferentes tipos de cimento submetidos a tratamento superficial*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria-RS.
- Dedavid, B. A., Gomes, C. I., Machado, G. (2007), *Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras - materiais poliméricos, metálicos e semicondutores*. Porto Alegre: EDIPUCRS, 60 p.
- Figueiredo, C. R., Nepomuceno, A. A. (2004), *Influência da absorção na carbonatação de estruturas de concreto in loco*. 46º Congresso Brasileiro do Concreto, Florianópolis. Anais... São Paulo: IBRACON, v. 1.
- Figueiredo, E. P. (2005), “*Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*”. Ed. G.C. Isaia. São Paulo: IBRACON, Volume 2. p. 829-856.
- Fortes, L. C., Andrade, J. C. (1995), *Corrosão na Armadura do Concreto Armado: Influência dos Agentes Cloretos e da Carbonatação*. ASTEF - Associação Técnico-Científica Engenheiro Paulo de Frontin. URL: http://www.electus.com.br/usuarios/lyttelto/InfluAgClorCarb/Influ_index.htm
- François, R., Castel, A., Vidal, T., Vu, N. A. (2006), *Long term corrosion behavior of reinforced concrete structures in chloride environment*. J. Phys. IV France 136, 285–293. <https://doi.org/10.1051/jp4:2006136029>

- Furnas, E. L. C. (1997), *Concreto massa estrutural projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades*. São Paulo: Pini.
- Ghali, A., Favre, R. (1994), “*Concrete Structures: Stresses and Deformations*”. E&FN Spon, an imprint of Chapman & Hall, 2-6 Boundary Row, London SE1 8HN, UK, second edition.
- Ghosh, S. N. (2002), “*Advances in cement technology: Chemistry, Manufacture and Testing*”. Second Edition, published by Tech Books International, New Delhi, India.
- Hearn, N., Figg, J. (2001), *Transport mechanisms and damage: Current issues in permeation characteristics of concrete*. Materials science of concrete. Ed. By Jan Skalny, American Ceramic Society. v. VI, p.327-376.
- Helene, P. R. L. (1997), *Vida útil das estruturas de concreto armado*. In: IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções. VI Congresso de Controle de Qualidade – COMPAT 97. Anais... Porto Alegre: Departamento de Engenharia Civil – UFRS, p. 1-30.
- Helene, P., Diniz, J. Z. (2001), *Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto*. 43º Congresso Brasileiro de Concreto. Curso de durabilidade. 18 a 23 de agosto de 2001, Foz do Iguaçu – PR.
- Helmuth, R., Stark, D. (1992), *Alkali-silica reactivity mechanisms*. Materials Science of Concrete III. Ed. By Jan Skalny. American Ceramic Society, USA.
- Illston, J. M. (1994), *Construction Materials – Their nature and behaviour*. 2ª ed. London – UK: E & FN SPON, 518p.
- Irassar, E. (2004), *Hormigón: Naturaleza y Propiedades. Hormigones Especiales – XV. Reunión Técnica Ing. Marcelo Wainsztein, Asociación Argentina de Tecnología del hormigón*. Santa Fe, 21 al 24 de octubre de 2004.
- Ismail, M., Gagné, R., François, R., Toumi, A. (2006), *Measurement and modeling of gas transfer in cracked mortars*. Materials and Structures, v. 39, p. 43–52, <https://doi.org/10.1617/s11527-005-9025-4>
- Jucá, T. R. P. (2002), “*Avaliação de cloretos livres em concretos e argamassas de cimento Portland pelo método de aspersão de solução de nitrato de prata*”. Dissertação mestrado, Universidade Federal de Goiás. Goiânia, Brasil.
- Khatib, J. M., Hibbert, J. J. (2005), *Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin*. Construction and Building Materials, v. 19 460–472, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.07.017>
- Kim, M. Y., Yang, E. I., Yi, S. T. (2013), *Application of the colorimetric method to chloride diffusion evaluation in concrete structures*. Construction and Building Materials, v. 41, p. 239-245, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.084>
- Konin, A., Franfois, R., Arliguie, G. (1998), *Analysis of progressive damage to reinforced ordinary and high performance concrete in relation to loading*. Materials and Structures/Matériaux et Constructions, v. 31, p. 27-35, <https://doi.org/10.1007/BF02486411>
- Lawrence, C. D. (2006), *Physiochemical and Mechanical Properties of Portland Cements. Lea’s Chemistry of Cement and Concrete*. Ed. By Peter C Hewlett. Elsevier Butterworth Heinemann, USA.
- Martins, A. R. (2001), *Efeito da cura térmica e de cimento com escória granulada de alto-forno na durabilidade do concreto de cobrimento*. Dissertação mestrado, Universidade Estadual de Campinas-SP.
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. (2008), “*Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*”. 3ª Edição, São Paulo: IBRACON.
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. (2014), *Concreto. Microestrutura, propriedades e materiais*. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 751 p.
- Midness, S., Young, J. F. (1981), *Concrete*. Prentice-Hall, INC. Englewood Cliffs, New Jersey – USA.
- Montgomery, D. C. (1991), *Design and Analysis of Experiments*. New York: John Wiley & Sons.

- Real, L. V., Oliveira, D. R. B., Soares, T., Medeiros, M. H. F. (2015), *Método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata para la evaluación de la penetración de cloruros en concreto: estado del arte*. Revista ALCONPAT, 5(2), 149 - 159. <https://doi.org/10.21041/ra.v5i2.84>
- Ribas Silva, M. (1996), *Climates and biodeterioration of concrete. Durability of building materials & components 7. Volume one – Prediction, degradation & materials*. Edited by Christer Sjostrom. Published by E & FN Spon. Chapman & Hall, London, UK.
- Richardson, I. G. (1999). *The nature of C-S-H in hardened cements*. Cement and Concrete Research, v. 29, p. 1131–1147, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00168-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00168-4)
- Sarkar, S. L., Aimin, X., Jana, D. (2001), *Scanning Electron Microscopy, X-Ray microanalysis of concrete. Handbook of analytical techniques in concrete science and technology: Principles, techniques and applications*. Construction and Building Materials, USA, Ed. By V. S. RAMACHANDRAN, J. J BEAUDOIN.
- Taylor, H. F. W. (1997), “*Cement Chemistry*”. 2nd Edition. Published by Thomas Telford.
- Vidal, T., Castel, A., Francois, R. (2004), *Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete*. Cement and Concrete Research, v. 34, p. 165–174.
- Vidal, T., Castel, A., François, R. (2007), *Corrosion process and structural performance of a 17 year old reinforced concrete beam stored in chloride environment*. Cement and Concrete Research, 37 (11), p. 1551–1561. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.004>
- Regourd, M. (1980), *Structure and behavior of slag Portland cement hidrates*. In: International Congress on the Chemistry of Cement, 7Th. Proceedings. Paris.
- Richardson, I. G. (1999). *The nature of C-S-H in hardened cements*. Cement and Concrete Research, v. 29, p. 1131–1147, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00168-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00168-4)
- Romano, F. S. (2009), *Estudo do ingresso de cloretos em concretos localizados no litoral norte do Rio Grande do Sul*. Dissertação Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul-RS.
- Silvestro, L., Romano, F. S., Dal Molin, D. C. C. (2021), *Penetração de cloretos em concretos expostos em zona de atmosfera marinha por um período de 9 anos*. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 101-118, <https://doi.org/10.1590/s1678-86212021000100496>
- Song, H., Lee, C., Ann, K. Y. (2008), *Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments*. Cement & Concrete Composites. v. 30, p. 113–121, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.09.005>
- Taylor, H. F. W. (1997), *Cement Chemistry*. 2nd Edition. Published by Thomas Telford.
- Thomaz, E. (2005), *Execução, controle e desempenho das estruturas de concreto. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. Ed. G.C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2 v, volume 1. p. 527-582.
- Vidal, T., Castel, A., Francois, R. (2004), *Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete*. Cement and Concrete Research, v. 34, p. 165–174, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00246-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00246-1)
- Vidal, T., Castel, A. François, R. (2007), *Corrosion process and structural performance of a 17 year old reinforced concrete beam stored in chloride environment*. Cement and Concrete Research, v. 37, p. 1551–1561, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.004>
- Kurdowski, W. (2014), *Cement and Concrete Chemistry*. Springer, Dordrecht, <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-7945-7>
- Hai-Long, W., Jian-Guo, D., Xiao-Yan, S., Xiao-Long Z. (2016), *Characteristics of concrete cracks and their influence on chloride penetration*. Construction and Building Materials, v. 107, p. 216-225. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.002>