

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

**ANÁLISE DA PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO EM COMPÓSITOS  
CIMENTÍCIOS CONTENDO DIFERENTES TEORES DE ESCÓRIA DE  
ALTO-FORNO**

Thiago Abdala Magalhães

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG  
Abril/2019

**THIAGO ABDALA MAGALHÃES**

**ANÁLISE DA PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO EM COMPÓSITOS  
CIMENTÍCIOS CONTENDO DIFERENTES TEORES DE ESCÓRIA DE  
ALTO-FORNO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil. Área de concentração: Construção Civil. Linha de pesquisa: Materiais Cimentícios.

Orientador: Prof. Dr. Aldo Giuntini de Magalhães

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG  
2019

M188a	<p>Magalhães, Thiago Abdala.  Análise da penetração de íons cloreto em compósitos cimentícios contendo diferentes teores de escória de alto forno [recurso eletrônico] / Thiago Abdala Magalhães. – 2019.  1 recurso online (xxviii,192 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Aldo Giuntini de Magalhães.</p> <p>Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Apêndices: f. 184-192.</p> <p>Bibliografia: f. 171-183.</p> <p>Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Construção civil - Teses. 2. Concreto - Teses. 3. Durabilidade (Engenharia) - Teses. 4. Escória – Teses. 5. Íons – Migração e velocidade – Teses. I. Magalhães, Aldo Giuntini de. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 691(043)</p>
-------	---

Ficha catalográfica: Biblioteca Profº Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG

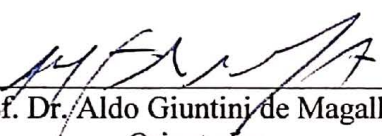
THIAGO ABDALA MAGALHÃES

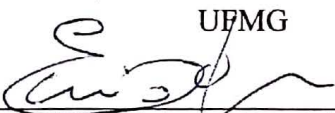
**"ANÁLISE DA PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS CONTENDO DIFERENTES TEORES DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO"**

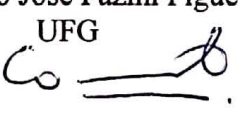
Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil e aprovada em sua forma final pelo Mestrado em Construção Civil do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

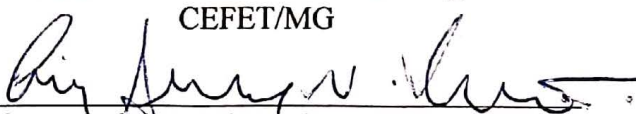
Belo Horizonte, 24 de abril de 2019

BANCA EXAMINADORA

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Aldo Giuntini de Magalhães  
Orientador  
UFMG

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Enio José Pazini Figueiredo  
UFG

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues  
CEFET/MG

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Luiz Antônio Melgaço Nunes Branco  
UFMG

Dedico este trabalho a todas as pessoas que contribuíram,  
direta ou indiretamente, com a sua realização.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por me abençoar em todos os dias da minha vida;

Aos meus queridos pais e ao meu irmão, minhas maiores motivações, por sempre acreditarem e confiarem em mim em todos os momentos;

À Fernanda pelo apoio incondicional, companheirismo e compreensão durante este período;

Ao meu orientador, professor Dr. Aldo Giuntini de Magalhães pelo acolhimento, constante incentivo e por não ter medido esforços para propiciar todas as condições para a realização deste trabalho;

A CAPES e a FAPEMIG pelo apoio financeiro recebido;

À InterCement pelo fornecimento dos cimentos Portland especiais utilizados e pelo apoio técnico no desenvolvimento da pesquisa;

Ao Laboratório de Materiais Cimentícios da Escola de Engenharia da UFMG (LabMac) pelo fornecimento da infraestrutura necessária para realização dos ensaios.

À ViaTest/Laborloc, em especial ao Eng. Raul Roscoe Ramires, pela parceria e atenção na etapa de concepção e caracterização dos concretos produzidos;

Ao Departamento de Estatística do Instituto de Ciências Exatas (ICEx) da UFMG, em especial à Prof. Dra. Edna Afonso Reis, pelo apoio nas análises estatísticas dos resultados da pesquisa;

Ao Centro de Microscopia da UFMG pelo apoio na realização das análises microestruturais;

Aos funcionários do Departamento de Materiais e Construção Civil da Escola de Engenharia da UFMG, em especial ao Ricardo Antônio Barbosa e ao Ederson Rafael Correa, pela constante assistência, amizade e tempo compartilhado durante a intensa rotina de laboratório;

Aos colegas e professores do Programa de Pós-Graduação em Construção Civil;

Aos membros do grupo de pesquisa do Laboratório de Materiais Cimentícios (LabMac), em especial aos amigos Msc. Carla Dabian de Oliveira, Eng. Priscylla Botelho Athayde, Msc. Darlan Ulhoa Leite, Eng. Renata Leal Henriques e aos alunos de iniciação científica Ruan Gustavo Resende Silva e Luiz Gustavo Siqueira Santos.

A todos vocês, minha eterna gratidão por todos os momentos compartilhados.

“Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa,  
nunca tem medo e nunca se arrepende.”

Leonardo Da Vinci

“O começo de todas as ciências é o espanto  
de as coisas serem o que são.”

Aristóteles

## RESUMO

A penetração de íons cloreto é um dos principais fatores responsáveis pela redução da vida útil das estruturas de concreto armado. Estes íons, que podem eventualmente ser introduzidos no concreto a partir dos componentes da mistura ou penetrá-lo em decorrência da ação do meio que o circunda, são capazes de provocar a despassivação das armaduras, propiciando a instauração das condições requeridas para o início de um processo corrosivo, o qual é considerado a manifestação patológica mais recorrente e severa à este tipo de estrutura. O presente trabalho buscou avaliar a resistência à penetração de íons cloreto em concretos produzidos com a utilização de cimentos Portland especiais contendo 0%, 30% e 60% de substituição parcial de clínquer por escória de alto forno, os quais foram dosados de forma a atender aos requisitos de qualidade estabelecidos para as classes de agressividade ambiental II e III, com relação água/cimento de 0,55 e 0,60, respectivamente, conforme prescrito pela norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014). As resistências dos concretos à penetração de íons cloreto foram avaliadas aos 28, 56 e 91 dias, utilizando-se amostras obtidas de corpos de prova cilíndricos nas dimensões de (100 x 200) mm, curados em condição saturada e ensaiadas de acordo com o procedimento estabelecido pela norma finlandesa NT BUILD 492 (NORDTEST, 1999). Além disso, foram realizados outros ensaios complementares para determinação da absorção de água por capilaridade e por imersão, do índice de vazios e das massas específicas, bem como ensaios de caracterização mecânica e medições das resistividades elétricas. Análises microestruturais dos concretos produzidos foram realizadas por meio da técnica de microscopia eletrônica de varredura. Os resultados obtidos demonstraram que as substituições parciais de clínquer por escória de alto forno acarretaram relevantes melhorias em algumas das propriedades analisadas. Os concretos com adição de escória apresentaram índices de consistência similares ou maiores quando comparados aos concretos de referência, sem adições, com uma mesma relação água/cimento. No tocante às propriedades mecânicas, verificou-se, nas idades analisadas, resistências à compressão e à tração menores nos concretos com escória em relação aos de referência, entretanto, percebeu-se que, com o avanço do tempo, as diferenças entre estes valores diminuíram e, em vista disso e das características dos cimentos utilizados, observou-se que os concretos com adição ainda apresentaram capacidade de ganho de resistência na última idade analisada. A incorporação de escória de alto forno provocou também a redução das absorções de água por capilaridade e por imersão em comparação com os concretos de referência, sendo que, no intervalo de utilização de escória analisado (entre 0% e 60%), estas reduções potencializaram-se com o aumento do teor de substituição. Do mesmo modo, menores índices de vazios foram obtidos à medida em que mais escória foi adicionada. Ademais, observou-se, para todos os concretos estudados, um significativo aumento da resistência à penetração de íons cloreto, bem como um considerável aumento da resistividade elétrica destes em relação aos concretos de referência com a mesma idade e relação água/cimento. Nestes casos, constatou-se ainda que as reduções advindas das substituições por escória de alto forno foram mais expressivas do que aquelas provenientes da redução da relação água/cimento. Verificou-se uma efetiva correlação entre os valores de resistividade elétrica superficial e os coeficientes de migração de íons cloreto. As análises microestruturais demonstraram a formação de uma matriz cimentícia mais compacta e refinada quando a escória de alto forno foi incorporada aos concretos analisados.

*Palavra-Chave: concreto; durabilidade; escória de alto forno; migração de íons cloreto.*

## ABSTRACT

The penetration of chloride ions is one of the main factors responsible for reducing the useful life of reinforced concrete structures. These ions, which may eventually be introduced into the concrete from the components of the mixture or penetrate it as a result of the action of the surrounding medium, are capable of provoking the disassembling of the reinforcement, facilitating the establishment of the conditions required for the start of a corrosive process, which is considered the most recurrent and severe pathological manifestation to this type of structure. The present work sought to evaluate the resistance to chloride penetration in concretes produced using special Portland cements containing 0%, 30% and 60% of partial replacement of clinker by blast furnace slag, which were dosed in order to meet to the quality requirements established for environmental aggression classes II and III, with water/cement ratio of 0.55 and 0.60, respectively, as prescribed by the Brazilian standard NBR 6118 (ABNT, 2014). The resistance of the concretes to the penetration of chloride ions was evaluated at 28, 56 and 91 days, using samples obtained from cylindrical specimens measuring (100 x 200) mm, cured in a saturated condition and assayed according to the procedure established by the Finnish standard NT BUILD 492 (NORDTEST, 1999). Furthermore, additional tests were carried out to determine the water absorption by capillarity and by immersion, the voids index and the specific masses, as well as mechanical characterization tests and measurements of electrical resistivity. Microstructural analyzes of the concretes produced were performed using scanning electron microscopy technique. The results showed that the partial substitutions of clinker for blast furnace slag resulted in significant improvements in some of the properties analyzed. The concrete with slag addition presented similar or higher consistency indices when compared to the reference concrete, without additions, with the same water/cement ratio. Regarding the mechanical properties, smaller compressive and tensile strengths were observed in the concrete with slag compared to the reference ones, however, it was observed that, with the advancement of time, the differences between these values decreased and, in view of this and the characteristics of the cements used, it was observed that the concretes with addition still presented capacity of resistance gain in the last analyzed age. The incorporation of blast furnace slag also led to the reduction of water absorption by capillarity and immersion in comparison with the reference concretes. In the range of slag analyzed (between 0% and 60%), these reductions increase in the substitution content. Likewise, lower void indices were obtained as more slag was added. In addition, a significant increase in resistance to chloride ion penetration was observed for all the studied concretes, as well as a considerable increase in their electrical resistivity in relation to the reference concrete with the same age and water/cement ratio. In these cases, it was also observed that the reductions resulting from the substitutions for blast furnace slag were more significant than those resulting from the reduction of the water/cement ratio. There was an effective correlation between the values of surface electrical resistivity and the migration coefficients of chloride ions. The microstructural analysis demonstrated the formation of a more compact and refined cement matrix when blast furnace slag was incorporated into the concretes analyzed.

*Keyword: concrete; durability; blast furnace slag; migration of chloride ions.*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Corrosão generalizada (esquerda) e corrosão por pites ou puntiforme (direita) no aço.....	10
Figura 2.2 - Processo de corrosão eletroquímica.....	12
Figura 2.3 - Expansão dos produtos de corrosão.....	13
Figura 2.4 - Modelo de Tuutti para corrosão de armaduras.....	14
Figura 2.5 - Corrosão de armadura induzida por cloretos.....	15
Figura 2.6 - Formação do pite de corrosão pela ação dos cloretos.....	16
Figura 2.7 - Esquema das principais formas de penetração de cloretos nas estruturas de concreto.....	20
Figura 2.8 - Mecanismos de transporte em estrutura marinha.....	21
Figura 2.9 - Comparação entre configurações típicas de perfis cloretos em concretos expostos à diferentes situações.....	22
Figura 2.10 - Efeitos na difusividade de cloretos em concretos ( $a/c = 0,45$ ) produzidos com diferentes cimentos.....	42
Figura 2.11 - Influência do teor de cinza volante na difusividade de cloretos.....	43
Figura 2.12 - Influência do teor de substituição parcial de cimento por escória de alto forno na difusividade de concretos ( $a/c = 0,40$ ).....	47
Figura 2.13 - Influência do teor de substituição parcial de cimento por escória de alto forno na difusividade de cloretos no concreto.....	48
Figura 2.14 - Efeitos da variação da relação água/cimento na distribuição de poros de concretos produzidos com cimento Portland puro.....	49
Figura 2.15 - Efeitos da relação água/cimento na penetração de cloretos.....	50
Figura 2.16 - Efeitos do tempo de cura na penetração de cloretos no concreto.....	51
Figura 2.17 - Influência do tipo e do tempo de cura de concretos com distintas relações $a/c$ quanto à permeabilidade de cloretos.....	52
Figura 2.18 - Influência da umidade no processo de corrosão de armaduras.....	53
Figura 2.19 - Influência do grau de saturação dos poros na difusividade de cloretos em concretos.....	54
Figura 2.20 - Influência da temperatura no coeficiente de migração de cloretos.....	57
Figura 2.21 - Efeitos da temperatura na penetração de cloretos.....	58
Figura 2.22 - Esquema de ensaio proposto pela norma AASHTO T259.....	63
Figura 2.23 - Esquema de ensaio proposto pela norma NT BUILD 443.....	64
Figura 2.24 - Esquema proposto pela norma NT BUILD 492.....	66
Figura 2.25 - Esquema de ensaio proposto pela norma C1202.....	68
Figura 2.26 - Esquema da técnica de Wenner para medição da resistividade elétrica do concreto.....	72

Figura 3.1 - Distribuição granulométrica a laser do cimento CP00.....	77
Figura 3.2 - Distribuição granulométrica a laser do cimento CP30.....	77
Figura 3.3 - Distribuição granulométrica a laser do cimento CP60.....	77
Figura 3.4 - Curva granulométrica do agregado miúdo utilizado.....	80
Figura 3.5 - Curva granulométrica do agregado graúdo utilizado.....	82
Figura 3.6 - Betoneira utilizada na produção dos concretos.....	86
Figura 3.7 - Ensaio de consistência por abatimento do tronco de cone ( <i>slump test</i> )...	87
Figura 3.8 - Procedimento de desforma e cura dos corpos de prova.....	88
(a) corpos de prova desformados	
(b) identificação dos corpos de prova	
(c) corpos de prova em condição de cura saturada	
Figura 3.9 - Prensa hidráulica VC751.....	91
Figura 3.10 - Aparato utilizado nos ensaios de tração.....	92
Figura 3.11 - Ensaio de absorção de água por capilaridade.....	93
(a) instalação dos corpos de prova no recipiente com água	
(b) marcação da altura da lâmina d'água nos corpos de prova	
Figura 3.12 - Rompimento diametral e medição das alturas de ascensão capilar.....	94
Figura 3.13 - Submersão e ebulição dos corpos de prova.....	95
Figura 3.14 - Esquema para corte das amostras para o ensaio de migração.....	97
Figura 3.15 - Fatias de concreto obtidas após o corte dos CPs.....	98
Figura 3.16 - Conjunto: câmara de vácuo, ColdTrap e bomba.....	98
Figura 3.17 - Processo de pré-condicionamento das amostras sob vácuo.....	99
(a) Amostras em câmara com pressão de vácuo e sem solução	
(b) Preenchimento da câmara com solução de hidróxido de cálcio	
Figura 3.18 - Amostras no interior das camisas de silicone.....	100
Figura 3.19 - Teste de estanqueidade dos conjuntos do ensaio.....	100
Figura 3.20 - Arranjo esquemático do aparato recomendado pela NT BUILD 492...	101
Figura 3.21 - Aparato de ensaio montado e conectado à fonte de alimentação.....	101
Figura 3.22 - Visão geral do aparato de ensaio de migração de cloretos.....	102
Figura 3.23 - Processo de seccionamento das amostras para evidenciação das penetrações.....	103
(a) amostra após o término do processo de migração de íons cloreto	
(b) aplicação da carga para rompimento diametral das amostras	
(c) amostra seccionada diametralmente	
Figura 3.24 - Amostras submetidas à aspersão de solução de nitrato de prata.....	104
(a) evidenciação das alturas de penetração de cloretos	
(b) marcação das posições de medida das alturas de penetração de cloretos	
Figura 3.25 - Área de medição da frente de penetração de cloretos.....	104

Figura 3.26 - Desenho esquemático da sonda de quatro eletrodos para medição da resistividade elétrica superficial do concreto.....	105
Figura 3.27 - Procedimento de medição da resistividade elétrica dos corpos de prova.....	106
(a) posicionamento da sonda nas posições de medida pré-estabelecidas	
(b) leitura direta dos valores de resistividade elétrica dos concretos	
Figura 3.28 - Preparação das amostras para a realização da MEV.....	107
(a) máquina de corte AROTEC COR250 utilizada	
(b) amostras extraídas dos corpos de prova	
Figura 3.29 - Evaporadora de carbono modelo FEICA SDC500.....	108
Figura 3.30 - Amostras preparadas para a realização das análises MEV.....	108
Figura 3.31 - Microscópio eletrônico de varredura de feixe duplo - Quanta FEG 3D FEI.....	109
Figura 4.1 - Evolução das resistências à compressão com o avanço da idade.....	116
Figura 4.2 - <i>Boxplots</i> , nos níveis dos fatores, dos resultados de resistência à compressão.....	118
Figura 4.3 - <i>Violinplots</i> dos resultados de resistência à compressão nos níveis dos fatores.....	118
Figura 4.4 - <i>Boxplots</i> dos teores de escória com os níveis dos demais fatores fixados.....	120
Figura 4.5 - <i>Boxplots</i> das classes com os níveis dos demais fatores fixados.....	120
Figura 4.6 - <i>Boxplots</i> das idades com os níveis dos demais fatores fixados.....	121
Figura 4.7 - Valores preditos de resistência à compressão nos níveis dos fatores.....	122
Figura 4.8 - Resultados das resistências à tração por compressão diametral.....	123
Figura 4.9 - <i>Boxplots</i> , nos níveis dos fatores, dos resultados de resistência à tração.....	124
Figura 4.10 - <i>Violinplots</i> dos resultados de resistência à compressão nos níveis dos fatores.....	125
Figura 4.11 - Valores preditos de resistência à tração preditos nos níveis dos fatores.....	127
Figura 4.12 - Resultados de absorção por capilaridade com o avanço do tempo.....	128
Figura 4.13 - <i>Boxplots</i> , nos níveis dos fatores, dos resultados de absorção por capilaridade.....	129
Figura 4.14 - <i>Violinplots</i> dos resultados de absorção de água por capilaridade nos níveis dos fatores.....	130
Figura 4.15 - Resultados das absorções de água por imersão.....	132
Figura 4.16 - Resultados dos índices de vazios.....	132
Figura 4.17 - Resultados das massas específicas seca, real e saturada.....	133

Figura 4.18 - <i>Boxplots</i> de absorção de água por imersão nos níveis dos fatores.....	134
Figura 4.19 - <i>Violinplots</i> dos resultados de absorção de água nos níveis dos fatores.....	135
Figura 4.20 - <i>Boxplots</i> das classes de qualidade fixando-se os níveis de teor de escória.....	136
Figura 4.21 - <i>Boxplots</i> do teor de escória fixando-se os níveis da classe de qualidade.....	136
Figura 4.22 - Valores preditos de absorção de água por imersão nos níveis dos fatores.....	137
Figura 4.23 - <i>Boxplots</i> de índice de vazios nos níveis dos fatores.....	137
Figura 4.24 - <i>Violinplots</i> dos resultados de índice de vazios nos níveis dos fatores.....	138
Figura 4.25 - <i>Boxplots</i> das classes de qualidade fixando-se os níveis de teor de escória.....	139
Figura 4.26 - <i>Boxplots</i> do teor de escória fixando-se os níveis de classe de qualidade.....	139
Figura 4.27 - Valores preditos de índice de vazios nos níveis dos fatores.....	140
Figura 4.28 - <i>Boxplots</i> de massa específica real nos níveis dos fatores.....	140
Figura 4.29 - <i>Violinplots</i> dos resultados de massa específica real nos níveis dos fatores.....	141
Figura 4.30 - <i>Boxplots</i> da classe de qualidade fixando-se os níveis de teor de escória.....	142
Figura 4.31 - <i>Boxplots</i> da classe de qualidade fixando-se os níveis de teor de escória.....	142
Figura 4.32 - Valores preditos de massa específica real nos níveis dos fatores.....	143
Figura 4.33 - Evidenciação das penetrações nas amostras de concreto ensaiadas em diferentes idades.....	145
Figura 4.34 - Evolução no tempo dos coeficientes de migração de íons cloreto.....	146
Figura 4.35 - <i>Boxplots</i> , nos níveis dos fatores, dos resultados de migração de íons cloreto.....	148
Figura 4.36 - <i>Violinplots</i> dos resultados de migração de íons cloreto nos níveis dos fatores.....	148
Figura 4.37 - <i>Boxplots</i> dos teores fixando-se os níveis dos outros fatores.....	150
Figura 4.38 - <i>Boxplots</i> das idades fixando-se os níveis de teor de escória.....	150
Figura 4.39 - <i>Boxplots</i> das classes fixando-se os níveis de teor de escória.....	151
Figura 4.40 - Valores preditos de resistência à penetração de cloretos nos níveis dos fatores.....	152
Figura 4.41 - Evolução no tempo das resistividades elétricas dos concretos.....	153

Figura 4.42 - Correlação entre os valores de coeficientes de migração de cloretos e os de resistividade elétrica dos concretos analisados.....	154
Figura 4.43 - <i>Boxplots</i> dos resultados de resistividade elétrica nos níveis dos fatores.....	155
Figura 4.44 - <i>Violinplots</i> dos resultados de resistividade elétrica nos níveis dos fatores.....	155
Figura 4.45 - <i>Boxplots</i> de resistividade fixando-se os níveis da classe e teor de escória.....	156
Figura 4.46 - <i>Boxplots</i> de resistividade fixando-se os níveis de teor de escória e classe.....	156
Figura 4.47 - <i>Boxplots</i> de resistividade fixando-se os níveis da classe de qualidade e idade.....	157
Figura 4.48 - <i>Boxplots</i> de resistividade fixando-se os níveis de idade e classe de qualidade.....	157
Figura 4.49 - <i>Boxplots</i> de resistividade fixando-se os níveis de teor de escória e idade.....	158
Figura 4.50 - <i>Boxplots</i> de resistividade fixando-se os níveis de idade e teor de escória.....	158
Figura 4.51 - Análise dos efeitos isolados de cada fator considerado sobre a média de resistividade.....	159
Figura 4.52 - Fotomicrografias obtidas por MEV, via feixe de elétrons secundários, em regiões próximas às bordas superiores (não penetradas por íons cloreto) e inferiores (penetradas por íons cloreto) das amostras de concreto pertencentes aos traços TE00C2, TE30C2 e TE60C2 nas ampliações de 3.500x e 5.000x.....	161
Figura 4.53 - Fotomicrografias obtidas por MEV, via feixe de elétrons secundários, em regiões próximas às bordas superiores (não penetradas por íons cloreto) e inferiores (penetradas por íons cloreto) das amostras de concreto pertencentes aos traços TE00C2, TE30C2 e TE60C2 nas ampliações de 10.000x e 20.000x.....	162
Figura 4.54 - Fotomicrografias obtidas por MEV, via detector de elétrons secundários, em regiões próximas às bordas superiores (não penetradas por íons cloreto) com ampliação de 1.000x.....	163
Figura 4.55 - Fotomicrografias obtidas por MEV, via detector de elétrons secundários, em regiões próximas às bordas superiores (não penetradas por íons cloreto) com ampliação de 50.000x.....	164
Figura 4.56 - Mapa de identificação dos elementos químicos presentes nas fases da imagem em análise realizada em região próxima à borda inferior da amostra do traço TE60C2.....	164
Figura 4.57 - Espectrogramas gerados a partir da análise química por EDS de uma amostra de concreto pertencente ao traço TE30C2.....	165
Figura 4.58 - Distribuição do elemento cloro em região de análise próxima à borda inferior da amostra de concreto pertencente ao traço TE30C2.....	166

Figura A.1 - Análise de resíduos do modelo estatístico dos resultados de resistência à compressão.....	184
Figura A.2 - Análise de resíduos do modelo estatístico dos resultados de resistência à tração.....	184
Figura A.3 - Análise de resíduos do modelo estatístico dos resultados de absorção de água por capilaridade.....	185
Figura A.4 - Análise de resíduos do modelo estatístico dos resultados de migração de cloretos.....	185
Figura A.5 - Análise de resíduos do modelo estatístico dos resultados de absorção de água por imersão.....	185
Figura A.6 - Análise de resíduos do modelo estatístico dos resultados de índice de vazios.....	186
Figura A.7 - Análise de resíduos do modelo estatístico dos resultados de massa específica real.....	186
Quadro 2.1 - Resumo dos principais fatores que influenciam na penetração de íons cloretos no concreto.....	33
Quadro 2.2 - Teor crítico de cloreto em concreto para diversas normas e organismos internacionais.....	36
Quadro 2.3 - Classificação da resistência à penetração de cloretos em função dos coeficientes de difusão obtidos por meio de ensaios acelerados de migração aos 28 dias.....	62
Quadro 2.4 - Penetrabilidade de íons cloreto de acordo com a carga elétrica passante.....	68
Quadro 2.5 - Correlação entre a resistividade elétrica superficial e o risco de corrosão.....	72
Quadro 3.1 - Classes de agressividade ao concreto de acordo com o meio ambiente	84
Quadro 3.2 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto.....	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Efeitos do C <sub>3</sub> A na quantidade de cloretos livres e na corrosão.....	38
Tabela 2.2 - Difusividade de cloretos, a 25° C, em pastas com relação a/c igual a 0,5.....	42
Tabela 3.1 - Nomenclaturas adotadas para os cimentos Portland.....	75
Tabela 3.2 - Análise química (DRX) do clínquer utilizado na fabricação dos cimentos (%)......	75
Tabela 3.3 - Análise química do insumos utilizados na fabricação dos cimentos Portland (%)......	75
Tabela 3.4 - Propriedades químicas do cimentos Portland utilizados.....	76
Tabela 3.5 - Propriedades físicas dos cimentos Portland utilizados.....	76
Tabela 3.6 - Dados da granulometria dos cimentos utilizados.....	78
Tabela 3.7 - Resultados das análises de termogravimetria (TGA) realizada nos cimentos.....	78
Tabela 3.8 - Propriedades físicas do agregado miúdo utilizado.....	79
Tabela 3.9 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	79
Tabela 3.10 - Propriedades físicas do agregado do agregado graúdo utilizado.....	81
Tabela 3.11 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo.....	81
Tabela 3.12 - Traços de concreto produzidos.....	85
Tabela 3.13 - Composição dos traços de concreto utilizados.....	85
Tabela 3.14 - Detalhamento da distribuição geral dos corpos de prova de concreto produzidos.....	89
Tabela 3.15 - Idade e tolerância de atraso para rompimento.....	90
Tabela 3.16 - Diferença de potencial e duração do ensaio de migração de uma amostra de concreto.....	102
Tabela 4.1 - Resultados dos ensaios de consistência no estado fresco.....	114
Tabela 4.2 - Resultados do ensaio de resistência à compressão axial.....	115
Tabela 4.3 - Análise de variância do modelo estatístico aplicado aos resultados de resistência à compressão.....	119
Tabela 4.4 - Resultados da resistência à tração.....	123
Tabela 4.5 - Análise de variância do modelo estatístico aplicado aos resultados de resistência à compressão.....	126
Tabela 4.6 - Média dos resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade.....	127
Tabela 4.7 - Análise de variância do modelo estatístico aos resultados de absorção de água por capilaridade.....	130

Tabela 4.8 - Resultados da absorção de água por imersão, do índice de vazios e das massas específicas.....	131
Tabela 4.9 - Análise de variância do modelo estatístico aos resultados de absorção de água por imersão.....	135
Tabela 4.10 - Análise de variância do modelo estatístico aos resultados de índice de vazios.....	138
Tabela 4.11 - Análise de variância do modelo estatístico aos resultados de massa específica real.....	141
Tabela 4.12 - Resultados parciais médios obtidos ao longo dos ensaios acelerados de migração de íons cloreto.....	144
Tabela 4.13 - Resultados dos coeficientes de migração de íons cloreto em diferentes idades.....	144
Tabela 4.14 - Análise de variância do modelo estatístico aos resultados de absorção de água por capilaridade.....	149
Tabela 4.15 - Resultados de resistividade elétrica dos concretos em diferentes idades.....	152
Tabela A.1 - Resistência à compressão - Comparações entre os teores fixando-se os níveis dos outros fatores.....	187
Tabela A.2 - Resistência à compressão - Comparações entre as idades fixando-se os níveis dos outros fatores.....	188
Tabela A.3 - Resistência à compressão - Comparações entre as classes fixando-se os níveis dos outros fatores.....	189
Tabela A.4 - Resistência à tração - Comparações entre as classes de qualidade.....	189
Tabela A.5 - Resistência à tração - Comparações entre os teores de escória.....	189
Tabela A.6 - Absorção por capilaridade - Comparações entre as classes de qualidade.....	189
Tabela A.7 - Absorção por capilaridade - Comparações entre os teores de escória...	190
Tabela A.8 - Absorção por capilaridade - Comparações entre os tempos de exposição.....	190
Tabela A.9 - Migração de cloretos - Comparações entre as classes fixando-se os níveis de teor de escória.....	190
Tabela A.10 - Migração de cloretos - Comparações entre os teores fixando-se os níveis dos outros fatores.....	191
Tabela A.11 - Migração de cloretos - Comparações entre as idades fixando-se os níveis do teor de escória.....	192

**LISTA DE UNIDADES**

A	ampère
cm	centímetro
cm <sup>2</sup>	centímetro cuadrado
cm <sup>2</sup> /g	centímetro cuadrado por grama
cm <sup>2</sup> /s	centímetro cuadrado por segundo
cm <sup>3</sup> /g	centímetro cúbico por grama
F	Fahreinrait
g	grama
g/cm <sup>2</sup>	grama por centímetro cuadrado
g/cm <sup>3</sup>	grama por centímetro cúbico
h	hora
Hz	hertz
kg	quilograma
kg/m <sup>3</sup>	quilograma por metro cúbico
kN	quilonewton
kPa	quilopascal
kΩ.cm	quiloohms centímetro
m <sup>2</sup>	metro cuadrado
m <sup>2</sup> /kg	metro cuadrado por quilograma
m <sup>2</sup> /s	metro cuadrado por segundo
m <sup>3</sup>	metro cúbico
mA	miliampère
mbar	milibar
min	minuto
ml	mililitro
mm	milímetro
mm <sup>2</sup>	milímetro cuadrado
MPa	megapascal

MPa/s	megapascal por segundo
N	Newton
nm	nanômetro
°C	graus Celsius
Pa	Pascal
s	segundo
V	volts
W	Watt
µm	micrômetro

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Official
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ANOVA	modelo estatístico de análise da variância de dados
ASTM	American Society for Testing and Materials
CA	concreto armado
CAD	concreto de alto desempenho
CC	corrente contínua
CEB	Comité Euro-International du Béton
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
CP	concreto protendido
CP00	cimento especial com 0 % de escória de alto forno
CP30	cimento especial com 30 % de escória de alto forno
CP60	cimento especial com 60 % de escória de alto forno
CPs	corpos de prova
DRX	difratometria de raios-X
EAF	escória de alto forno
EDS	espectroscopia por dispersão de energia de raios-X
GS	grau de saturação
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
ISO	International Organization for Standardization
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MEV	microscopia eletrônica de varredura
MF	modulo de finura
MMQP	método de mínimos quadrados ponderados

NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
PF	perda ao fogo
pH	potencial hidrogeniônico
PVC	policloreto de vinila
TE00C2	traço de concreto com 0% de escória e da classe de agressividade II
TE00C3	traço de concreto com 0% de escória e da classe de agressividade III
TE30C2	traço de concreto com 30% de escória e da classe de agressividade II
TE30C3	traço de concreto com 30% de escória e da classe de agressividade III
TE60C2	traço de concreto com 60% de escória e da classe de agressividade II
TE60C3	traço de concreto com 60% de escória e da classe de agressividade III
TGA	termogravimetria

**LISTA DE SÍMBOLOS**

%	porcentagem
<	menor
>	maior
≤	menor ou igual
≥	maior ou igual
a/c	relação água/cimento
Ag <sub>2</sub> O	óxido de prata
AgCl	cloreto de prata
AgNO <sub>3</sub>	nitrato de prata
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	óxido de alumínio
C <sub>2</sub> S	silicato bicálcico
C <sub>3</sub> A	aluminato tricálcico
C <sub>3</sub> S	silicato tricálcico
C <sub>3</sub> S <sub>2</sub> H <sub>3</sub>	silicato de cálcio hidratado
C <sub>4</sub> AF	ferroaluminato tetracálcico
Ca	cálcio
Ca(OH) <sub>2</sub>	hidróxido de cálcio
CaCl <sub>2</sub>	cloreto de cálcio
CaO	óxido de cálcio
CH	hidróxido de cálcio
Cl	cloro
CO <sub>2</sub>	dióxido de carbono
CP	corpos de prova
C-S-H	silicato de cálcio hidratado
d/D	relação entre as dimensões do agregado

D <sub>10</sub>	diâmetro em que 10% da amostra é passante (em massa)
D <sub>50</sub>	diâmetro em que 50% da amostra é passante (em massa)
D <sub>90</sub>	diâmetro em que 90% da amostra é passante (em massa)
e <sup>-</sup>	elétron
F	estatística de teste
Fe	ferro
Fe(OH) <sub>2</sub>	hidróxido ferroso
Fe(OH) <sub>3</sub>	hidróxido férrico
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	óxido férrico
FeCl <sub>2</sub>	cloreto ferroso
FeO	óxido ferroso
H <sub>2</sub> O	óxido de hidrogênio ou água
HCl	cloreto de hidrogênio ou ácido clorídrico
i <sub>corr</sub>	corrente de corrosão
K	potássio
K <sub>2</sub> O	óxido de potássio
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	sulfato de potássio
M	mol
Mg	magnésio
Mg(OH) <sub>2</sub>	hidróxido de magnésio
MgCl <sub>2</sub>	cloreto de magnésio
MgO	óxido de magnésio
MnO	óxido de manganês
N	concentração normal
Na	sódio
Na <sub>2</sub> O	óxido de sódio

NaCl	cloreto de sódio
NaOH	hidróxido de sódio
O <sub>2</sub>	oxigênio
OH	hidroxila
PF	perda ao fogo
RH	umidade relativa
RI	resíduo insolúvel
S	enxofre
Si	silício
SiO <sub>2</sub>	dióxido de silício
SO <sub>3</sub>	óxido sulfúrico ou trióxido de enxofre
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	sulfato
T	temperatura
TiO <sub>2</sub>	dióxido de titânio

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	viii
<b>ABSTRACT</b> .....	ix
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> .....	x
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xvi
<b>LISTA DE UNIDADES</b> .....	xviii
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b> .....	xx
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	xxii
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 Objetivo geral .....	3
1.2 Objetivos específicos .....	4
1.3 Estrutura do trabalho .....	4
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	6
2.1 Durabilidade das estruturas de concreto armado.....	6
2.2 Corrosão das armaduras.....	8
2.3 Penetração de íons cloretos no concreto.....	14
2.3.1 Formas de apresentação dos cloretos no concreto.....	17
2.3.2 Mecanismos de transporte.....	18
a) Absorção capilar.....	22
b) Difusão.....	23
c) Migração.....	27
d) Permeabilidade.....	28
2.3.3 Fontes de contaminação por cloretos.....	29
2.3.4 Fatores intervenientes na penetração de íons cloretos no concreto.....	32
2.3.4.1 Concentração de cloretos no ambiente (teor crítico de cloretos).....	33

2.3.4.2	Cimento Portland e adições minerais.....	37
	a) Características físico-químicas do cimento Portland.....	37
	b) Cimentos compostos e adições minerais.....	38
	c) Escória de alto forno.....	44
2.3.4.3	Relação água/cimento.....	48
2.3.4.4	Concreto da camada de cobrimento.....	50
2.3.4.5	Adensamento e cura do concreto.....	51
2.3.4.6	Umidade ambiental e grau de saturação dos poros do concreto	52
2.3.4.7	Idade do concreto.....	54
2.3.4.8	Estado de carbonatação do concreto.....	55
2.3.4.9	Temperatura.....	56
2.3.4.10	Outros fatores relacionados.....	58
	a) Agregados.....	58
	b) Fissurações.....	59
	c) Efeito específico do cátion que acompanha o íon cloreto....	59
2.3.5	Avaliação da resistência do concreto à penetração de cloretos.....	60
2.3.5.1	Ensaio de longa duração.....	63
	a) AASHTO T259.....	63
	b) NT BUILD 443.....	64
2.3.5.2	Ensaio acelerados por campo elétrico externo.....	65
	a) NT BUILD 492.....	66
	b) ASTM C 1202.....	67
	c) AASHTO T 277.....	69
	d) ASTM C 1556.....	70
	e) LNEC 463.....	70
	f) ISO 1920.....	71
2.3.5.3	Resistividade elétrica do concreto.....	71

<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>74</b>
3.1 Materiais utilizados.....	74
3.1.1 Aglomerantes.....	74
3.1.2 Agregado miúdo.....	78
3.1.3 Agregado graúdo.....	80
3.1.4 Água de amassamento.....	82
3.2 Plano experimental.....	82
3.2.1 Dosagem experimental e produção dos concretos.....	83
3.2.2 Produção dos concretos, moldagem e cura dos corpos de prova.....	86
3.3 Métodos dos Ensaios.....	90
3.3.1 Resistência à compressão.....	90
3.3.2 Resistência à tração por compressão diametral.....	91
3.3.3 Absorção de água por capilaridade.....	93
3.3.4 Absorção, índice de vazios e massa específica.....	95
3.3.5 Migração de cloretos.....	97
a) Obtenção das amostras.....	97
b) Preparo das amostras e processo de vácuo.....	98
c) Migração de cloretos.....	99
d) Medição da frente de penetração de cloretos.....	103
3.3.6 Resistividade Elétrica.....	105
3.3.7 Microscopia eletrônica de varredura.....	107
3.4 Análise estatística dos resultados.....	109
3.5 Apresentação das medidas e das suas incertezas.....	111
<b>4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>113</b>
4.1 Avaliação da consistência dos concretos no estado fresco.....	114
4.2 Resistência à compressão axial.....	115
4.3 Resistência à tração por compressão diametral.....	122

4.4	Absorção de água por capilaridade.....	127
4.5	Absorção, índice de vazios e massa específica.....	131
4.6	Resistência à penetração de íons cloreto.....	143
4.7	Resistividade elétrica dos concretos.....	152
4.8	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	160
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>167</b>
5.1	Conclusões da pesquisa.....	167
5.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	170
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>171</b>
	<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>184</b>
	<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>186</b>

# 1

## INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais construtivos mais utilizados em todo o mundo devido a aspectos como a sua facilidade de produção e lançamento, reduzidos custos em comparação à outros materiais, versatilidade de utilização, disponibilidade praticamente universal, propriedades mecânicas bastante satisfatórias e, também, pela considerável durabilidade ao longo do tempo.

Nas estruturas usuais, a associação do concreto com o aço forma um dos sistemas estruturais mais difundidos na construção civil, sendo este concebido com o propósito de se obter um melhor aproveitamento das potencialidades individuais de cada um destes materiais. Neste sistema, as armaduras de aço são posicionadas, principalmente, nas zonas tracionadas das estruturas em razão da relativa baixa resistência à tração do concreto, o qual assume, além da função estrutural, o papel de proteção das armaduras embutidas em razão destas apresentarem reduzida estabilidade química em condições naturais. Todavia, quando esta dupla proteção, conferida fisicamente pela camada de cobrimento de concreto e quimicamente pela formação de uma película passivadora que envolve as armaduras, deixa de existir e outras condições ambientais externas requeridas estão presentes, instaura-se um processo corrosivo das armaduras, o qual é considerado a principal patologia que afeta as estruturas de concreto armado, reduzindo significativamente a sua vida útil.

A penetração de íons cloreto nos concretos é, por sua vez, uma das principais causas da instauração de processos corrosivos nas estruturas de concreto armado. Ocorre que, sob determinadas condições, os íons cloreto podem penetrar através da matriz cimentícia e, ao atingir as armaduras, desestabilizar a camada passivadora destas, propiciando as condições necessárias para a instituição do referido processo. Sendo assim, a ocorrência deste fenômeno está diretamente relacionada, entre outros fatores, com as características do concreto de

cobrimento das armaduras e com o nível de agressividade do ambiente no qual as estruturas de concreto armado estão expostas durante a sua vida útil.

Diante disso, a temática da durabilidade destas estruturas tem angariado progressivamente grande atenção no meio técnico-científico em virtude da crescente frequência e gravidade dos problemas de deterioração observados nestes elementos, os quais têm implicado em expressivas perdas de diversas naturezas e dispendiosos gastos compreendidos nos processos de recuperação.

O pleno entendimento da interação existente entre estas estruturas e o meio ambiente circundante, ou seja, dos fenômenos envolvidos e das suas implicações é de suma importância para subsidiar a escolha de requisitos e especificações apropriadas nos projetos a fim de garantir o efetivo desempenho das estruturas durante toda a sua vida útil projetada. Com isso, os critérios e/ou requisitos relacionados à durabilidade das estruturas de concreto armado têm sido gradativamente ampliados e considerados nas especificações e projetos atuais.

Neste contexto, o emprego de materiais cimentícios suplementares, como as escórias e as pozolanas, tem sido cada vez mais comum nos projetos em razão dos atributos positivos associados ao seu uso, que refletem-se, geralmente, na melhoria das propriedades mecânicas e de durabilidade, além da obtenção de um concreto mais sustentável uma vez que são minimizadas a demanda de matérias-primas e as emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera decorrentes do processo de produção do clínquer. A utilização de cimentos compostos e das adições minerais possibilitam a obtenção de uma melhor distribuição das dimensões dos poros e uma maior densificação da interface entre a matriz e o agregado, o que implica, por exemplo, em uma maior resistência à penetração de íons cloreto nos concretos.

Dentre as adições minerais comumente utilizadas, destaca-se a escória granulada de alto forno, que consiste em um subproduto não metálico gerado no processo siderúrgico, o qual contém todos os elementos necessários para a formação dos mesmos hidratos gerados a partir do clínquer. O seu emprego possibilita a melhoria da reologia do concreto fresco e das suas propriedades mecânicas e de durabilidade, como por exemplo, a redução dos coeficientes de difusão de cloretos dos concretos, seja pelo efeito físico da adição, que altera a porosidade, ou pelo aumento da capacidade de fixação de cloretos, que se deve a presença de níveis mais elevados de aluminatos nas escórias, o que potencializa a formação de cloroaluminatos.

Isto posto, o presente trabalho se justifica pela notória necessidade de melhor compreender o fenômeno de penetração de íons cloreto nos concretos e ampliar as investigações acerca dos seus mecanismos de atuação e dos principais fatores intervenientes envolvidos com o propósito de contribuir com o estabelecimento de novos parâmetros e critérios técnicos relacionados com o tema proposto.

Para isso, seis diferentes traços de concreto foram produzidos com a utilização de cimentos Portland especiais contendo 0%, 30% e 60% de substituição parcial por escória granulada de alto forno e em atendimento aos requisitos de qualidade requeridos para as classes de agressividade ambiental II e III da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Os desempenhos dos concretos produzidos foram investigados, em corpos de prova com dimensões (10 x 20) cm, por meio da realização, em diferentes idades, de ensaios correlatos aos mecanismos envolvidos no fenômeno em estudo, tais como ensaio acelerado de migração de íons cloreto, medição da resistividade elétrica, determinação da absorção de água por capilaridade e por imersão, índice de vazios e massas específicas, além dos ensaios de caracterização mecânica.

Além disso, foram realizadas análises microestruturais por meio da técnica de microscopia eletrônica de varredura com o intuito de investigar eventuais alterações na matriz cimentícia, na rede de poros e/ou nos produtos de hidratação dos concretos estudados, assim como apurar qualitativamente, via espectrometria por energia dispersiva, a composição química das fases e dos compostos microestruturais presentes nos concretos analisados.

## **1.1 Objetivo geral**

Esta pesquisa pretende avaliar a resistência à penetração de íons cloreto de concretos produzidos, de acordo com o procedimento especificado pela NBR 5738 (ABNT, 2015), utilizando-se cimentos Portland especiais contendo diferentes teores de escória de alto forno e dosados de modo a atender as especificações estabelecidas para as classes de agressividade II e III da NBR 6118 (ABNT, 2014).

## 1.2 Objetivos específicos

Este estudo tem como objetivos específicos comparar e explicar as diferenças de desempenho final dos concretos especificados quanto aos seguintes aspectos:

- a) propriedades mecânicas (consistência por abatimento de tronco de cone, resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral);
- b) resistência à penetração de água e quanto às suas propriedades físicas (absorção por capilaridade, absorção por imersão, índice de vazios e massas específicas);
- c) resistência à penetração de íons cloreto por meio de ensaio acelerado de migração no estado não estacionário;
- d) resistividade elétrica por meio de medição direta pelo método dos quatro eletrodos;
- e) avaliação qualitativa de sua microestrutura por meio das técnicas de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por energia dispersiva (EDS).

## 1.3 Estrutura do trabalho

Para a organização e estruturação deste estudo, além do presente capítulo que apresenta uma breve introdução, objetivos geral e específicos, o trabalho foi dividido em mais cinco capítulos:

O capítulo 2 consiste em uma revisão bibliográfica acerca do tema proposto, a qual visa apresentar uma visão geral deste, bem como de diversos tópicos e conceitos relevantes para o desenvolvimento e entendimento da pesquisa. Para isso, foram consultados conceituados autores e trabalhos relacionados ao tema, principalmente, aqueles mais recentes, incluindo-se, porém, não limitando-se, às literaturas de referência, periódicos, dissertações e teses. Os principais aspectos abordados são a durabilidade das estruturas de concreto armado, os mecanismos de transporte dos agentes agressivos e o ataque de cloretos no concreto e as suas implicações, os fatores intervenientes ao fenômeno, as prescrições normativas vigentes e alguns dos principais métodos de avaliação da resistência ao ingresso destes no concreto.

No capítulo 3, são detalhadamente descritos os materiais e os métodos utilizados na presente pesquisa, sendo explicitados todos os parâmetros e procedimentos adotados no cumprimento do plano experimental, tais como as caracterizações físicas e químicas dos materiais utilizados, as informações relativas às etapas de dosagem dos concretos e às moldagens dos corpos de prova, bem como todas as técnicas e procedimentos empregados durante a realização de cada um dos ensaios propostos.

O capítulo 4 apresenta, sob a forma de texto, tabelas e gráficos, os resultados obtidos em cada um dos ensaios de avaliação dos desempenhos dos concretos. São também apresentadas, neste capítulo, as análises e as discussões relativas a estes resultados, bem como as respectivas avaliações estatísticas dos dados experimentais obtidos a fim de embasar as conclusões acerca dos efeitos observados.

O capítulo 5 apresenta as considerações finais e as conclusões oriundas das análises dos resultados. Na sequência, são apresentadas as referências bibliográficas consultadas e utilizadas como base para o desenvolvimento desse estudo.

Ao longo de todo o texto, apesar das recomendações da NBR 14724 (ABNT, 2011), a identificação das figuras foi realizada da maneira clássica, ou seja, 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

## REVISÃO DA LITERATURA

O presente capítulo dedica-se à compreensão dos principais aspectos relacionados com a penetração de íons cloreto em compósitos de matriz de cimento Portland e, em especial, com as suas implicações na durabilidade deste material.

São apresentados, neste capítulo, os mais relevantes fatores associados ao ataque de íons cloreto às estruturas de concreto armado, tais como as mais recorrentes fontes de contaminação, os mecanismos de transporte de massa predominantes, os fatores intervenientes envolvidos, tal como a adição de escória de alto forno ao cimento Portland, bem como algumas das principais consequências às estruturas decorrentes da instauração deste fenómeno.

Além disso, também são abordadas outras importantes informações diretamente relacionadas com o tema, como por exemplo, os teores limites de concentração de íons cloreto sugeridos na literatura, as principais recomendações normativas nacionais e internacionais vigentes e alguns dos ensaios de avaliação da penetrabilidade de íons cloreto em concreto mais difundidos no meio técnico-científico.

### 2.1 Durabilidade das estruturas de concreto armado

Por muito tempo, a durabilidade das estruturas de concreto armado foi considerada ilimitada, porém com o uso crescente do concreto este entendimento mudou visto que muitas estruturas começaram a se degradar com pouco tempo de uso (NEPOMUCENO, 2005) e apresentar, ao longo do século XX, uma grande incidência de manifestações patológicas de elevada intensidade e com altos custos de recuperação (HELENE, 1993).

Durabilidade é, segundo Mehta e Monteiro (2014) e o Comitê 201 (ACI, 2001), o tempo de vida útil sob dadas condições ambientais, isto é, a capacidade do concreto de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração, mantendo sua forma original, qualidade e capacidade de utilização quando exposto a determinado ambiente. Medeiros, Andrade e Helene (2011) ressaltam que esta propriedade depende ainda das condições de uso, de operação e de manutenção das estruturas.

O conceito normativo brasileiro, contido na NBR 6118 (ABNT, 2014), entende que durabilidade é a capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas no início dos trabalhos de elaboração do seu projeto.

Por certo, a durabilidade do concreto pode ser atribuída, em grande parte, à dificuldade de penetração dos agentes agressivos na sua rede de poros (OLLIVIER e TORRENTI, 2014; NEVILLE, 2015). Neste âmbito, Silva (2011) sugere que trata-se de uma propriedade que mantém uma relação direta com a estrutura dos poros, assim como com as microfissuras da pasta de cimento e com a forma de ingresso e transporte dos agentes agressivos, estejam estes na forma de gases, vapores ou líquidos.

Desse modo, o aumento da vida útil das estruturas de concreto depende diretamente da redução do ingresso de substâncias agressivas no concreto (YILDIRIM, ILICA e SENGUL, 2011), e assim, a impermeabilidade do material e a estanqueidade da estrutura tornam-se os principais fatores determinantes da sua durabilidade (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Entre as substâncias agressivas, que penetram através da rede de poros da microestrutura do concreto, destacam-se a água, associada a uma grande variedade de íons dissolvidos, especialmente os íons cloretos e os íons sulfatos, o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e o oxigênio (O<sub>2</sub>) (NEPOMUCENO, 2005).

A penetração e o deslocamento destes agentes no concreto é determinada pela estrutura da pasta de cimento hidratada e suas interfaces com os agregados, pelas suas características químicas e físicas, pela concentração superficial das substâncias agressivas e pelas condições ambientais, tais como a umidade, a temperatura e a concentração de agentes agressivos (NEVILLE, 2015).

Posto isso, e haja visto o caráter deletério de tais substâncias, reforça-se a importância de estudos sobre a penetração destas nos concretos (PEREIRA, 2001). Neste sentido, os estudos sobre a durabilidade das estruturas de concreto armado tem progressivamente evoluído graças ao maior conhecimento dos mecanismos de transporte de líquidos e de gases agressivos nos meios porosos, como o concreto, que possibilitam associar o tempo aos modelos matemáticos capazes de expressá-los quantitativamente (MEDEIROS, ANDRADE e HELENE, 2011).

O controle adequado da corrosão prematura do aço incorporado ainda parece ser um grande desafio tanto para o projeto de durabilidade quanto para a operação de estruturas de concreto em ambientes severos (GJØRV, 2014) e, assim, a determinação dos parâmetros que influenciam no deslocamento das substâncias pelo concreto é muito importante para melhor se especificar os materiais a serem utilizados, as espessuras de cobrimento e as porosidades apropriadas aos concretos para garantia de determinada vida útil à estrutura projetada (NEPOMUCENO, 2005).

## **2.2 Corrosão das armaduras**

A deterioração das estruturas de concreto armado é atribuída, geralmente, ao efeito combinado de mais de uma causa, entretanto, segundo Mota *et al.* (2012), o fenômeno da corrosão das armaduras é mais frequente do que qualquer outro, comprometendo-a tanto do ponto de vista estético quanto do ponto de vista da segurança estrutural.

De modo geral, a corrosão pode ser entendida como a interação destrutiva de um material com o meio ambiente, como resultado de reações deletérias de natureza química ou eletroquímica, associadas ou não a ações físicas ou mecânicas de degradação (HELENE, 1993). Pode ainda ser vista como o processo inverso ao metalúrgico, isto é, o metal encontra-se em um nível energético superior ao composto que lhe deu origem, e assim, há uma tendência espontânea de que o metal retorne à condição de compostos metálicos, liberando energia para o meio ambiente (MEIRA, 2017).

Todavia, em condições normais, a armadura no interior do concreto encontra-se protegida química e fisicamente. A proteção física se deve à barreira que o concreto de cobrimento exerce à penetração de agentes agressivos desencadeadores da corrosão, como os íons cloreto,

o dióxido de carbono e o oxigênio, impedindo o contato direto da armadura com o meio exterior. A proteção química é fornecida pela fase aquosa contida nos poros, que confere um elevado pH ao concreto e favorece a formação, logo após o início da hidratação do cimento e a partir de uma rápida e extensa reação eletroquímica, de um filme de óxidos microscópico passivante ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), resistente, estável, impermeável, compacto e aderente sobre a superfície do aço, chamada de camada ou película passivadora, a qual o torna passivo à corrosão, isto é, indisponível para a reação anódica (HELENE, 1993; ACI, 2002; NEVILLE, 2015; SANTOS, 2015). Tal camada de passivação é formada por um filme mais interno de óxido ferroso e outro mais externo de óxido férrico (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

Como exposto, as armaduras permanecem passivadas em decorrência da elevada alcalinidade do extrato aquoso do concreto, dotado de um pH da ordem de 12 a 13, o que é garantido, principalmente, pelos compostos alcalinos presentes no fluido dos poros, como por exemplo,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{OH}^{2-}$  (HAUSMANN, 1967).

A despassivação das armaduras ocorre, na maioria dos casos, devido a mecanismos como a carbonatação do concreto, a qual diminui o pH do meio circundante da armadura para níveis em que a passivação da armadura não é capaz de ser mantida, e a presença de íons cloreto em quantidade suficiente para romper a capa passiva de forma localizada e consistente, bem como pela combinação dos dois processos anteriormente identificados (BAKKER, 1988).

A ocorrência do ataque de cloretos concomitantemente com a carbonatação é uma situação muito comum, principalmente nas zonas de respingo em regiões marítimas, visto que nestes locais os poros não se encontram saturados com água, o que permite a entrada do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (WANG *et al.*, 2017).

Verifica-se que enquanto o pH da solução dos poros permanecer acima de 11,5, a camada passivadora do aço é considerada estável. Contudo, em condições excepcionais, nas quais o pH do concreto é reduzido, como ocorre na carbonatação, a condição de passividade do aço pode ser destruída, propiciando a instauração do processo corrosivo. Outrossim, mesmo nas circunstâncias onde o pH do concreto se apresente elevado, a camada passivadora pode ser desestabilizada sob o ataque de íons cloreto, contudo, isso se dá de forma muito mais rápida em meios onde o pH já se encontra abaixo de 12 (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Quando o processo corrosivo é estabelecido, este pode manifestar-se de diferentes formas, sendo os casos mais comuns: a corrosão generalizada, típica do processo de carbonatação, e a puntiforme, típica do ataque por cloretos, como mostra a Figura 2.1. O primeiro caso, em geral, provoca danos menos graves, pois afeta toda a extensão da armadura. O segundo, por se concentrar em pontos específicos, acaba sendo mais danoso, causando a perda do desempenho estrutural e podendo acarretar uma ruptura frágil, sem aviso, e em seção determinada (FIGUEIREDO e MEIRA, 2013).



Figura 2.1 - Corrosão generalizada (esquerda) e corrosão por pites ou puntiforme (direita) no aço  
Fonte: MEIRA, 2017, p. 20.

Em princípio, os potenciais eletroquímicos podem ser gerados quando dois metais diferentes estão embutidos no concreto ou devido a diferenças na concentração de íons dissolvidos na vizinhança do aço (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

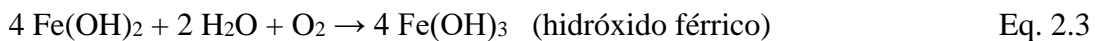
Ocorre que, quando a corrosão se inicia, o potencial eletroquímico do aço se torna localmente mais negativo e formam-se zonas anódicas, enquanto em outras porções o aço que tem potencial passivo intacto atuam como áreas de captação de oxigênio e formam zonas catódicas (GJØRV, 2014).

Assim, a corrosão que ocorre nas estruturas de concreto armado é considerada eletroquímica, desenvolve-se em meio aquoso e requer a presença de: um ânodo, no qual ocorrem as reações de oxidação do ferro, com perda de elétrons e redução de massa pela passagem do material do estado metálico para o estado iônico (oxidação); um cátodo, no qual ocorre a redução do

oxigênio, sem perda de massa do aço e a deposição do óxido de ferro com consumo dos elétrons gerados na região anódica (redução); uma diferença de potencial entre ambos, que pode ser gerada por diferença de umidade, aeração e tensões no concreto ou no aço, entre outros fatores; uma ligação metálica, entre o ânodo e o cátodo, por onde migram os elétrons, podendo ser caracterizada pelo próprio material metálico; uma ligação externa caracterizada pela condução iônica, por difusão e/ou migração, via solução do eletrólito; e a presença de oxigênio e dos agentes agressivos em concentrações suficientes para manutenção do processo (CUNHA e HELENE, 2001; SANTOS, 2015; MEIRA, 2017).

Como resultado, um dos metais, ou algumas partes deste, torna-se anódico e o outro catódico, conforme reações apresentadas as Equações 2.1 a 2.4.

Ânodo:



Cátodo:



Os íons de ferro,  $\text{Fe}^{++}$ , com carga elétrica positiva no ânodo passam para a solução, enquanto os elétrons livres,  $\text{e}^-$ , com carga elétrica negativa, passam pelo aço para o cátodo, onde são absorvidos pelos constituintes do eletrólito, combinando-se com a água e o oxigênio para formar íons de hidroxila,  $\text{OH}^-$ . Estes íons se deslocam pelo eletrólito e combinam-se com os íons ferrosos formando o hidróxido ferroso que, por outra oxidação, transforma-se em hidróxido férrico (ferrugem), de cor predominantemente amarronzada com constituição gelatinosa e porosa (NEVILLE, 2015).

A Figura 2.2 ilustra esquematicamente o processo eletroquímico envolvido nas células de corrosão das armaduras embutidas no concreto.

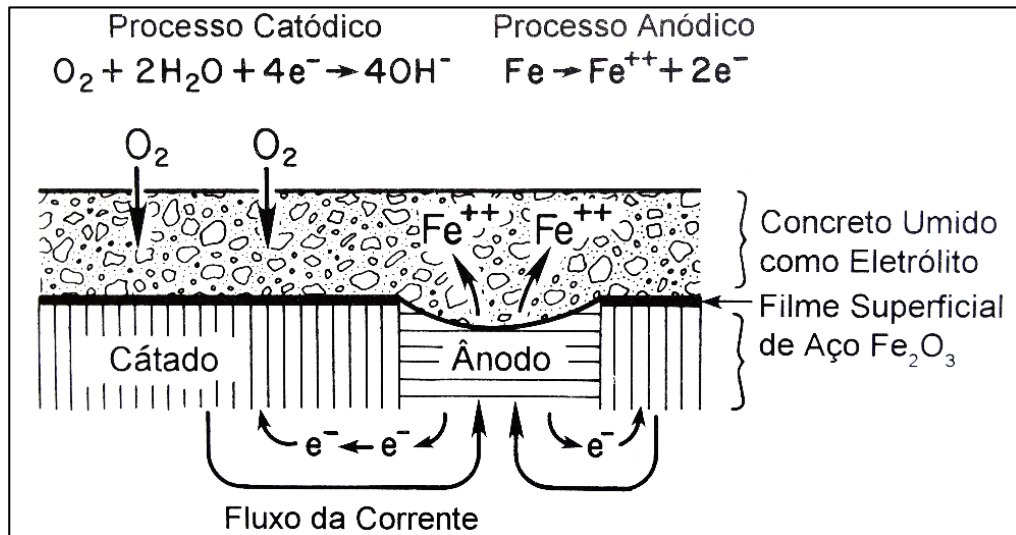


Figura 2.2 - Processo de corrosão eletroquímica  
 Fonte: MEHTA e MONTEIRO, 2014, p. 186.

O conjunto dessas reações representa o processo completo de corrosão eletroquímica e o controle de qualquer das reações parciais representa um controle sobre o processo de corrosão (MEIRA, 2017).

Vale salientar que, nas reações, o oxigênio é consumido e a água é regenerada, sendo estes necessários para que o processo tenha continuidade. Assim sendo, não há corrosão em concretos secos devido à ausência de eletrólito, provavelmente em umidades relativas abaixo de 60 %, assim como não há corrosão em concretos completamente imersos devido a não haver, neste caso, disponibilidade suficiente de oxigênio, exceto quando a água pode reter ar, como, por exemplo, pela ação de ondas (GENTIL, 1996; NEVILLE, 2015). Portanto, a presença simultânea de ar e água na superfície do cátodo é absolutamente necessária, bem como o fluxo de elétrons, sem os quais a reação anódica não irá progredir (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Como a célula eletroquímica necessita de uma conexão entre o ânodo e o cátodo pela solução dos poros, bem como pela própria armadura, o sistema de poros na pasta de cimento endurecida é um fator importante que influencia na corrosão (NEVILLE, 2015).

Nesta perspectiva, o aumento da presença de eletrólito favorece a passagem de uma corrente iônica maior, acelerando o processo de corrosão. De modo contrário, a presença de pouco eletrólito aumenta a resistividade do sistema, reduzindo a velocidade de corrosão, ou seja, em concretos expostos à ambientes de baixa umidade relativa, a instauração do processo de corrosão da armadura torna-se mais dificultoso pela carência de eletrólito, enquanto que em ambientes de elevada umidade relativa o processo pode ser acelerado (MEIRA, 2017).

Quando instaurado o processo corrosivo, a transformação de aço metálico em ferrugem, como apresentado nas Equações 2.1 a 2.3, é acompanhada por um aumento no volume, o qual, dependendo do estado de oxidação, pode ser de até 600 por cento do metal original, como ilustra esquematicamente a Figura 2.3.

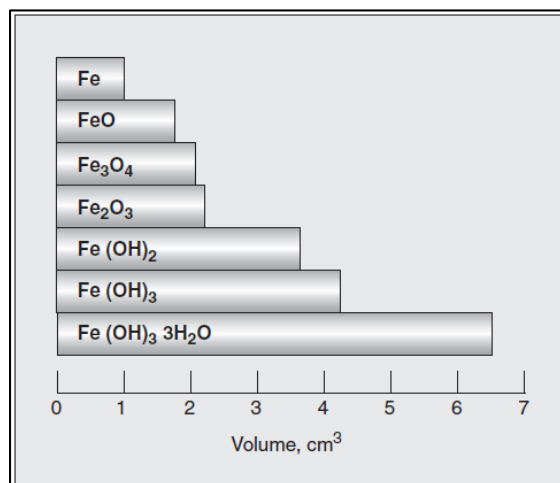


Figura 2.3 - Expansão dos produtos de corrosão  
Fonte: MEHTA e MONTEIRO, 2006, pg. 178.

Neste caso, os efeitos deletérios provenientes da corrosão manifestam-se sob a forma de manchas superficiais, fissuras, lascamento, delaminação e destacamento do concreto de cobrimento, bem como pela redução da seção das armaduras com frequente seccionamento de estribos e eventual perda de aderência entre as armaduras principais e o concreto, levando a um severo comprometimento da segurança estrutural ao longo do tempo (MEHTA e MONTEIRO, 2014; HELENE, 2014; NEVILLE, 2015).

Tuutti (1982) sugere um modelo para a vida útil das estruturas de concreto armado, no qual o fenômeno da corrosão das armaduras apresenta, ao longo do tempo, as fases de iniciação, de despassivação e de propagação, conforme esquema proposto pela Figura 2.4.

A fase de iniciação apresenta-se desde o início da penetração de agentes agressivos no concreto até o momento em que estes atingem a armadura, sendo o seu desenvolvimento dependente das características de agressividade do meio ao qual a estrutura está exposta e das características do próprio material. Na sequência, a fase de despassivação do aço envolve as interações que ocorrem na superfície do metal, demandando um certo tempo para ocorrer de modo consistente e dar início ao processo de corrosão de forma permanente. Em continuação, a fase de propagação se inicia no momento em que ocorre a despassivação da armadura e se caracteriza pelo desenvolvimento das reações de corrosão, as quais podem ser mais ou menos rápidas, dependendo das variáveis que controlam a cinética do processo de corrosão (MEIRA, 2017).

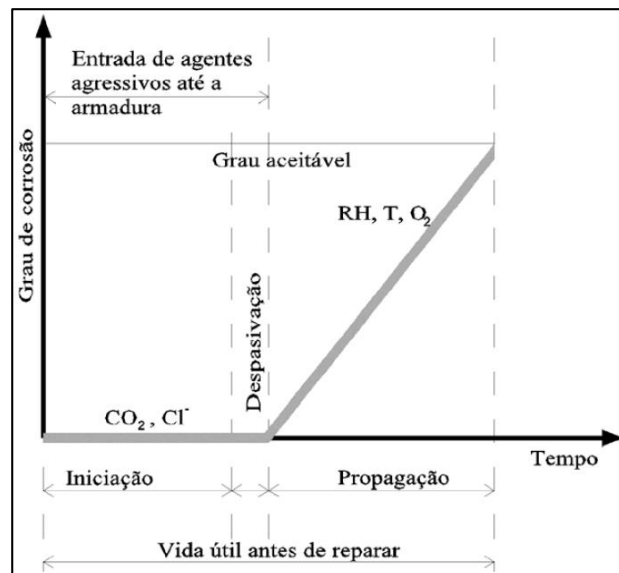


Figura 2.4 - Modelo de Tuutti para corrosão de armaduras  
Fonte: MEIRA, 2017, pg. 34.

### 2.3 Penetração de íons cloretos no concreto

A corrosão de armaduras induzida por íons cloreto está entre os mais severos problemas de durabilidade das estruturas de concreto armado (YILDIRIM, ILICA e SENGUL, 2011). O impacto socioeconômico resultante dos danos induzidos por cloretos é bastante significativo uma vez que é despendida uma enorme quantia com a manutenção e reparação de elementos estruturais deteriorados por tal fenômeno (KIM e BUMADIAN, 2017).

Verifica-se que, devido ao caráter higroscópico dos cloretos, quando estes estão presentes em grandes quantidades, o concreto tende a conservar mais umidade, aumentando o risco de

corrosão pela diminuição de sua resistividade elétrica (REIS, 2001). Deste modo, pode ser apenas uma questão de tempo até que quantidades prejudiciais de cloretos atinjam a armadura, mesmo através de espessas camadas de cobrimento de concreto de alta qualidade (GJØRV, 2014).

Os íons cloreto penetram nos poros do concreto e, ao chegarem nas proximidades da armadura, em conjunto com água e oxigênio, desestabilizam pontualmente a capa passivadora, propiciando a instauração do processo corrosivo. A maioria das teorias que procuram explicar esse fenômeno consideram que a ruptura da capa passiva é algo dinâmico, com ciclos de despassivação e repassivação até que a despassivação ocorra de forma definitiva. Do mesmo modo, é consenso que esse efeito ocorre de forma pontual, gerando uma corrosão por pites (MOTA *et al.*, 2012; FIGUEIREDO e MEIRA, 2013; NEVILLE, 2015; WEERDT *et al.*, 2015; MEIRA, 2017).



Figura 2.5 - Corrosão de armadura induzida por cloretos  
Fonte: VAGHETTI *et al.*, 2002 *apud* SCHNEIDER, 2005.

De acordo com o Comitê 222 (ACI, 2002), os efeitos dos íons cloreto sobre a corrosão do aço podem ser explicados por meio de três teorias, a saber:

- *teoria do filme de óxido*: os íons cloreto penetram o filme passivador que protege o aço com maior facilidade que outros íons (como por exemplo o  $\text{SO}_4^{4-}$ );
- *teoria da adsorção*: os íons cloreto são adsorvidos na superfície do metal em competição com o  $\text{O}_2$  dissolvido ou íons hidroxila e facilitam a dissolução dos íons metálicos;

- *teoria do complexo transitório*: os íons cloreto competem com  $\text{OH}^-$  na formação de íons ferrosos e forma-se um complexo solúvel de cloreto de ferro que pode migrar até certa distância, na qual tal complexo é rompido, precipitando em hidróxido de ferro, o que deixa o íon cloreto livre e permite o reinício do processo.

Alhozaimy *et al.* (2014) demonstraram que um dos parâmetros que afetam, substancialmente, a natureza do filme passivador das armaduras é a concentração de íons cloreto na solução dos poros e que, neste caso, as fases de óxidos instáveis se desenvolvem no filme passivo devido à adsorção de íons cloreto no filme passivo estável.

No momento em que a camada passivadora do aço é destruída, o processo corrosivo se inicia e os íons cloreto ativam a superfície do aço, formando uma zona anódica, na qual ocorrem as reações apresentadas, simplificadamente, pelas Equações 2.5 a 2.7. Neste contexto, os íons cloreto atuam como catalisadores das reações de corrosão, acelerando a velocidade do processo. A Figura 2.6 apresenta, de forma esquemática, o mecanismo de funcionamento do processo de corrosão das armaduras induzida por íons cloreto.

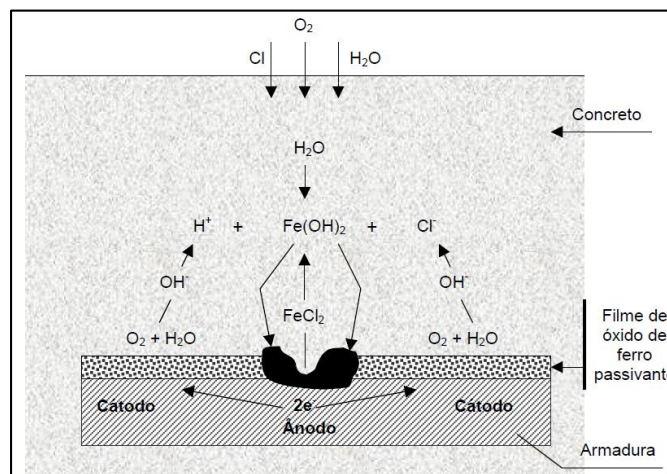
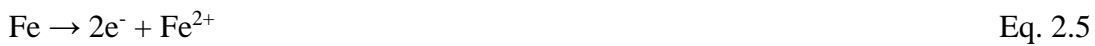


Figura 2.6 - Formação do pite de corrosão pela ação dos cloretos  
Fonte: PEREIRA, 2001, pg. 23.

O processo de despassivação induzido pela penetração de cloretos consiste na reação do ânion cloro com o cátion ferro proveniente dos óxidos que formam a camada de passivação, óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e óxido ferroso ( $\text{FeO}$ ). No entanto, o produto formado por essa reação é solúvel. Dessa forma, o material é removido do filme de proteção, criando áreas expostas (DYER, 2014).

Neste processo, os íons cloreto se combinam com os íons de ferro, formando moléculas de cloreto de ferro, as quais perdem estabilidade e, por meio de hidrólise, liberam os íons cloreto, para novas reações, e íons de hidrogênio. Esses íons contribuem para que a zona anódica tenha o seu pH diminuído e o potencial do aço, nessa zona, seja mais negativo. Por outro lado, a liberação de hidróxidos, devido às reações catódicas, aumenta o pH dessas áreas. Assim, a corrosão por pites se sustenta diminuindo o pH das zonas anódicas e aumentando o pH das zonas catódicas próximas, o que diminui a possibilidade de corrosão futura nessas últimas zonas. Com o avanço do processo de corrosão, mais íons cloreto penetram no concreto, somando-se aos já existentes para participarem de novas reações (MEIRA, 2017).

### **2.3.1 Formas de apresentação dos cloretos no concreto**

Os íons cloreto podem ser encontrados no interior do concreto em três diferentes formas. Uma parte deles está quimicamente combinados, como nos cloroaluminatos, sendo incorporados aos produtos da hidratação do cimento, outra parte dos cloretos está fisicamente retida por adsorção física à superfície dos poros capilares de gel e somente uma terceira parte, denominada comumente de cloretos livres, estão dissolvidos na solução dos poros e disponíveis para a reação agressiva com o aço (PEREIRA, 2001; FIGUEIREDO, 2005; NEVILLE, 2015; WEERDT *et al.*, 2015).

Baronghel-Bouny, Capra e Laurens (2014) classificam, de maneira correlata e simplificada, os cloretos presentes no concreto em:

- *cloretos livres*, que se encontraram sob a forma iônica na solução intersticial, sendo passíveis de extração com água e, em virtude disso, também conhecidos como “*cloretos solúveis em água*”. Considera-se que apenas os cloretos livres podem difundir-se e desempenhar um papel ativo no processo de despassivação e de corrosão das armaduras;

- *cloretos totais*, que incluem, além dos cloretos livres recém citados, também os “*cloretos fixos*” ou “*cloretos quimicamente ligados*”, incluindo os íons fortemente adsorvidos ao CSH, bem como os que se encontram quimicamente ligados à matriz cimentícia sob a forma de cloroaluminatos.

Neste contexto, a fixação de cloretos na matriz de concreto pode ocorrer por meio de reações químicas ou por meio de fenômenos físicos, e habitualmente há um estado de equilíbrio entre as três fases em que os cloretos podem ser encontrados (MEIRA, 2017). O processo em que os cloretos se combinam no interior do concreto é não expansivo e não acarreta prejuízos à matriz. Além disso, apesar de o íon cloro ter uma maior capacidade de se combinar química do que fisicamente, o C-S-H é o produto de hidratação presente em maior proporção na matriz cimentícia e, por isso, provavelmente a maior parte do cloreto combinado encontra-se fisicamente combinado nesta forma (DYER, 2014).

A combinação química de íons cloreto com o aluminato tricálcico ( $C_3A$ ), gerando um composto conhecido como Sal de Friedel, e a adsorção física dos mesmos ao C-S-H, por meio de forças da superfície, reduzem a quantidade de cloretos livres, o que retarda a difusão destes no concreto e contribui para a manutenção do quadro de passivação do aço visto que os cloretos fixados sobre a forma de cristal sólido não representam riscos elevados para as armaduras por apresentarem dimensões muito maiores que as dos poros, impedindo-os, em vista disto, de penetrar na rede porosa do concreto (HELENE, 1993).

Além disso, Tuuti (1982) ressalta que outros produtos de hidratação também são capazes de fixar um determinado valor de cloretos e que a melhor representação quanto à essa capacidade de fixação deve ser dada pela soma das fases  $C_3A$  e  $C_4AF$  presentes no concreto.

### **2.3.2 Mecanismos de transporte**

O transporte das substâncias agressivas no concreto é governado por uma variedade de mecanismos físico-químicos, os quais dependem, entre outras coisas, do fluxo da substância e de sua concentração local, das condições ambientais, da velocidade de renovação dos agentes agressivos, da estrutura, distribuição, conectividade e tortuosidade dos poros, da abertura das

microfissuras, do grau de saturação do sistema poroso e da temperatura (NEPOMUCENO, 2005; SILVA, 2011).

Dentre estas variáveis, as características da estrutura porosa da pasta de cimento endurecida é a que influencia mais decisivamente no transporte de substâncias no interior do concreto, sendo a porosidade aberta determinada pela interconexão dos poros e a velocidade de transporte diretamente ligada com a distribuição do tamanho destes (CASCUDO, 1997).

O ingresso de fluidos, seja líquidos e/ou gases, e de íons agressivos no concreto ocorre por meio de fenômenos como a permeabilidade (relacionada com a existência de uma pressão externa), a difusão (oriunda de um gradiente de concentração), a absorção capilar (gerada sob a presença de uma pressão interna) e a migração (proveniente do efeito de um campo elétrico) (FIB, 1999). Destaca-se que cada mecanismo possui um fator que induz a sua ocorrência, tais como a diferença de pressão, de concentração, de potencial elétrico ou por tensão superficial no interior do poro (SILVA, 2011).

Desta forma, Poulsen e Mejlbro (2006) dividem, de maneira análoga, os mecanismos de transporte de íons cloreto no concreto em:

- *difusão*: quando o transporte de cloretos se dá devido à diferença de concentração em diferentes zonas do concreto, ocorrendo no sentido das zonas de menor concentração;
- *permeabilidade*: quando o transporte de cloretos ocorre devido a diferença da pressão hidráulica em diferentes zonas do concreto, sendo que os cloretos buscam sempre as zonas de menor pressão hidráulica;
- *migração*: quando o transporte de cloretos no concreto se dá pela diferença de potencial elétrico, sob a qual os íons negativos de cloro migram-se em direção ao ânodo, zona de menor potencial elétrico;
- *convecção / absorção capilar*: quando o transporte de íons cloreto é devido à diferença de teor de umidade, sendo que a água contendo cloretos sempre se desloca em direção às zonas com menor teor de umidade, quando mantidos os demais parâmetros.

A Figura 2.7 apresenta os principais mecanismos de transporte de íons cloreto no concreto.

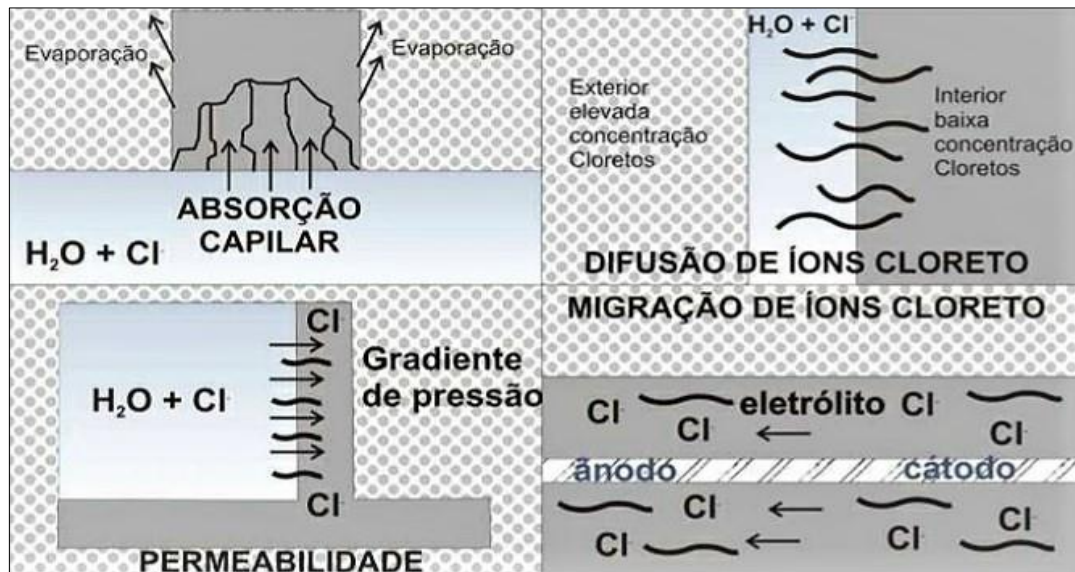


Figura 2.7 - Esquema das principais formas de penetração de cloretos nas estrutura de concreto  
Fonte: HELENE, 1993, pg. 121.

Destaca-se que estes mecanismos podem atuar simultaneamente, ou sucessivamente, ao longo do tempo, dependendo das condições de exposição (temperatura, umidade, dentre outras) a que o concreto esteja submetido (PEREIRA, 2001), como na situação ilustrada na Figura 2.8.

A absorção capilar é, segundo Helene (1993), o mais comum e intenso mecanismo de transporte, seguido pela difusão e pela permeabilidade por gradiente de pressão, sendo a migração um mecanismo secundário de movimento de íons originado pelos campos elétricos das pilhas de corrosão eletroquímica.

Ocorre que, geralmente, a difusão pura ou a permeabilidade pura só ocorrem em estruturas saturadas, nas quais as forças capilares não podem atuar. De outro modo, na maioria das estruturas usuais, nas quais os concretos permanecem secos ou não saturados, a absorção capilar torna-se o mecanismo predominante (GUIMARAES, 1997).

De fato, baixos teores de umidade favorecem o transporte por absorção capilar, enquanto que teores de umidade próximos à saturação favorecem o transporte por difusão, mecanismo de transporte mais lento, mas que pode ser acelerado por um contato constante com a fonte de cloretos, como é o caso de estruturas submersas (MEIRA, 2017).

Dessa forma, em ambientes marinhos, a difusão aparenta ser o mecanismo de transporte dominante tendo em vista o elevado teor de umidade na camada externa de cobrimento das estruturas (GJØRV, 2014).

A Figura 2.8 apresenta uma estrutura em ambiente marinho, na qual há atuação simultânea de diferentes mecanismos de transporte de íons cloreto para o seu interior.

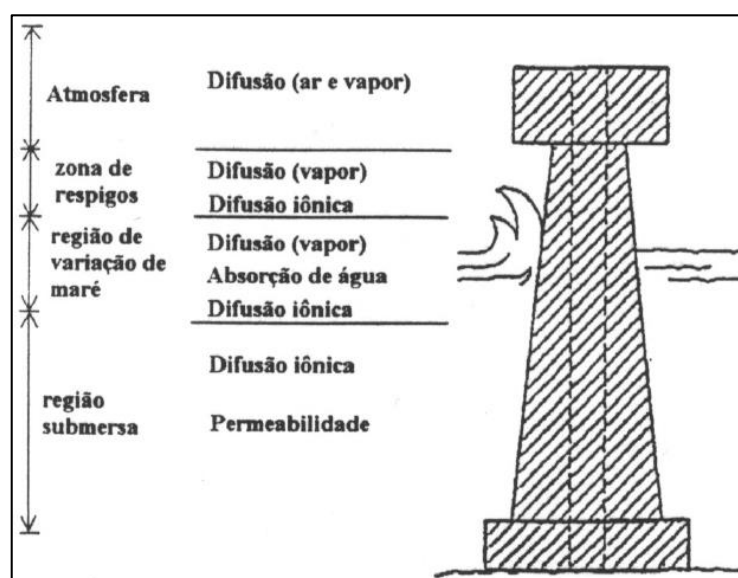


Figura 2.8 - Mecanismos de transporte em estrutura marinha  
Fonte: PERRATON, 1992 *apud* PEREIRA, 2001, pg. 17.

A atuação simultânea de mecanismos está também presente, muitas vezes, quando a estrutura de concreto está submetida a ciclos de molhagem e secagem, como em zona de maré ou quando expostas à névoa salina, e os cloretos podem penetrar no concreto por absorção capilar, que ocorre muito rapidamente, e migrar, com a fase líquida, por convecção, para dentro da zona atingida pelos ciclos e serem transportados, em seguida, por difusão nas zonas saturadas (BARONGHEL-BOUNY, CAPRA e LAURENS, 2014).

Meira (2017) propôs uma comparação entre os perfis de cloretos em uma situação em que há transporte desses íons apenas por difusão, e outra, na qual há uma combinação dos dois mecanismos de transporte com a prevalência de absorção capilar na superfície e de difusão no interior. Os resultados gerados por tal estudo indicam que a atuação simultânea dos mecanismos potencializa a penetração destas substâncias no concreto, conforme apresenta a Figura 2.9.

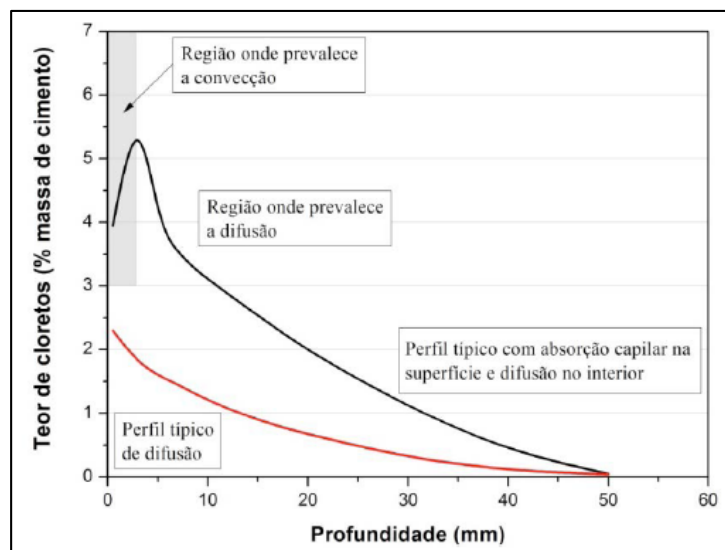


Figura 2.9 - Comparação entre configurações típicas de perfis de cloretos em concretos expostos à diferentes situações  
 Fonte: MEIRA, 2017, pg. 63.

### a) Absorção capilar

A absorção capilar de água é um dos mecanismos de transporte que mais afeta a durabilidade das estruturas de concreto por ser este um dos mais difíceis de serem controlados tendo em vista que o concreto é um material hidrofílico, isto é, que tem grande afinidade com água (PEREIRA, 2001). Dessa forma, se existe a disponibilidade de água suficiente no ambiente, há uma tendência do concreto de absorvê-la, por sucção, para o interior dos poros (FERREIRA, 1999).

A origem do potencial decorre das forças capilares que se formam devido à tensão existente entre a superfície da água e as paredes dos poros, sendo diretamente dependente de fatores, como o teor de umidade interna do concreto, a densidade e viscosidade da água, a temperatura e as características dos poros, tais como o raio, a tortuosidade e a conectividade (NEPOMUCENO, 2005).

Em princípio, quanto menor for o diâmetro dos poros capilares conectados do concreto, mais intensas serão as forças capilares de sucção, e conseqüentemente, maior será a profundidade do concreto a ser atingida pela água absorvida. Por outro lado, quanto mais delgados forem os poros capilares, menor será a profundidade alcançada, porém maior será a quantidade total de água absorvida (MOTA *et al.*, 2012).

O mecanismo de absorção capilar é, geralmente, o primeiro passo para a penetração de íons cloreto no concreto e ocorre, principalmente, em concretos aparentes e naqueles em contato com solos úmidos e/ou sujeitos a ciclos de umedecimento, isto é, a ciclos de molhagem e secagem. No período de molhagem a superfície absorve rapidamente a solução de cloreto e, no período de secagem, a água evapora e o sal se deposita no concreto. Com os ciclos posteriores há um progressivo aumento da concentração de cloretos na solução dos poros do concreto (KROPP, 2014).

Ademais, outro importante aspecto é que este mecanismo se desenvolve de maneira muito acelerada. A umidificação de um concreto seco com solução salina por um período de apenas um dia, por exemplo, pode fazer com que os cloretos penetrem mais profundamente do que por vários meses, considerando o transporte exclusivamente por difusão em meio saturado (BARONGHEL-BOUNY, CAPRA e LAURENS, 2014).

## **b) Difusão**

Difusão diz respeito ao processo de transporte de um constituinte, em determinado meio, sob o efeito de sua agitação aleatória em uma escala molecular. Se existe uma diferença de concentração entre dois pontos deste meio, esse fenômeno produz um transporte global do constituinte considerado, desde a zona mais concentrada até a zona menos concentrada, neste sentido, até que haja equilíbrio das concentrações (OLLIVIER e TORRENTI, 2014).

Nas estruturas de concreto, o mecanismo pode ocorrer em meios saturados como, por exemplo, naqueles imersas na água do mar, nas quais os íons cloreto penetram através do concreto por difusão, regidos por um gradiente de concentração entre a superfície, que contém cloretos, e o seu interior, que está inicialmente isento da presença destes íons (BARONGHEL-BOUNY, CAPRA e LAURENS, 2014).

Ademais, a difusão iônica é também um recorrente meio de movimentação de cloretos no interior do concreto, pois quando estes ultrapassam a camada superficial, por este ou outro mecanismo, e alcançam o interior do concreto, a região mais úmida, ocorre à busca de equilíbrio por meio da diferença de concentração, promovendo então a movimentação dos íons através do material (MOTA *et al.*, 2012).

A teoria da difusão é baseada, principalmente, nos modelos matemáticos de Adolph Eugen Fick e a compreensão dos modelos matemáticos envolvidos é importante para se conhecer as condições e os embasamentos deste mecanismo (POULSEN e MEJLBRO, 2006).

No transporte de espécies iônicas em solução, por difusão, na fase aquosa intersticial, além do mecanismo básico dado pelas diferenças de concentração, há uma interveniência decorrente das forças de interações elétricas entre íons, uma vez que cada um deles está cercado por outras espécies iônicas e que são, por natureza, carregados eletricamente, o que gera não somente um gradiente de concentração, mas também um gradiente de potencial local,  $\partial\psi/\partial x$ , devido aos outros íons, conhecido pelo nome de potencial de membrana (OLLIVIER e TORRENTI, 2014). O fluxo de massa decorrente desse último potencial,  $J_{i,x}$ , efetivando-se sobre um íon  $i$  é dado pela Equação 2.8.

$$J_{i,x} = -u_i c_i \frac{\partial\psi}{\partial x} \quad \text{Eq. 2.8}$$

Onde:

$c_i$  = concentração da espécie  $i$ , no ponto considerado;

$u_i$  = mobilidade iônica, dada pela equação de Nernst-Einstein;

$\partial\psi/\partial x$  = gradiente de potencial local devido aos outros íons ou potencial de membrana.

O processo de transporte de espécies iônicas em solução decorrente da existência de um gradiente de concentração no meio pode ser descrito pela chamada 1ª Lei de Fick. Neste caso, se os íons se deslocam seguindo uma direção perpendicular à superfície de entrada em um meio homogêneo, o fluxo de massa unidirecional  $J_x$ , que representa a quantidade de íons que se deslocam através de uma unidade de superfície de concreto durante um segundo, é dado pela equação 2.9.

$$J_x = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad \text{Eq. 2.9}$$

Onde:

$D$  = coeficiente de difusão efetivo dos íons cloreto no concreto ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ );

$C$  = concentração de cloretos livres da solução intersticial ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );

$\partial C/\partial x$  = gradiente de concentração, nesta direção.

O sinal negativo indica que o fluxo ocorre no sentido oposto ao aumento da concentração. A Equação 2.9 permite calcular o fluxo de massa dos íons cloreto, em regime permanente ou estacionário, associado a um gradiente de concentração. Tal fluxo é, desse modo, diretamente proporcional ao produto do gradiente com a difusividade dos íons no meio, medido na direção perpendicular à seção do fluxo (TUUTTI, 1982).

Além disso, o coeficiente efetivo de difusão pode ser calculado pela mesma equação, sendo este, função não apenas do material, mas também das condições ambientais envolvidas, tais como a espécie em difusão, as características microestruturais do meio no qual ela se difunde, as substâncias presentes no fluido que preenche os poros e a temperatura (PEREIRA, 2001; POULSEN e MEJLBRO, 2006; OLLIVIER e TORRENTI, 2014).

Por conseguinte, o fluxo de massa total do processo de transporte por difusão,  $J_d$ , pode ser calculado pela confluência das Equações 2.8 e 2.9, sendo, portanto, a soma da contribuição devida ao gradiente de concentração, dado pela 1ª Lei de Fick, e da parcela devida ao potencial de membrana, como exposto na Equação 2.10.

$$J_d = -D_i \frac{\partial c_i}{\partial x} - u_i c_i \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad \text{Eq. 2.10}$$

Onde:

$D$  = coeficiente de difusão efetivo dos íons cloreto no material ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ );

$C$  = concentração de cloretos livres em solução ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );

$\partial C/\partial x$  = gradiente de concentração, nesta direção;

$c_i$  = concentração da espécie  $i$ , no ponto considerado;

$u_i$  = mobilidade iônica, dada pela equação de Nernst-Einstein;

$\partial \psi/\partial x$  = gradiente de potencial local devido aos outros íons ou potencial de membrana.

Apesar disso, na prática, o fluxo de massa por difusão é, geralmente, expresso tão somente pela 1ª Lei de Fick, expressa pela Equação 2.9. Neste caso, há uma simplificação, já que não são levadas em conta as interações elétricas criadas pelos outros íons da solução intersticial. Os erros relativos à essa simplificação não são muito relevantes, contudo, eles podem

esclarecer alguns resultados que seriam inexplicáveis se considerado nos cálculos apenas a parcela referente à 1ª Lei de Fick (OLLIVIER e TORRENTI, 2014).

Quando o regime de transporte não é permanente, ou seja, em estado não estacionário, que contempla o fluxo variável com o tempo e a profundidade de penetração, é preciso buscar uma outra equação que permita o cálculo do coeficiente aparente de difusão (PEREIRA, 2001).

Neste sentido, quando considera-se que o material está saturado pela fase suporte, que a concentração é dependente do tempo e varia de acordo com a posição  $x$  no interior do material e caso  $D$  seja independente de  $x$ , isto é, em meio homogêneo, pode-se exprimir o fluxo de massa pela igualdade expressa pela Equação 2.11, denominada 2ª Lei de Fick e geralmente utilizada para descrever a penetração dos cloretos por difusão no interior do concreto saturado, em regime não estacionário.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial J_x}{\partial x} = -D_a \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \text{Eq. 2.11}$$

Onde:

$D_a$  = coeficiente de difusão aparente dos íons cloreto no material ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ );

$C$  = concentração de cloretos livres em solução, na profundidade  $x$ , no instante  $t$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );

$J_x$  = fluxo de massa unidirecional, na profundidade  $x$ .

A 2ª Lei de Fick correlaciona o gradiente de concentração de um soluto no espaço com sua respectiva taxa de transferência, a qual varia no tempo (Sun, Liang e Chang, 2012). Para Poulsen e Mejlbro (2006), a 2ª Lei de Fick demonstra que a diferença no teor de cloreto por unidade de tempo é igual a diferença de fluxo por unidade de comprimento. Contudo, para Nepomuceno (2005), ela tem boa aplicação para uma situação simples em que não se considera nenhuma combinação entre as substâncias que penetram no material poroso.

Ollivier e Torrenti (2014) ressaltam o fato de que a concentração total da espécie em difusão,  $C$ , é a soma das concentrações da espécie em estado “livre” na fase suporte e em estado “fixado” pelo sólido. De acordo com Kropp (2014), a substância em difusão pode ser

parcialmente imobilizada devido à interação química ou devido a adsorção física por forças de massa, e neste caso, é necessário considerar na Equação 2.11 a existência de tal imobilização.

Neste cenário, a Equação 2.12 representa a solução para a 2ª Lei de Fick. De acordo com Medeiros, Andrade e Helene (2011), a sua aplicação efetiva para se avaliar a penetração de cloretos no concreto foi apresentada pela primeira vez por Collepardi *et al.* (1970). Para isso, algumas condições de contorno foram estabelecidas, tais como a de que o concreto é um material homogêneo e isotrópico, que o único mecanismo de transporte atuante é a difusão, que não ocorrem interações entre os cloretos e os componentes do concreto no momento da penetração, que o meio considerado é infinito e que tanto o coeficiente de difusão quanto a concentração de cloretos na superfície são constantes ao longo do tempo.

$$C = C_0 \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot t}} \right) \right] \quad \text{Eq. 2.12}$$

Onde:

C = concentração de cloretos na profundidade x no tempo t;

C<sub>0</sub> = concentração inicial de cloretos no interior do concreto;

erf () = função do erro de Gauss;

x = profundidade considerada, geralmente em metros;

D<sub>a</sub> = coeficiente aparente de difusão de cloretos no concreto, geralmente em m<sup>2</sup>/s;

t = tempo de exposição considerado, geralmente em s.

### c) Migração

Migração ou eletro-migração é um processo de transporte forçado de íons através dos poros do concreto pela ação de um campo elétrico que atua como força motriz, podendo ser oriundo da deflagração de pilhas de corrosão eletroquímicas ou de uma diferença de potencial elétrico gerado por uma fonte externa (HELENE, 1993; NEPOMUCENO, 2005; SILVA, 2011). Dessa forma, os íons cloreto, negativos, migram-se em direção ao ânodo, zona de menor potencial elétrico, ocasionando o deslocamento destes no interior do concreto.

Em situações reais e/ou em procedimentos de ensaios acelerados, o mecanismo pode ocorrer de forma simultânea com outro, como em conjunto com a difusão nos ensaios de migração com aplicação de um potencial elétrico para determinação do coeficiente de difusão de cloretos, como será posteriormente abordado neste trabalho.

Neste caso, o fluxo de íons devido à migração e o coeficiente de difusão podem ser correlacionados por meio da Equação 2.13.

$$q_m = -D \frac{zF}{RT} \frac{\partial V}{\partial x} \quad \text{Eq. 2.13}$$

Onde:

$q_m$  = fluxo de íons cloreto no concreto (mol/s/m<sup>2</sup>);

$D$  = coeficiente de difusão de cloretos (m<sup>2</sup>/s);

$z$  = valência do íon, para os cloretos,  $z=1$ ;

$F$  = constante de Faraday,  $F = 9,648 \times 10^4$  (J/V.mol);

$V$  = voltagem (V);

$x$  = profundidade onde se mede o fluxo (m);

$R$  = constante dos gases,  $R = 8,314$  (J/K.mol);

$T$  = temperatura absoluta (K).

#### **d) Permeabilidade**

A permeabilidade pode ser definida como a facilidade com que um fluido pode escoar através do concreto, sob um gradiente de pressão externa, sendo determinada pela continuidade e pelo tamanho dos poros da sua estrutura (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Este mecanismo é um dos principais indicadores da qualidade de um concreto, pois representa a facilidade com que uma determinada substância atravessa o concreto, sendo influenciada por diversos fatores, entre os quais destacam-se os materiais constituintes, a idade e o tipo de cura do concreto e as condições ambientais. Além disso, está relacionado com quantidade e com a dimensão dos poros, ou seja, depende diretamente da relação água/cimento na mistura

do concreto, sendo menos permeável quanto menor for este fator (NEPOMUCENO, 2005; MOTA *et al.*, 2012).

A penetração de cloretos no concreto através deste mecanismo é de relevante importância em casos particulares de estruturas marinhas, estruturas submersas ou parcialmente submersas ou ainda em estruturas com grande pressão hidrostática, como, por exemplo, em reservatórios de água (PEREIRA, 2001; KROPP, 2014).

O coeficiente de permeabilidade do concreto à água, em regime laminar, estacionário e não turbulento é obtido pela direta aplicação da Lei de Darcy, apresentada pela Equação 2.14.

$$K_h = \frac{V_f L}{A H} \quad \text{Eq. 2.14}$$

Onde:

$K_h$  = coeficiente de permeabilidade do concreto à água (cm/s);

$V_f$  = vazão de entrada na fase linear (cm<sup>3</sup>/h);

$L$  = altura do corpo de prova (cm);

$A$  = área da seção transversal do corpo de prova (cm<sup>2</sup>);

$H$  = pressão manométrica (m.c.a.).

A permeabilidade do concreto à água é também, historicamente, um parâmetro utilizado para caracterizar o concreto do ponto de vista da durabilidade, pois fornece uma informação sobre a conectividade dos poros. Contudo, a condição de saturação prevista nos ensaios, é pouco comum nas estruturas, e assim, outros parâmetros, como a absorção capilar, tem sido mais empregados para avaliação da penetrabilidade da água no concreto (NEPOMUCENO, 2005).

### 2.3.3 Fontes de contaminação por cloretos

A exposição das estruturas de concreto armado aos cloretos pode se dar nos mais diversos locais, não se limitando aos ambientes marinhos. Em algumas áreas geográficas, o solo pode conter cloretos e estes podem penetrar nas estruturas quando em contato com o solo. Além

disso, muitas indústrias utilizam produtos à base de cloretos em seus processos, e assim, estes podem entrar em contato com as estruturas de concreto (POULSEN e MEJLBRO, 2006).

As diversas possíveis fontes de cloretos são usualmente classificadas em função no momento em que os mesmos se incorporam ao concreto, como sugerem Helene (1993), Reis (2001), Figueiredo (2005) e Poulsen e Mejlbro (2006), dividindo-se em:

- *cloretos incorporados no concreto fresco*: são aqueles já incorporados no momento da mistura, tais como os presentes nos agregados e na água de amassamento contaminadas por sais ou nos aditivos contendo cloretos em sua composição, como na forma de cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ), e até mesmo em cimentos, pois estes contribuem para o aumento das resistências iniciais e melhoram o desempenho aparente destes aglutinantes;
- *cloretos penetrados no concreto endurecido*: são aqueles provenientes do ambiente externo e penetrados após a concepção da estrutura de concreto, tais como as águas, névoas e respingos marinhos, as águas subterrâneas contaminadas, as soluções salinas utilizadas para degelo, como os cloreto de sódio e de cálcio, as salmouras de processos industriais ou armazenagem de halogenetos ou provenientes de produtos industriais.

À vista disso, é relevante salientar que uma quantidade excessiva de cloretos na mistura inicial resulta em uma ação mais agressiva do que se a mesma quantidade de cloretos tiver ingressado no concreto já em serviço uma vez que o caminho para acesso destes à armadura é bastante encurtado (NEVILLE, 2015).

Contudo, em iguais condições, a capacidade de fixação de cloretos é ligeiramente maior nos concretos nos quais estes foram introduzidos já na mistura em relação àqueles nos quais os íons cloreto penetraram oriundos do meio externo. Ocorre que, para uma mesma mistura, o conteúdo de C-S-H na pasta de cimento hidratada é basicamente o mesmo, entretanto, quando os cloretos são introduzidos já na mistura, uma quantidade maior de sal de Friedel pode ser formada, incrementando, neste caso, a capacidade de fixação de íons cloreto (CHANG, 2017).

O cloro adicionado, pelas companhias de saneamento urbano, durante o processo de tratamento da água para consumo é também um recorrente agente causador de degradação das estruturas de concreto armado utilizadas como tanques de tratamento e/ou reservatórios tendo

em vista que este elemento é continuamente adicionado ao processo, tendendo a se acumular no interior destas e a penetrar por difusão no concreto, comprometendo, eventualmente, a sua durabilidade.

A fonte de cloretos pode ainda fazer parte, muitas vezes, do próprio sistema construtivo como, por exemplo, pela utilização de determinados revestimentos que os contenham ou por meio do processo, muito frequente, de lavagem de fachadas e/ou pisos com utilização de ácido clorídrico comercial (HELENE, 1993).

Ademais, outra eventual fonte de cloretos para as estruturas de concreto consiste no caso em que estas são revestidas com painéis de policloreto de vinila (PVC) ou similares, que se expostos ao fogo liberam gases como o ácido clorídrico, que por sua vez, reage com os constituintes do concreto formando cloreto de cálcio, solúvel em água, podendo penetrar no concreto por absorção capilar ou por difusão (KROPP, 2014).

Dentre as possíveis fontes de cloretos ora apresentadas, o ambiente marinho merece especial atenção por ser aquele com características mais propícias à instauração de um processo corrosivo por penetração de cloretos, sendo usualmente dividido, em função do seu potencial agressivo, em diferentes zonas de exposição marinha, conforme classificação proposta por Poulsen e Mejlbro (2006) em:

- *zona de atmosfera marinha*: região localizada três metros ou mais acima do nível máximo da água, incluindo as ondas.
- *zona de respingo*: região situada entre três metros acima do nível máximo da água, incluindo as ondas, e três metros abaixo no nível mínimo de água, incluindo as ondas.
- *zona submersa*: corresponde à região situada abaixo de três metros do nível de água, incluindo as ondas.

Desse modo, uma mesma estrutura de concreto localizada em ambiente marinho pode apresentar porções submetidas à diferentes zonas de exposição, nas quais haverá, certamente, diferentes potenciais de penetração de cloretos, isto é, intensidades agressivas distintas.

As estruturas situadas em zona de atmosfera marinha apresentam um contato gradual com os cloretos em função da concentração destes na névoa salina, a qual depende de variáveis como o vento, a rugosidade superficial, a distância em relação ao mar e a capacidade da superfície do concreto de capturar esses íons.

Quando um concreto relativamente seco é exposto a água salgada, este pode absorvê-la de forma relativamente rápida. Os ciclos de molhagem e secagem intermitentes, comuns na zona de respingo, podem acumular, sucessivamente, altas concentrações de cloreto no concreto (GJØRV, 2014).

Estudos de Wu, Li e Yu (2017) acerca dos efeitos das condições de exposição na difusividade de cloretos no concreto indicaram que a zona de respingo é aquela que mais duramente afeta a durabilidade das estruturas de concreto armado em comparação com as demais zonas do ambiente marinho.

As estruturas situadas em zona de respingo estão mais propensas ao transporte de cloretos por absorção capilar nas camadas superficiais e por difusão no interior do concreto, onde os níveis de umidade se mantêm mais elevados. No caso de estruturas em zonas submersas, o transporte de cloretos ocorre essencialmente por difusão, mecanismo de transporte que ocorre de forma mais vagarosa (MEIRA, 2017).

Além do mais, quando o concreto permanece constantemente submerso, os cloretos penetram até profundidades consideráveis, mas não haverá corrosão, a menos que haja oxigênio presente no cátodo (NEVILLE, 2015).

### **2.3.4 Fatores intervenientes na penetração de íons cloretos no concreto**

São muitos os fatores envolvidos no ingresso de cloretos no concreto, os quais dependem, principalmente, da interação com o ambiente local, da composição e do estado de fissuração do concreto e do tempo (POULSEN e MEJLBRO, 2006).

Estes podem ser divididos em fatores intrínsecos ou extrínsecos. Os intrínsecos são aqueles decorrentes da composição do cimento, do concreto e da sua execução, os quais interferem na

diretamente na estrutura e nas dimensões dos poros, incluindo-se a zona de transição. Por sua vez, os fatores extrínsecos são decorrentes do ambiente e englobam, por exemplo, o tipo e a concentração da substância agressiva, as condições ambientais, as condições de uso da estrutura e as microfissuras do concreto (SILVA, 2011).

De fato, são inúmeros os fatores que podem interferir direta ou indiretamente na penetração de cloretos no concreto, sendo a possibilidade e a facilidade de controle ou minimização de cada um deles um relevante aspecto a ser abordado.

O Quadro 2.1 apresenta um resumo dos principais fatores que comumente afetam a penetração de cloretos no concreto, separando-os esquematicamente de acordo com a recorrência da interação destes com a estrutura. Na sequência desta seção, são detalhadas as formas e mecanismos, pelos quais estes fatores intervêm na resistência à penetração destes agentes agressivos.

Quadro 2.1 - Resumo dos principais fatores que influenciam na penetração de íons cloretos no concreto

Interface com o aço	Fatores relacionados ao concreto		Fatores externos
	Matriz cimentícia	Efeito barreira do concreto	
Fissurações	Teor de cloretos	Relação água/cimento	Umidade ambiental
Carbonatação	Tipo de cimento	Qualidade e espessura do cobrimento	Disponibilidade de oxigênio
Oxidação prévia	Adições minerais	Adensamento e cura do concreto	Teor de cloretos
	Potencial alcalino (pH)	Saturação dos poros	Cátion que acompanha o íon cloreto
	Agregados	Idade do concreto	Temperatura

#### 2.3.4.1 Concentração de cloretos no ambiente (teor crítico de cloretos)

A penetração de íons cloreto até a região da armadura não representa, por si só, o início do processo corrosivo. Uma certa quantidade de íons cloreto pode ser tolerada sem risco de corrosão, uma vez que, após reagirem com os aluminatos, provenientes do clínquer, esses íons

não estarão livres para atacar o filme passivador (HANSSON *et al.*, 1985 *apud* FIGUEIREDO, 2005). Tal quantidade é regularmente tratada como limite ou teor crítico de cloretos e depende de diversas variáveis, as quais estão relacionadas com o meio ambiente, as características dos materiais e a interface aço-concreto (MEIRA, 2017).

Em função deste fato e da notória agressividade dos íons cloreto às armaduras das estruturas de concreto, tem-se procurado limitar nos projetos o teor máximo de presença destes íons nos concretos de modo a reduzir a possibilidade de instauração de um processo corrosivo (POULSEN e MEJLBRO, 2006).

Para Figueiredo e Meira (2013), a melhor forma de representar o teor crítico de cloretos seria por meio da relação  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$ . Isso deve-se ao fato de que tal relação é diretamente responsável pela estabilidade da película passivadora das armaduras (GOÑI e ANDRADE, 1990).

A determinação do valor crítico da relação  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  depende de fatores como a composição do concreto, o teor de  $\text{C}_3\text{A}$  do cimento, a temperatura, a umidade relativa, o pH da solução dos poros, a proporção de cloretos solúveis, o conteúdo de água e a fonte de cloretos, dentre outros (ALONSO *et al.*, 1997 *apud* PEREIRA, 2001).

Em virtude da ampla gama de fatores envolvidos e considerando-se que muitos deles ainda não são bem conhecidos, ainda não há, entre as referências, um limite universalmente aceito para a relação  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$ . Mehta e Monteiro (2014) defendem que em relações molares  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  maiores que 0,6, percebe-se que o filme de óxido de ferro torna-se instável e o aço deixa de estar protegido contra a corrosão, convergindo com a teoria apresentada por Hausmann (1967 *apud* Baronghel-Bouny, Capra e Laurens, 2014). Scott e Alexander (2016) observaram uma variabilidade considerável na concentração de cloreto necessária para iniciar a corrosão, com a relação  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  variando de 0,3 a 1,7. Alonso *et al.* (2000) observaram uma variação de 1,2 a 4,0 para a relação. Goñi e Andrade (1990) obtiveram valores críticos da ordem de 0,3 a 0,8, dependendo do método de cálculo empregado. Lambert *et al.* (1991) verificaram a despassivação da armadura a partir de uma relação  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  igual a 3,0.

Diante das avultadas variações existentes para a relação  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  crítica, e ainda, levando-se em conta a considerável dificuldade de se medir a concentração de hidroxilas ( $\text{OH}^-$ ) na solução dos poros do concreto, bem como o fato que este não é o único parâmetro que

representa as propriedades inibidoras do cimento, podendo os cloretos combinados tornar-se livres e tomar parte nas reações de corrosão, a relação entre os cloretos livres ou totais e a massa de cimento, especialmente esta última, apresenta-se como um parâmetro mais coerente, e por isso, tem sido mais amplamente utilizado (GLASS e BUENFELD, 1997). A porcentagem de cloretos em relação à massa de cimento consiste, portanto, na forma mais adequada de se estabelecer o teor crítico desta substância uma vez que o conteúdo de cimento no concreto altera sua capacidade de fixação de cloretos (HELENE, 1993).

Este teor pode, ainda assim, oscilar entre 0,1 e 1,0 % da massa de cloreto total, tomado em relação à massa de cimento, dependendo do país e de alguns parâmetros, como condições ambientais e concentração de cloretos na superfície do concreto, dentre outros (PAGE *et al.*, 1991). Como limite muito geral, considera-se que 0,4 % em relação à massa do cimento, ou 0,05 a 0,1% em relação à massa do concreto são quantidades suficientes de cloretos para despassivar o aço (ANDRADE, 1992). Contudo, Meira (2004) constatou que o limite crítico clássico de 0,4 % de cloretos totais em relação à massa de cimento é conservador para os materiais e ambientes por ele estudados, melhor cabendo um limite em torno a 0,8 % de cloretos totais em relação à massa de cimento.

De fato, não há na comunidade científica um consenso sobre o valor de concentração crítica de cloretos para a iniciação da corrosão e é provável que não exista um valor único visto que este depende de inúmeros fatores (JUSTNES *et al.*, 2016).

Diante do cenário de grande variabilidade, a tendência vigente é que sejam adotados valores limites conservadores com o objetivo de atender à maioria dos casos. Neste sentido, o Quadro 2.2 apresenta os valores críticos de cloretos no concreto recomendados por algumas normas e organismos internacionais.

No tocante as normas técnicas brasileiras, especificamente, a NBR 12655 (ABNT, 2015) recomenda, com vistas à proteção das armaduras do concreto, teores máximos de íons cloreto de acordo com a classe de agressividade ambiental e com as condições de serviço da estrutura. Por sua vez, a NBR 6118 (ABNT, 2014) enfatiza que não é permitido utilizar aditivos contendo cloretos em sua composição. Já a NBR 7211 (ABNT, 2009) prescreve teores limites de cloretos em agregados para concreto armado menores que 0,1% da massa do agregado e para concreto protendido de 0,01% da massa do agregado.

Quadro 2.2 - Teor crítico de cloreto em concreto para diversas normas e organismos internacionais

Norma / Local	Teor crítico de cloretos recomendado	Referência do teor de cloretos
NBR 12655 (ABNT, 2015) Brasil	≤ 0,15 % em concretos expostos a cloretos	
	≤ 0,30 % em concretos não expostos a cloretos	
	≤ 0,40 % em concretos em brandas condições de exposição (seco ou protegido da umidade)	
EN 206-1 (ECS, 2000) Europa	≤ 0,10 a 0,20 % (concreto protendido)	
	≤ 0,20 a 0,40 % (concreto armado)	
Bulletin 34 (FIB, 2006) Suíça	≤ 0,20 %	
EHE - 08 (CPH, 2011) Espanha	≤ 0,60 % (concreto armado)	cloretos totais (% massa de cimento)
	≤ 0,30 % (concreto protendido)	
Hong Kong Building Depart (HKBD, 2016) China	≤ 0,10 % (concreto protendido)	
	≤ 0,20 % (com cimento resistente a sulfato)	
	≤ 0,35 % (com cimento Portland de endurecimento rápido)	
318-08 (ACI, 2008) EUA	≤ 0,15 % em ambiente com cloretos	
	≤ 0,3 % em ambiente normal	
	≤ 1,0 % em ambiente seco	
	≤ 0,06 % (concreto protendido)	
BS 8110:1 (BSI, 1997) Inglaterra	≤ 0,10 %	
Committee 222 (ACI, 2002) EUA	≤ 0,08 % (concreto protendido) <sup>1</sup>	<sup>1</sup> cloretos totais (% massa de cimento)
	≤ 0,10 % (concreto armado) úmido <sup>1</sup>	
	≤ 0,20 % (concreto armado) seco <sup>1</sup>	<sup>2</sup> cloretos livres (% massa de cimento)
	≤ 0,06 % (concreto protendido) <sup>2</sup>	
	≤ 0,08 % (concreto armado) úmido <sup>2</sup>	
≤ 0,15 % (concreto armado) seco <sup>2</sup>		
NZS 3101 (NZS, 2006) Nova Zelândia	≤ 0,02 % (concreto protendido)	cloretos totais (% massa de concreto)
	≤ 0,03 % (concreto armado) úmido	
	≤ 0,07 % (concreto armado) seco	
JSCE-15 (JSCE, 2010) Japão	≤ 1,20 kg/m <sup>3</sup> de concreto	

Fonte: Adaptado de FIGUEIREDO, 2005, p. 844 e MEIRA, 2017, p. 41.

### 2.3.4.2 Cimento Portland e adições minerais

A resistência à penetração de cloretos no concreto pode ser substancialmente afetada pelo tipo de aglutinante utilizado na mistura (REAL, BOGAS e PONTES, 2015). O entendimento dos efeitos do tipo de cimento Portland sobre a química da solução de poros é o primeiro passo para se entender o processo geral de corrosão das armaduras embutidas nas estruturas de concreto (SCOTT e ALEXANDER, 2016).

Dessa forma, a seleção de um sistema de aglomerante adequado é um dos mais importantes aspectos envolvidos na obtenção de um concreto com boa resistência à penetração de íons cloreto no concreto (GJØRV, 2014).

#### a) Características físico-químicas do cimento Portland

A composição química do cimento Portland, por exemplo, é um aspecto relevante visto que alguns de seus constituintes como o aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) e o ferroaluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ), presentes no clínquer, possuem a capacidade de reagir com os íons cloreto, formando cloroaluminatos, o que reduz a concentração de íons cloreto livres na solução aquosa dos poros do concreto (PAGE, SHORT e HOLDEN, 1986; PEREIRA, 2001).

Uma vez que só os cloretos livres se movimentam na rede porosa, a formação dos cloroaluminatos representa a fixação de cloretos e leva, portanto, à diminuição da velocidade de transporte desses íons na matriz do concreto (MEIRA, 2017).

A reação dos íons cloreto com o aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) oriundo do cimento origina um sal complexo insolúvel, o cloroaluminato de cálcio hidratado, comumente conhecido como sal de Friedel e é considerada a principal forma de fixação de cloretos no concreto. Dessa forma, quanto mais alto é o teor de  $C_3A$  do cimento, maior é a quantidade de íons cloreto retidos, o que incrementa a resistência à corrosão induzida por estes agentes tendo em vista que na condição de cloretos quimicamente ligados os mesmos permanecem indisponíveis para despassivação do aço (BARONGHEL-BOUNY, CAPRA e LAURENS, 2014).

Neste sentido, a Tabela 2.1 apresenta um estudo no qual foi avaliado o desempenho de cimentos com distintos teores de C<sub>3</sub>A frente à fixação de cloretos em relação ao tempo demandado para a iniciação da corrosão.

Tabela 2.1 - Efeitos do C<sub>3</sub>A na quantidade de cloretos livres e na corrosão

Teor de C <sub>3</sub> A do cimento	% de cloretos livres	Tempo para início da corrosão
2 %	86 %	Referência
9 %	58 %	1,75 vezes
11 %	51 %	1,93 vezes
14 %	33 %	2,45 vezes

Fonte: RASHEEDUZZAFAR *et al.*, 1990, pg. 725.

O efeito do consumo de cimento na resistência à penetração de cloretos está relacionado de maneira direta à maior quantidade de clínquer na mistura e, conseqüentemente, à maior capacidade de fixação de cloretos por metro cúbico de concreto. Além disso, com o aumento do consumo de cimento, a porosidade do concreto diminui, e em função desse aspecto, a velocidade de transporte de substâncias através dele também é reduzida (BYFORS, 1990 *apud* MEIRA, 2017).

#### **b) Cimentos compostos e adições minerais**

A indústria cimentícia é uma das principais fontes geradoras de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Estima-se que para cada tonelada de clínquer produzida, principal matéria-prima do cimento, são emitidas cerca de uma tonelada desde composto na atmosfera (CASSGNABERE, 2009). Estudos internacionais apontam que aproximadamente 5% de todas as emissões de CO<sub>2</sub> de origem antrópica no mundo provêm da produção do cimento (KIHARA e VISEDO, 2014).

O impacto ambiental decorrente da demanda de energia e das emissões de CO<sub>2</sub> pelo processo de produção do cimento tem levado à abordagens com foco na busca de uma engenharia mais sustentável, a qual busca, entre outros aspectos, a maximização da durabilidade do concreto, a

conservação de materiais e a utilização de resíduos e de materiais cimentícios suplementares (BERNDT, 2009).

Um subproduto industrial considerado um resíduo por determinado setor industrial, tais como a cinza volante, a escória de alto forno, a sílica ativa e a cinza de casca de arroz, pode possuir certa capacidade pozolânica, e encontrar alguma aplicação em outro setor, por exemplo, como substituto parcial do cimento Portland nas construções com concreto. Neste sentido, a utilização dos chamados materiais cimentícios suplementares e/ou materiais pozolânicos surge como uma alternativa menos nociva ao meio ambiente, em relação ao cimento comum e, quando adequadamente empregados, podem conferir aos concretos benefícios em determinadas propriedades de interesse (MADRID, GARCÍA e BORGES, 2016).

Além de representar uma relevante medida de controle e de redução das emissões de CO<sub>2</sub> pela indústria (KIHARA e VISEDO, 2014), a utilização de resíduos, como a escória de alto forno, em cimentos ajuda a solucionar a questão de armazenamento e eliminação destes, os quais são gerados em quantidades muito elevadas pela indústria siderúrgica. As adições minerais podem ser usadas em concretos tanto como um aglutinante adicional introduzido na mistura durante a concepção quanto podem ser utilizadas como um constituinte do cimento, sendo misturadas diretamente ao clínquer (YILDIRIM, ILICA e SENGUL, 2011).

Neste contexto, o emprego destes materiais tem sido cada vez mais comum nos projetos em razão dos atributos positivos associados ao seu uso, refletindo, geralmente, em melhores propriedades mecânicas, de durabilidade, além de maior sustentabilidade e ganhos econômicos (OTIENO, BEUSHAUSEN e ALEXANDER, 2014).

De fato, a incorporação dos materiais pozolânicos finamente moídos, como adições ou em substituição ao cimento comum, aumentam, quando utilizados em teores adequados, a durabilidade dos concretos. Ocorre que a hidratação do cimento Portland resulta, principalmente, na produção de cristais de hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>), chamada de portlandita, e de um gel amorfo de silicato de cálcio hidratado (C<sub>3</sub>S<sub>2</sub>H<sub>3</sub>), comumente chamado de C-S-H. Em geral, são formados no processo, aproximadamente, 70% de C-S-H, 20% de Ca(OH)<sub>2</sub>, 7% de sulfoaluminatos e 3% de fases secundárias. O Ca(OH)<sub>2</sub>, parcialmente solúvel em água, afeta negativamente a qualidade do concreto, formando cavidades e oferecendo baixa resistência mecânica. Neste sentido, o uso das pozolanas tem um efeito positivo, já na

reação destas com o  $\text{Ca(OH)}_2$ , à temperaturas normais, são formados produtos de hidratação secundários mais resistentes, como C-S-H, que por sua vez preenchem os vazios capilares grandes e refinam a estrutura dos poros (ASTM, 2000; ONER e AKYUZ, 2007).

As adições minerais podem ser classificadas quanto à sua atuação, sendo divididas entre aquelas com ação pozolânica, cimentante e as que atuam somente como fíller (MEHTA e MONTEIRO, 2006). Como dito, as adições minerais com ação pozolânica consomem o hidróxido de cálcio (CH) livre para formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H), enquanto que os materiais com ação cimentante formam o mesmo produto a partir da reação com a água, sem interagir, obrigatoriamente, com o CH (NEVILLE, 2011).

Além dos ganhos apresentados, tais como as reduções da porosidade, da demanda de energia e na geração de  $\text{CO}_2$ , as adições minerais melhoram também a interface da pasta com o agregado e reduzem o risco de fissurações térmicas no concreto (ONER e AKYUZ, 2007).

Em decorrência da melhor distribuição das dimensões dos poros e da maior densificação da interface entre a matriz e o agregado, a utilização de cimentos compostos e das adições minerais possibilitam, por exemplo, uma maior resistência à penetração dos íons cloretos (HELENE, 1993; FIGUEIREDO, 2005; OLLIVIER e TORRENTI, 2014).

As adições minerais afetam também a composição iônica da solução de poros do concreto (REAL, BOGAS e PONTES, 2015). Elas levam a uma alteração nos hidratos do cimento, conduzindo a uma redução na mobilidade dos íons cloreto (BASHEER, 2002), isto é, acarretam uma redução da velocidade de transporte destes agentes agressivos no concreto (MEIRA, 2017). Isso se deve ao fato de que as pozolanas, em particular as cinzas volantes e as escórias de alto forno, apresentam boa capacidade de fixação de cloretos por apresentarem em sua composição teores mais elevados de aluminatos se comparados aos encontrados no clínquer e, assim, promovem além das alterações na estrutura de poros e na composição da solução aquosa, um aumento da capacidade de fixação dos íons cloreto, o que potencializa a resistência do concreto quanto ao ataque por estes agentes agressivos (ISAIA, 1995; PEREIRA, 2001).

Sob outra perspectiva, o uso crescente das adições pozolânicas, incorporadas ao cimento ou diretamente inserida na mistura do concreto, tem levado a uma diminuição do pH da solução

dos poros. Ocorre que, se por um lado estas contribuem sobremaneira para a redução da porosidade do material, dificultando a entrada de agentes agressivos, por outro lado, estas também contribuem para a redução da reserva alcalina do concreto devido ao consumo de hidróxidos resultantes da hidratação do cimento. Dessa forma, quando utilizadas, é importante que a redução da porosidade prevaleça em relação à redução do potencial alcalino das dosagens com essas adições. Isso faz com que a vantagem do uso dessas adições minerais seja mais pronunciada para adições mais ativas e para as dosagens com relação água/cimento mais baixas (MEIRA, 2017).

Ademais, os efeitos benéficos na resistência a penetração de cloretos pela utilização destas adições são oriundas também do aumento da finura destes materiais em relação ao cimento. Lim *et al.* (2016) constataram, em seus estudos, que o aumento da finura da escória de alto forno aumenta a área superficial disponível para reações de hidratação, o que pode melhorar as propriedades do concreto nas primeiras idades, bem como, no longo prazo, as propriedades mecânicas e de durabilidade. Segundo Gjrv (2014), a moagem da escória de alto forno até uma finura Blaine de 16.000 cm<sup>2</sup>/g, por exemplo, propicia uma resistência extremamente alta à penetração de íons cloreto.

Em estudos com diferentes tipos de cimento, Mehta, Schiessl e Raupach (1992 *apud* Helene, 1993) encontraram o mais alto coeficiente efetivo de difusão nos concretos produzidos com cimento Portland resistente a sulfatos, que por sua vez, possuem baixo teor de aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A). Na sequência, apareceram os cimentos Portland comum e os cimentos com adições de materiais pozolânicos. Os menores coeficientes efetivos de difusão, isto é, as maiores resistências à penetração de cloretos se deram pela utilização dos cimentos com microsílica e, principalmente, pelos cimentos com adição de escória de alto forno.

Do mesmo modo, Gjrv (2014) ao realizar testes de campos prolongados em estruturas de concreto de portos noruegueses verificou que a melhor resistência à ação de cloretos foi observada para os cimentos compostos com escória de alto forno, enquanto a menor resistência foi obtida para os cimentos Portland puros. Estes resultados corroboram com os obtidos por Page *et al.* (1986) e Page, Short e El Tarras (1981) ao constatarem que a adição de escória de alto forno e de cinza volante levava a uma relevante diminuição da difusividade dos cloretos em relação ao cimento Portland puro, como retrata a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Difusividade de cloretos, a 25° C, em pastas com relação a/c igual a 0,5

Tipo de Cimento	Coefficiente de difusão ( $\times 10^{-9}$ ) ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )
Cimento Portland puro	44,7
Cimento com 30% de cinza volante	14,7
Cimento com 65% de escória	4,1
Cimento resistente a sulfatos	100,0

Fonte: PAGE, SHORT e EL TARRAS, 1981.

Outrossim, Yildirim, Ilica e Sengul (2011) verificaram que concretos produzidos usando os cimentos com escória tiveram uma resistência à penetração de íons cloreto substancialmente menor em comparação à aqueles produzidos com outros tipos de cimento. Arskog *et al.* (2007 *apud* Gjörv, 2014) também avaliaram as resistências à penetração de cloretos de diferentes cimentos, sendo aqueles com escória de alto forno bastante superiores aos demais cimentos testados, como mostra a Figura 2.10.

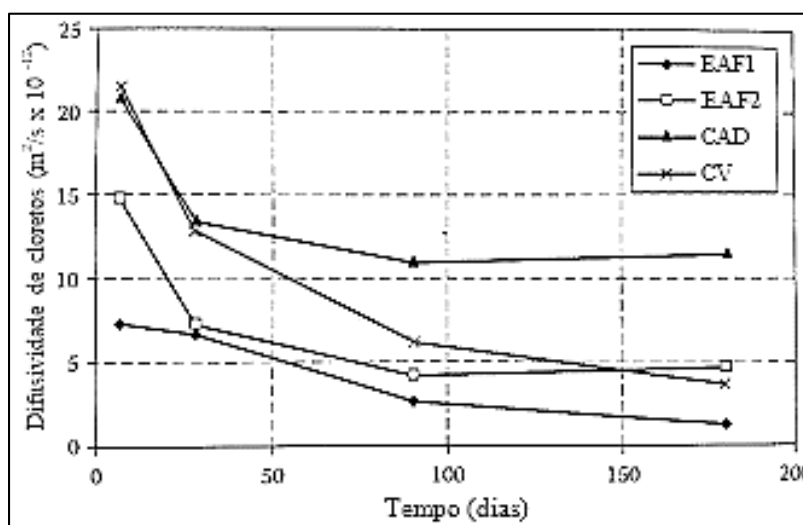


Figura 2.10 - Efeitos na difusividade de cloretos em concretos ( $a/c = 0,45$ ) produzidos com diferentes cimentos

EAF1 = 34 % de escória

EAF2 = 70 % de escória

CV = 18% de cinza volante

CAD = concreto de alto desempenho (HPC)

Fonte: Adaptado de GJØRV, 2014, pag. 75.

Ipavec *et al.* (2013), estudando a capacidade de ligação de cloretos em cinco diferentes sistemas de aglutinantes, incluindo-se entre eles a cinza volante, a escória granulada de alto forno e a sílica ativa, constataram que as adições afetaram significativamente esta capacidade,

a qual mostrou-se notadamente maior nos sistemas que continham uma maior quantidade de aluminato em relação ao cimento comum, tais como os com cinza volante e com escória.

Ainda neste contexto, estudos desenvolvidos por Thomas *et al.* (2011) mostraram que a incorporação de vários tipos de materiais cimentícios suplementares como escória de alto-forno, cinza volante ou sílica ativa, mantendo-se a mesma relação água/aglomerante, reduziu a difusividade de cloretos por um fator de até 20. Da mesma maneira, Bijen (1998 *apud* Gjörv, 2014) sugeriu que uma substituição de cimento Portland puro por um cimento composto com escória de alto forno pode reduzir a difusividade de íons cloreto por um fator de até 50. Segundo Lim *et al.* (2016), a substituição de 45% de cimento por escória de alto forno aumenta a durabilidade do concreto, em termos de difusividade, em cerca de 40%.

Gjörv (2014) salienta que, no tocante aos teores de substituição, enquanto as escórias de alto forno são aglomerantes hidráulicos e tem sido comumente utilizadas com melhoria das propriedades, mesmo em elevados teores, alguns materiais pozolânicos, como, por exemplo a cinza volante, tem seus principais efeitos dependentes da quantidade de  $\text{Ca(OH)}_2$  disponível para a reação pozolânica, e dessa forma, as substituições de cimento Portland por estes materiais em teores acima de 30% produzem pouco ou nenhum efeito na resistência à penetração de cloretos, consoante com os estudos de Sengul (2005), retratados na Figura 2.11.

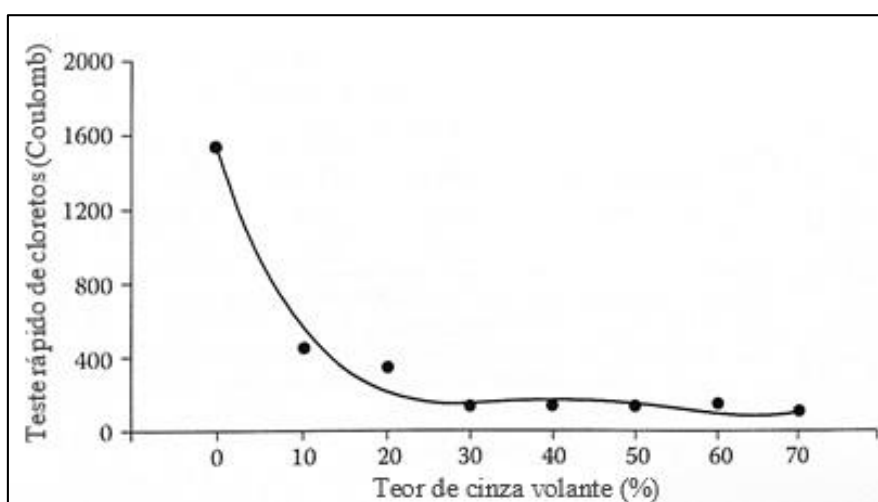


Figura 2.11 - Influência do teor de cinza volante na difusividade de cloretos  
Fonte: Adaptado de GJØRV, 2014, pag.77.

Pereira, Monteiro e Almeida (2013), estudando a capacidade de proteção de alguns tipos de cimento brasileiros em relação a corrosão das armaduras sob a ação de íons cloreto,

constataram que o cimento composto com escória de alto forno obteve, em relação aos demais, o melhor desempenho em termos de propriedades mecânicas e de resistência à penetração de cloretos.

### **c) Escória de alto forno**

A escória de alto forno granulada é uma mistura mineral que melhora a reologia do concreto fresco, suas propriedades mecânicas e sua durabilidade (TENG; LIM; DIVSHOLI, 2013). É um subproduto não metálico da fabricação de ferro-gusa, sendo, neste processo, produzidas quantidades de ferro e de escória da mesma ordem (SHA e PEREIRA, 2001). Estas adições contêm todos os elementos suscetíveis de formar os mesmos hidratos que o cimento, sendo o pH suficientemente básico da pasta um ambiente propício para a ativação destas, isto é, para o aumento da sua solubilidade em presença de água (NONAT, 2014).

De forma geral, as escórias são compostas essencialmente por silicatos, aluminosilicatos de cálcio e outras fases (SIDDIQUE, 2012). Normalmente, elementos como silício, cálcio, alumínio, magnésio e oxigênio constituem 95% ou mais da escória de alto forno. A sua composição química pode variar de acordo com a sua origem, porém para ser considerada um material cimentício, a proporção dos seus constituintes devem atender a intervalos como CaO (30 a 45 %), SiO<sub>2</sub> (30 a 48 %), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (15 a 25 %), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,5 a 2 %) e outros óxidos de menor quantidade (SHETTY, 2013).

A maximização das propriedades cimentícias da escória fundida é obtida pelo resfriamento rápido ao deixar o alto forno, o que minimiza a cristalização e converte a escória fundida em partículas de tamanho menores 4,75 mm, dando origem, após a moagem fina deste material, à escória granulada de alto forno (ACI, 1995). As dimensões das partículas de escória de alto forno são da ordem de 4 a 15 mm, sendo que, após a moagem, as dimensões pode ser menores que 45 µm e área de superfície de 400 a 600 m<sup>2</sup>/kg (LEA, 1971).

O rápido resfriamento da escória fundida por meio da aplicação de água na sua superfície, visa obter um material vítreo com certo grau de ativação. Dessa forma, como já exposto, a incorporação de escória de alto forno na mistura de cimento modifica a natureza e as características dos hidratos formados, afetando a rede capilar do concreto e reduzindo o

tamanho e o número de poros (MADRID, GARCÍA e BORGES, 2016). Estes efeitos levam a uma microestrutura mais densa da pasta de cimento hidratada, na qual mais espaços dos poros são preenchidos com C-S-H em comparação ao uso de cimento puro (PEREIRA, 2001).

Fato é que a escória de alto forno reduz, significativamente, o coeficiente de difusão cloretos no concreto, seja pelo efeito físico da adição, que altera a porosidade, ou pelo aumento da capacidade de fixação de cloreto, que se devem aos altos níveis de aluminatos na escoria, formando altas quantidades de Sal de Friedel (DIHR *et al.*, 1996).

Ogirigbo e Black (2017) estudaram o impacto da composição química da escória de alto forno na resistência a penetração de cloretos e constataram que a escória com um maior teor de alumina levou a uma maior capacidade de ligação de íons cloreto pela formação de uma maior quantidade de sal de Friedel. Além disso, para os autores, o maior teor de alumina levou a obtenção de um maior grau de hidratação dos concretos, resultando na formação de mais fases C-S-H e de uma estrutura de poros mais refinada.

Semelhantemente, Lee e Lee (2016) verificaram que o aumento do teor de escória de alto forno nas misturas acarretaram uma diminuição no volume de vazios permeáveis do concreto em função do aumento da quantidade de fases C-S-H, o que levou a obtenção de uma matriz cimentícia mais densa. Segundo Zajac *et al.* (2018), a hidratação da escória resulta na formação de uma microestrutura mais eficiente, com menor porosidade e mais refinada.

Além disto, a substituição de cimento por escória granulada de alto forno melhora a trabalhabilidade e a consistência do concreto fresco (TENG; LIM; DIVSHOLI, 2013). Com isso, a quantidade de água necessária para se obter um mesmo abatimento é reduzida, sendo influenciada pelo teor de substituição e pela finura da escória utilizada (SHETTY, 2013).

No entanto, o processo de hidratação da escória é mais lento que o do clínquer devido à maior dificuldade de sua dissolução e à necessidade de uma fonte de ativação, neste caso, a presença da portlandita  $[Ca(OH)_2]$ , a qual é oriunda da hidratação do clínquer, dos álcalis presentes na escória e da ação do gesso e/ou anidrita (MADRID, GARCÍA e BORGES, 2016).

Em virtude desta menor reatividade da escória, há uma considerável diminuição da resistência à compressão nas primeiras idades em comparação com as misturas de concreto de cimento

comum com o mesmo consumo de aglutinante, pois, como exposto, a reação pozolânica é lenta e a formação de hidróxido de cálcio requer tempo. Entretanto, em idades longevas à medida que o período de cura é prolongado, percebe-se o contrário, isto é, o aumento de resistência é maior para os concretos com escória (ONER e AKYUZ, 2007). De igual modo, Choi, Kim e Choi (2017) verificaram que as resistências à compressão diminuíram com o aumento do teor de substituição por escória nas idades precoces, enquanto em idades avançadas aumentaram quando utilizou-se teores de substituição de até 65%. Magalhães (2007) observou que as resistências à compressão de concretos produzidos com cimento contendo maiores teores de escória de alto forno tornaram-se, em idades mais avançadas, maiores do que aquelas obtidas nos concretos produzidos com menores teores desta adição, invertendo o comportamento observado nas primeiras idades.

No tocante aos teores de utilização, embora os cimentos Portland possam ser substituídos por escória de alto forno em maiores quantidades quando comparadas, por exemplo, às cinzas volantes, estas adições também parecem ter um limite superior de aplicação acima do qual o ganho de resistência à penetração de cloretos é muito pequeno (GJØRV, 2014).

Nesta perspectiva, Lee *et al.* (2015), analisando o comportamento de concretos com diferentes relações água/cimento, na idade de 360 dias, constataram que o teor ótimo de substituição por escória é de aproximadamente 40% do conteúdo total de cimento, ou seja, que até esse teor, o aumento da quantidade de escória representou um crescimento na resistência à compressão, sendo que após este ponto ótimo, qualquer aumento adicional de escória não representada eficácia quanto ao ganho de resistência à compressão. De igual modo, Oner e Akyuz (2007) encontraram um ponto ótimo de substituição de cimento por escória granulada de alto forno em torno de 55% do conteúdo total de cimento, acima do qual a adição de escória não melhorou a resistência à compressão pelo fato de que, neste caso, a escória não mais reage e atua apenas como material de preenchimento na pasta.

De acordo com Lim *et al.* (2016), o nível ideal de substituição de cimento por escória de alto forno parece ser de 45%, ponto a partir do qual pode não haver mais melhorias significativas nas propriedades do concreto. Proske *et al.* (2018) verificaram que concretos feitos com cimentos contendo 30% em peso de escória de alto forno podem fornecer uma resistência suficiente contra a migração de íons cloreto. Otieno, Beushausen e Alexander (2014) observaram o aumento da resistência à penetração de cloretos com a elevação do teor de

substituição de cimento por escória em concretos com uma mesma relação água/cimento, independentemente do tipo de escória utilizada.

Teng, Lim e Divsholi (2013) observaram que as propriedades de durabilidade do concreto com 30% de substituição de cimento por escória de alto forno foram significativamente melhoradas, obtendo-se coeficientes de difusividade de cloreto até 88% menores em comparação com as misturas de controle.

Com um foco similar, Sengul e Gjrv (2007 *apud* Gjrv, 2014) avaliaram a resistência à penetração de cloretos em concretos, com relação água/cimento de 0,40, utilizando-se os teores de 40%, 60% e 80% de substituição de cimento Portland por escória de alto forno com finura Blaine de 5.000 cm<sup>2</sup>/g. Os resultados de tais ensaios, apresentados pela Figura 2.12, mostraram que a adição de escória de alto forno aumentou substancialmente a resistência à penetração de cloretos, mas que o aumento do teor acima de 40% de substituição pouco representou melhorias desta propriedade.

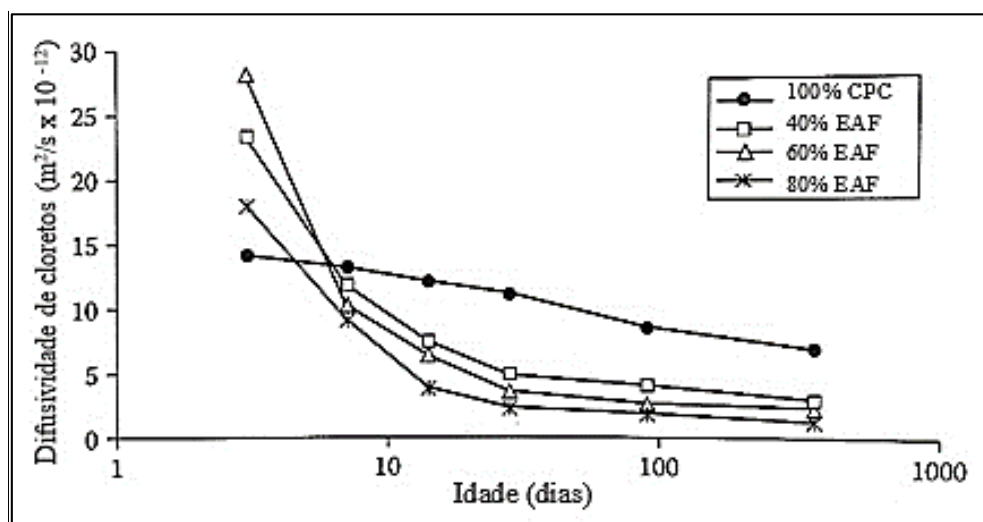


Figura 2.12 - Influência do teor de substituição parcial por escória de alto forno na difusividade de concretos (a/c = 0,40)  
EAF = escória de alto forno.

Fonte: Adaptado de SENGUL e GJRV , 2007 *apud* GJRV , 2014, pg. 78.

Ainda neste cenário, Bijen (1998 *apud* Gjrv, 2014), analisando a difusividade de cloretos ( $D_{CL^-}$ ) em pastas de cimento com relação água/cimento igual a 0,60, constatou que praticamente nenhum efeito na difusividade de cloretos em concreto foi notado para teores de substituição de cimento por escória de alto forno menores do que 25%. Os resultados obtidos,

apresentados na Figura 2.13, mostraram ainda que para teores de escória compreendidos entre 25% e 50% uma considerável redução na difusividade de cloretos nos concretos foi observada. Já para teores de substituição acima de 50%, a redução da difusividade de cloretos mostrou-se pouco representativa.

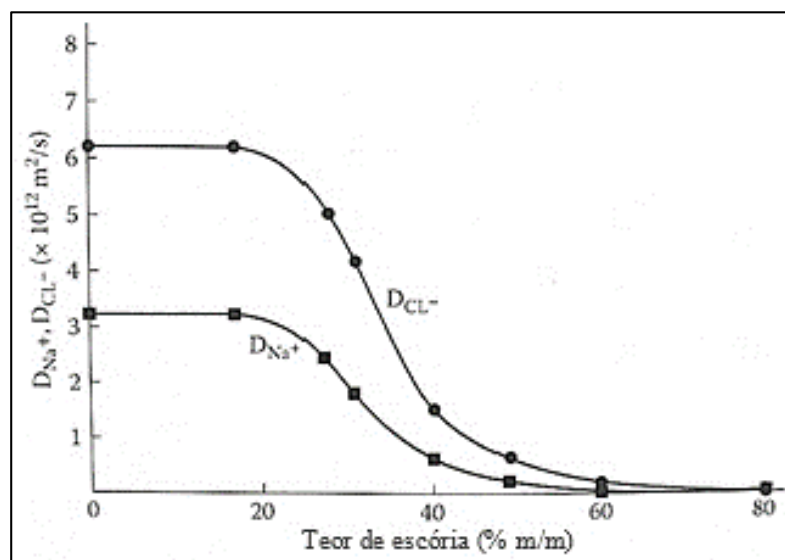


Figura 2.13 - Influência do teor de substituição parcial de cimento por escória de alto forno na difusividade de cloretos no concreto  
Fonte: Adaptado de BIJEN, 1998 *apud* GJØRV, 2014, pg. 79.

Em suma, a incorporação de escória de alto forno ao concreto possibilita, entre outros efeitos benéficos, a redução do calor de hidratação, o refinamento da estrutura de poros, a redução da permeabilidade de agentes externos, o aumento da resistência ao ataque de cloretos e sulfatos, melhor trabalhabilidade da mistura e a obtenção, para determinados níveis de utilização, de maiores resistências à compressão (SHETTY, 2013).

### 2.3.4.3 Relação água/cimento

Dentre os vários fatores a serem levados em consideração para uma adequada avaliação da resistência ao ingresso de cloretos nos concretos, a sua relação água/cimento é, geralmente, o fator de controle mais importante, sendo essa diretamente relacionada com a porosidade e com a permeabilidade do concreto (SILVA, 2011; GJØRV, 2014).

De fato, a diferença da permeabilidade entre um concreto com baixa e outro com alta relação água/cimento pode ser da ordem de 10 vezes (TUUTTI, 1982). No tocante a difusão, pode-se

notar que entre valores de 0,3 e 0,7 para a relação água/cimento, o coeficiente de difusão pode ser multiplicado por um fator de até 20 (OLLIVIER e TORRENTI, 2014).

Ocorre que tal relação influencia de forma direta a formação da microestrutura e da rede de poros do concreto, sendo o tamanho e a interconectividade destes os principais fatores controladores da penetração de cloretos, facilitando ou impedindo o deslocamento destes íons no interior do concreto (PEREIRA, 2001).

Deste modo, à medida em que há uma redução na relação água/cimento, o coeficiente de difusão efetivo de cloretos diminui tendo em vista que a velocidade de transporte destes agentes agressivos no interior do concreto se reduz devido a obtenção de uma menor porosidade na matriz do concreto (OLLIVIER e TORRENTI, 2014).

A Figura 2.14 demonstra os efeitos da variação da relação água/cimento na distribuição de poros de concretos produzidos com cimento Portland puro, evidenciando que a redução da relação água/cimento acarreta em uma menor porosidade do concreto.

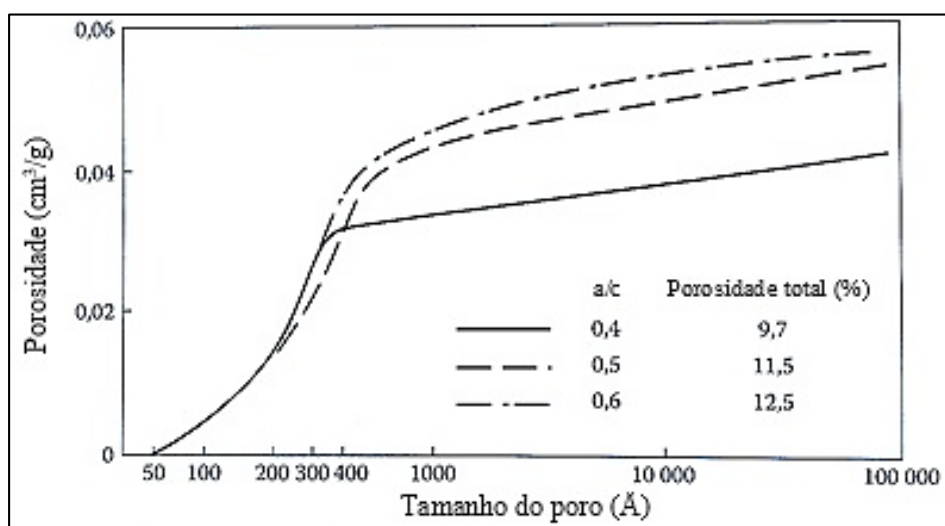


Figura 2.14 - Efeitos da variação da relação água/cimento na distribuição de poros de concretos produzidos com cimento Portland puro

Fonte: Adaptado de GJØRV e VENNESLAND, 1979 *apud* GJØRV, 2014, pg. 74.

Em estudo realizado com utilização de diferentes tipos de cimentos, Pereira, Monteiro e Almeida (2013) constataram que a redução da relação água/cimento melhorou as propriedades mecânicas, bem como a resistência à corrosão devido à ação de íons cloreto. Por sua vez, Mangat e Molloy (1992) apontaram que o parâmetro decisivo na proteção das armaduras de

concretos monitorados eletroquimicamente e submetidos a ciclos de molhagem e secagem por jatos de solução salina com cloreto de sódio (NaCl) foi a relação água/cimento.

Do mesmo modo, Jaergemann (1990) avaliou os efeitos da relação água/cimento na penetração de cloretos em concretos, sendo os resultados apresentados na Figura 2.15, os quais evidenciaram a relação direta existente entre estes dois parâmetros.

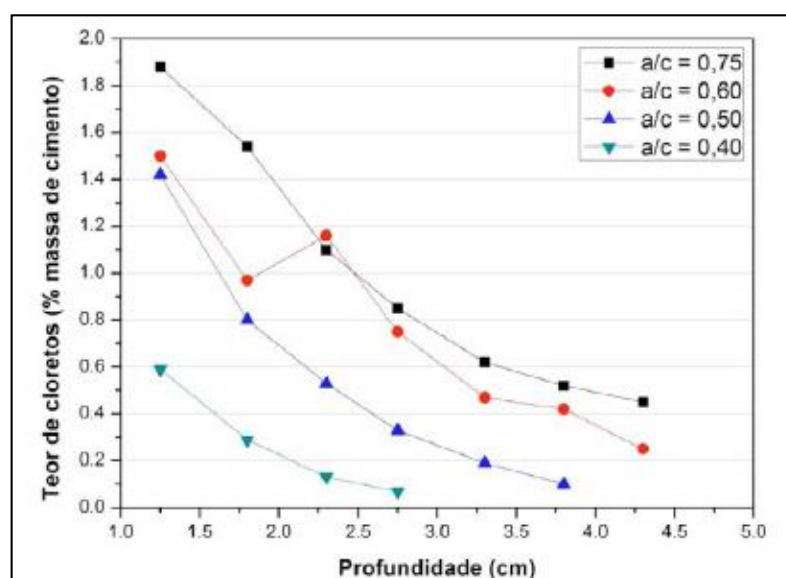


Figura 2.15 - Efeitos da relação água/cimento na penetração de cloretos  
Fonte: JAEGEMANN, 1990 *apud* FIGUEIREDO, 2005, pg. 847.

#### 2.3.4.4 Concreto da camada de cobrimento

A qualidade e a espessura de cobrimento de concreto são também fatores que interferem no processo corrosivo das armaduras (MOTA *et al.*, 2012). Acontece que quanto maior for a espessura da camada de cobrimento, maior será o intervalo de tempo necessário para que a concentração de cloretos na superfície da armadura atinja o valor limite suficiente para despassivá-la (NEVILLE, 2015).

Além do mais, uma camada de cobrimento mais espessa pode permitir uma melhor cura na parte mais interna devido à retenção da água, e, portanto, um maior grau de hidratação, o que leva a uma menor quantidade de poros abertos no concreto. Um cobrimento mais fino, por sua vez, propicia uma maior possibilidade de fissuração do concreto, particularmente na zona de transição entre o agregado e a pasta (SILVA, 2011).

### 2.3.4.5 Adensamento e cura do concreto

O adensamento e a cura do concreto são também fatores que muito influenciam na penetração dos cloretos. Figueiredo (2005) destaca que um concreto com um período de cura mais curto apresenta maior probabilidade de ser penetrado por cloretos do que outro com a cura mais prolongada. Neste último caso, segundo Neville (2015), o tempo necessário para iniciação da corrosão é substancialmente aumentado em relação ao anterior.

Ocorre que as condições de cura influem diretamente na hidratação do cimento, e como consequência, se a cura é curta ou mal conduzida, a hidratação ocorre de forma deficiente, aumentando a porosidade do concreto, principalmente, nas camadas superficiais do concreto, responsáveis pela proteção da armadura (MEIRA, 2017).

Além disso, o tipo de cura utilizada é igualmente um aspecto relevante. Segundo Silva (2011), há uma grande redução da permeabilidade do concreto com a cura úmida em comparação com a cura ao ar, em todos os períodos de cura e para qualquer relação água/cimento.

A Figura 2.16 apresenta os efeitos do tempo de cura e do tempo de exposição para concretos com diferentes relações água/cimento quanto à difusividade de cloretos.

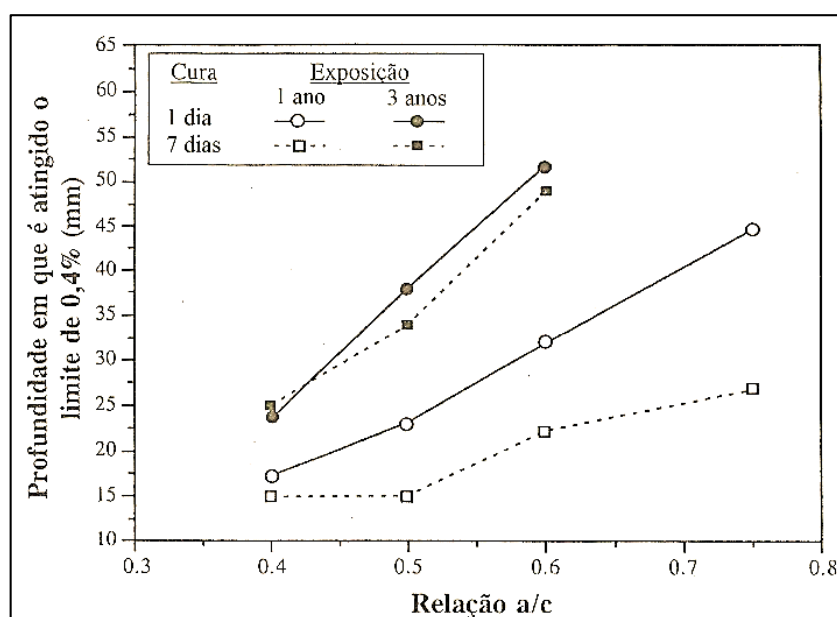


Figura 2.16 - Efeitos do tempo de cura na penetração de cloretos no concreto  
Fonte: Adaptado de JAEGERMANN, 1990 *apud* FIGUEIREDO, 2005, pg. 848.

Neste mesmo âmbito, a Figura 2.17 apresenta os efeitos da variação das condições, tempo e tipo, de cura nos resultados de testes rápidos de permeabilidade de cloretos, os quais exaltam que os concretos submetidos à um processo de cura com maior duração e na condição úmida, apresentaram as menores cargas elétricas passantes, isto é, as maiores resistências à penetração de cloretos.

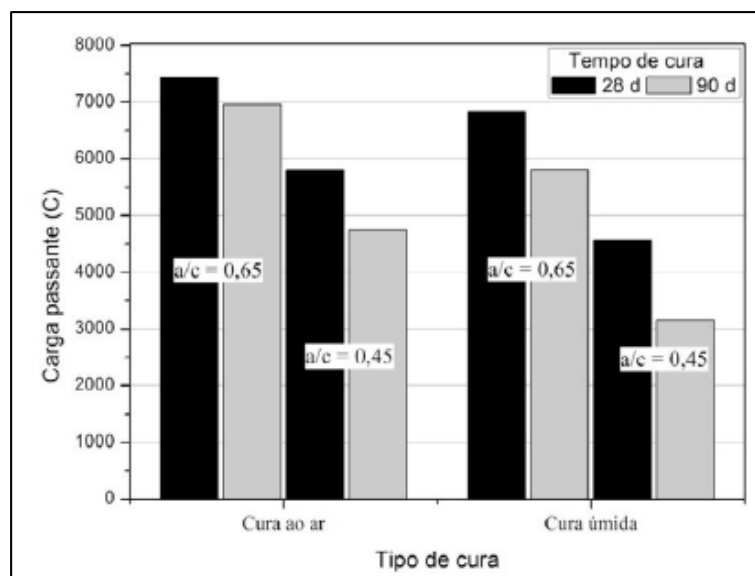


Figura 2.17 - Influência do tipo e do tempo de cura de concretos com distintas relações  $a/c$  quanto à permeabilidade de cloretos  
Fonte: FATTUHI, 1988 *apud* MEIRA, 2017, pg. 57.

#### 2.3.4.6 Umidade ambiental e grau de saturação dos poros do concreto

As condições de umidade do ambiente influem na quantidade de água nos poros que, por sua vez, está relacionada ao eletrólito necessário para o funcionamento da pilha eletroquímica e ao transporte de agentes agressivos no concreto. Assim, se há pouca quantidade de água na rede porosa do concreto, as velocidades de corrosão diminuem e, ao contrário, se há água em quantidade maior, as velocidades sobem (MEIRA, 2017).

Os efeitos da umidade podem ser observados em um caso típico proposto por Meira (2017) no qual corpos de prova de concreto foram curados por 7 dias e então submetidos a variações de umidade por meio de ciclos sequenciais de imersão por 3 dias em solução de cloreto de sódio (NaCl) e de secagem por 4 dias, sendo medidas ao longo do processo as densidades de corrente de corrosão, que por sua vez, indicam a probabilidade de instauração do processo

corrosivo no concreto analisado. Os resultados obtidos mostraram que as correntes de corrosão se amplificaram ao longo da etapa de imersão das amostras, sugerindo que o aumento da umidade do concreto acarreta uma maior probabilidade de corrosão das armaduras, conforme exibe a Figura 2.18

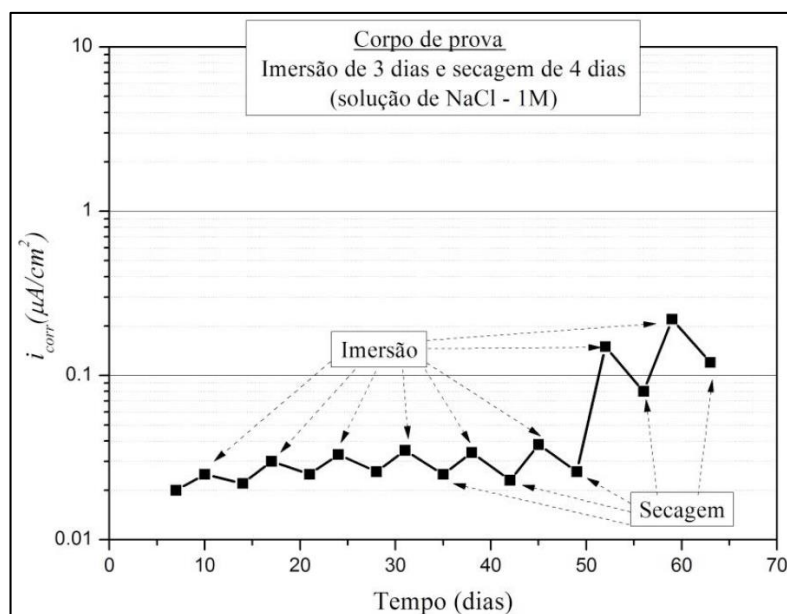


Figura 2.18 - Influência da umidade na corrosão de armaduras  
Fonte: MEIRA, 2017, pg. 70.

A secagem do concreto retarda a difusão dos cloretos uma vez que esse mecanismo ocorre essencialmente em meio aquoso. Contudo, no caso de uma estrutura de concreto armado no qual uma face está em contato com a água e a outra mais seca e em contato com o ar, por exemplo, os efeitos de sucção capilar criam movimentos de transporte da água que favorecem a penetração dos cloretos, sendo o mecanismo de difusão, neste caso, instaurado no interior da estrutura de concreto (OLLIVIER e TORRENTI, 2014).

Sob outra perspectiva, o aumento da quantidade de cloretos nos poros do concreto diminui a possibilidade de secagem do concreto devido ao caráter higroscópico característico dos sais, o que propicia a continuidade do transporte de cloretos por difusão (FIGUEIREDO, 2005).

Neste contexto, estudos de Almenar (2000) e Nielsen e Geiker (2003) correlacionaram o grau de saturação dos poros do concreto com o coeficiente de difusão de cloretos, os quais evidenciaram o aumento destes coeficientes à medida que o grau de saturação se elevou, como pode ser observado na Figura 2.19.

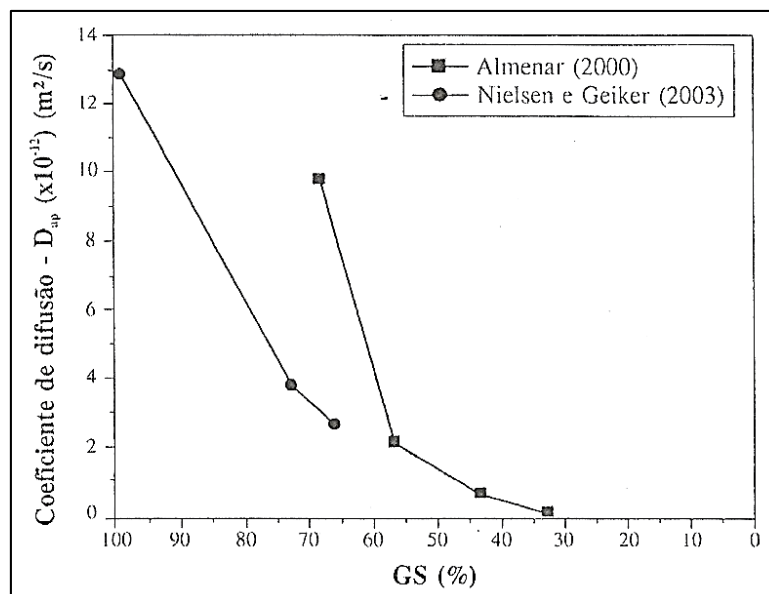


Figura 2.19 - Influência do grau de saturação dos poros na difusividade de cloretos em concretos  
 Fonte: MEIRA, 2004, pg. 849.

### 2.3.4.7 Idade do concreto

A idade do concreto é um fatores relevantes na penetração dos cloretos no concreto visto que está diretamente relacionada com o grau de hidratação do cimento na camada de cobrimento, sendo a porosidade capilar reduzida com o avanço da idade. Deste modo, considerando-se o processo de hidratação contínuo ao longo do tempo, a permeabilidade do concreto se reduz com o aumento da idade, e conseqüentemente, também a probabilidade de penetração destes agentes agressivos (OLLIVIER, MASSAT e PARROT, 1995 *apud* SILVA, 2011).

As alterações que ocorrem na microestrutura da pasta de cimento hidratada, implicando em um rápido decréscimo da porosidade com o decorrer do progresso da hidratação do cimento se justificam pelo fato de que o volume de gel gerado no processo tem, aproximadamente, 2,1 vezes o volume do cimento anidro, de forma que o gel vai, gradualmente, preenchendo o espaço originalmente ocupado pela água (PEREIRA, 2001; NEVILLE, 2015).

Choi, Kim e Choi (2017), estudando a microestrutura de poros de concretos com diferentes composições, constataram que a medida que as idades dos concretos aumentaram, o volume e o tamanho dos poros diminuíram. Liu, Presuel-Moreno e Paredes (2015) verificaram que,

entre outros fatores, o coeficiente de difusão aparente do concreto é fortemente dependente da idade do concreto no momento em que a exposição se inicia.

Na mesma perspectiva, Lim *et al.* (2016) verificaram, com o avanço da idade, reduções de 29%, 40% e 28% dos coeficientes de difusividade de íons cloreto para concretos ensaiados aos 7, 28, 56 e 90 dias, respectivamente, corroborando acerca da influência deste fator na melhoria da microestrutura, e conseqüente, aumento da resistência à penetração de cloretos.

#### **2.3.4.8 Estado de carbonatação do concreto**

A carbonatação é mais um dos fatores intervenientes sobre a resistência de concretos à penetração de cloretos, aumentando o transporte e a concentração de íons cloreto livres na matriz (ZHU *et al.*, 2016). Em um concreto carbonatado, a capacidade de fixação de destes íons, por reação com o  $C_3A$ , é significativamente menor do que em relação à um concreto não carbonatado (HELENE, 1993).

A carbonatação afeta notavelmente o perfil de cloretos, não só pela redução da sua capacidade de ligação, mas também pela aceleração da taxa de difusão destes íons no concreto (LIU *et al.*, 2017). Quando o concreto começa a carbonatar, parte dos cloretos combinados passam a condição de cloretos livres. De acordo com ALONSO *et al.* (1997 *apud* PEREIRA, 2001), a diminuição do pH do concreto decorrente do processo de carbonatação leva à quebra dos cloroaluminatos, o que ocasiona uma liberação de íons cloreto para a solução dos poros, amplificando o potencial agressivo. Nestas circunstâncias, a quantidade de íons cloreto livres pode atingir o limite crítico necessário para o rompimento da camada passivadora da armadura com uma quantidade de cloretos totais mais baixa (TUUTTI, 1982).

Chang (2017) investigou a influência da carbonatação na capacidade de ligação de cloretos, submetendo, para isso, concretos a ambos os processos deletérios, em diferentes ordens de exposição e modos de contato. Constatou-se que após a carbonatação completa, o teor de cloretos ligados, sob as todas as condições, se aproximou de zero já que, nestas condições, o sal de Friedel é decomposto ou não pode ser formado. Logo, a carbonatação provocou, em todos os casos, a completa perda da capacidade de ligação de cloretos pela pasta, não importando se esta ocorreu antes ou após o contato do concreto com os íons cloreto.

Monteiro e Pereira (2015) pesquisaram acerca da capacidade de proteção de alguns tipos de cimentos em relação à corrosão de armaduras induzida por ação conjunta de CO<sub>2</sub> e íons cloreto e constataram que os corpos de prova não carbonatados apresentaram intensidades de corrosão muito menores em relação aos corpos de prova semelhantes carbonatados quando submetidos às mesmas condições de ciclos de molhagem em uma solução de cloreto com a mesma concentração, indicando que a carbonatação representou um fator potencializador.

#### **2.3.4.9 Temperatura**

A temperatura é um importante fator interveniente a ser levado em consideração para a previsão da vida útil de estruturas de concreto armado uma vez que é parte das variáveis envolvidas na taxa de difusão de cloretos no concreto (DOUSTI *et al.*, 2013). Para mais, a temperatura pode afetar a taxa de hidratação de vários tipos de cimento e materiais cimentícios, sendo assim, os seus efeitos carecem de especial atenção para um adequado projeto de durabilidade (GJØRV, 2014).

Variações de temperatura têm um efeito significativo sobre as propriedades de transferência e, particularmente, sobre a cinética de difusão de cloretos, podendo atuar como um catalisador. Sucede-se que a elevação da temperatura acelera a difusão de cloretos em razão do aumento da velocidade molecular e, além disso, pode diminuir a ligação de cloretos devido à maior vibração térmica (TOUIL *et al.*, 2017). A amplificação da mobilidade molecular gerada pelo aumento da temperatura favorece o transporte através da microestrutura do concreto, o que potencializa a penetração de agentes agressivos (FIGUEIREDO, 2005).

Dessa forma, temperaturas mais altas tem efeitos diretos sobre o processo de corrosão, aumentando o teor de cloretos livres na solução dos poros e acelerando a velocidade das reações. Outro relevante aspecto correlacionado, é que o endurecimento inicial do concreto em temperaturas elevadas resulta em estruturas de poros mais grosseiras, tendo, como consequência uma menor resistência à difusão de íons cloreto (NEVILLE, 2015).

De fato, Xu *et al.* (2016) constataram experimentalmente que a elevação da temperatura aumentou parcialmente a liberação de íons cloreto anteriormente ligados, sendo tais alterações também dependentes de outros fatores como o teor total de cloretos no concreto.

Alhozaimy *et al.* (2014) verificaram que o aumento da temperatura transformou as fases de óxido estável do filme passivador das armaduras em óxidos instáveis, desestabilizando-o e potencializando a instauração do processo corrosivo.

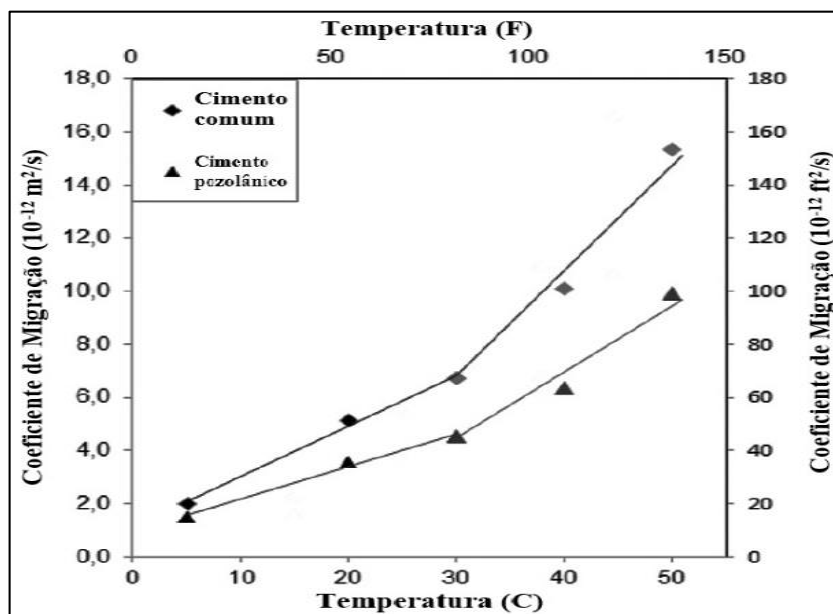


Figura 2.20 - Influência da temperatura no coeficiente de migração de cloretos  
Fonte: Adaptado de TOUIL *et al.*, 2017, pg. 719.

A Figura 2.20 exibe os resultados obtidos em testes realizados por Touil *et al.* (2017), os quais avaliaram a influência da variação da temperatura, entre 5 e 50° C, na difusividade de cloretos em concretos, evidenciando a potencialização do processo deletério com o aumento da temperatura, para os dois tipos de cimentos utilizados.

Dousti *et al.* (2013) atestaram que a exposição à uma maior temperatura resultou em maiores profundidades de penetração e maiores coeficientes de difusão de cloreto nos concretos estudados. Ainda neste âmbito, Liam, Roy e Northwood (1992), constataram que o coeficiente efetivo de difusão de cloretos em concretos praticamente dobra quando a temperatura é aumentada, por exemplo, de 15° C para 30° C.

Do mesmo modo, a Figura 2.21 apresenta os resultados de Al-Khaja (1997 *apud* Figueiredo, 2005), os quais verificaram o aumento da penetração de cloretos à medida que a temperatura de exposição dos concretos aumentou, constatando a relevância deste fator quanto à resistência ao ingresso destes agentes deletérios.

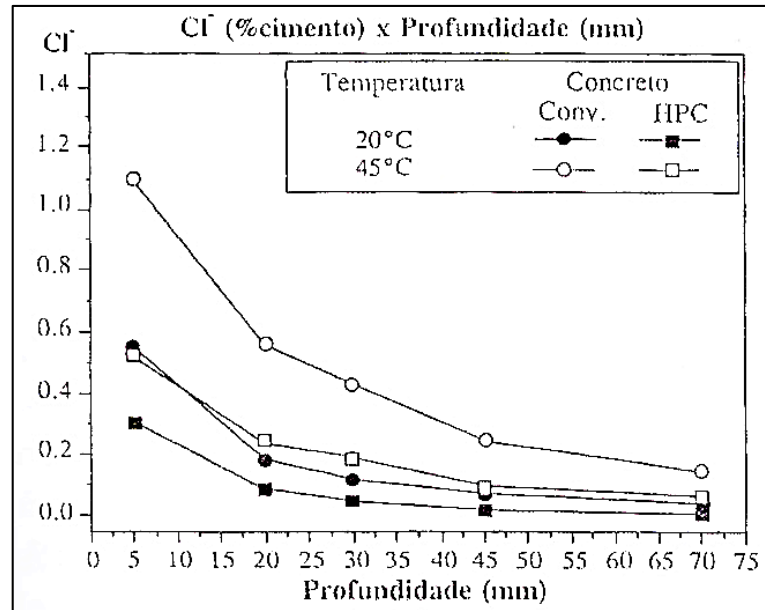


Figura 2.21 - Efeitos da temperatura na penetração de cloretos  
 Fonte: Adaptado de AL-KHAJA, 1997 *apud* FIGUEIREDO, 2005, p. 851.

Meira (2017) ressalta que, efetivamente, o aumento da temperatura contribui para o aumento da velocidade de corrosão em ambientes controlados, nos quais a temperatura não altera as condições de umidade interna do material, entretanto, em condições naturais de exposição, enquanto a temperatura sobe, o concreto pode perder umidade interna e isso faz com que a velocidade de corrosão se reduza.

### 2.3.4.10 Outros fatores relacionados

#### a) Agregados

A permeabilidade do concreto, e por consequência, a facilidade de penetração de íons cloreto nele, sofrem uma influência indireta da dimensão máxima dos agregados tendo em vista que as fissuras geradas na região de interface entre o agregado e a pasta são maiores que os poros capilares da pasta de cimento e que, após algum tempo, as variações que o concreto sofre devido a esforços e temperatura fazem com que as microfissuras se conectem, aumentando a rede de poros e, assim, aumentando a permeabilidade do concreto (SILVA, 2011).

Em concretos com baixa relação água/cimento, a permeabilidade do concreto diminui gradualmente com o aumento do tamanho do agregado gráudo pela redução da fração

volumétrica da zona de transição interfacial. Neste mesmo cenário, um filme de água mais espesso acumula-se em torno de agregados maiores, o que faz com que mais clínquer participe da hidratação e reduza o conteúdo de macroporos no concreto, resultando em uma estrutura de poros mais refinada. Entretanto, quando a relação água/cimento é aumentada, a utilização de agregados muito grandes não contribui com a impermeabilidade do concreto uma vez que a redução da fração volumétrica da zona de transição interfacial é menos significativa em relação ao aumento da porosidade e do conteúdo de macroporos nesta região (KONG e GE, 2015).

## **b) Fissurações**

As fissurações são, geralmente, um fenômeno inevitável nas estruturas de concreto armado quando estes são submetidos a carga mecânica, intemperismo e outros ataques físicos e/ou químicos e, dessa forma, elas acarretam um efeito significativo sobre a difusão de cloretos, pois facilitam o deslocamento destes agentes agressivos através do concreto, sendo a sua intensidade diretamente dependente da densidade, da tortuosidade e da largura das fissuras (WANG *et al.*, 2016).

Quando uma estrutura de concreto está exposta, por exemplo, à água, vapor ou solo contendo cloretos, as regiões fissuradas da mesma são previamente atingidas com a quantidade necessária de cloretos para que inicie o processo de corrosão (FIGUEIREDO, 2005).

Otieno, Beushausen e Alexander (2016) verificaram que em concretos de mesma qualidade, isto é, com o mesmo tipo de aglutinante, relação água/cimento e espessura de revestimento, submetidos ao mesmo ambiente de exposição, o aumento da largura das fissuras representou uma elevação da taxa de corrosão nos concretos analisados, constatando que a variação deste fator foi relevante no desenvolvimento do processo corrosivo.

## **c) Efeito específico do cátion que acompanha o íon cloreto**

O tipo de cátion envolvido no processo de difusão é também um fator que influi na taxa de penetração de cloretos no concreto dado que esta depende da quantidade de cloretos que estão fixados e que, por sua vez, esta condição é afetada pelo tipo de sal que contém os cloretos

(KROPP, 2014). Segundo Pereira (2001), como os íons são carregados eletricamente, durante o processo de difusão há movimentação de outros íons para que a neutralidade elétrica seja mantida e, assim, o cátion que acompanha o íon cloreto pode interferir no processo.

A taxa de difusão cresce, por exemplo, quando a solução fonte de cloretos é alterada entre cloreto de sódio, cloreto de cálcio ou cloreto de magnésio, respectivamente e, portanto, os coeficientes de difusão obtidos em diferentes tipos de solução de sal não são comparáveis (GJØRV *et al.*, 1994; KROPP, 2014).

Song *et al.* (2015) atestaram, ao avaliar a difusividade de cloretos provenientes de diferentes soluções através de concretos, que a capacidade de ligação de cloretos associadas aos quatro principais tipos de cátions decresceu na ordem  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  enquanto os coeficientes de difusão aparente de íons cloreto diminuíram na ordem  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ .

Da mesma maneira, Weerdt *et al.* (2015) verificaram, em estudo com soluções de  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{CaCl}_2$  e  $\text{NaCl}$  a  $20^\circ \text{C}$ , que a capacidade de ligação foi significativamente maior para  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{Ca}^{2+}$  em comparação com  $\text{Na}^+$ . Ocorre que, segundo os autores, há uma relação linear entre o pH da solução de exposição e a capacidade de ligação de íons cloreto e que quando a pasta de cimento é exposta a soluções como  $\text{CaCl}_2$  ou  $\text{MgCl}_2$  são formados compostos como  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ou  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , respectivamente, levando a uma redução do pH do concreto e ao aumento da solubilidade do Ca, ou seja, cátions capazes de formar hidróxidos menos solúveis acabam por reduzir o conteúdo de  $\text{OH}^-$  na solução dos poros, diminuindo assim, a capacidade de fixação de cloretos e facilitando o ingresso no concreto. Neste âmbito, Andrade e Page (1986 *apud* Figueiredo, 2005) apuraram que corpos de prova ensaiados com a solução de  $\text{CaCl}_2$  foram mais afetados pela corrosão do que os submetidos ao  $\text{NaCl}$ , apesar dos primeiros conterem menor quantidade de cloretos livres e menor relação  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$ .

### **2.3.5 Avaliação da resistência do concreto à penetração de cloretos**

Em vista da importância do tema, e com o objetivo de encontrar uma forma que o analise corretamente no menor tempo, muitos pesquisadores têm desenvolvido diferentes métodos para avaliar a capacidade do concreto de impedir com que os íons cloreto atravessem a

camada de cobrimento e alcancem a armadura de aço em teores suficientes para deflagrar o processo corrosivo (SCHNEIDER, 2005).

Otieno, Beushausen e Alexander (2016) advertem que o desempenho de concretos quanto à corrosão sob condições naturais não pode ser inferido a partir de seu desempenho em laboratório sob condições aceleradas, entretanto, testes de laboratório tem sido largamente utilizados para a avaliação dos comportamentos destes quando submetidos à diferentes tipos de exposição com o propósito de aprimorar a seleção de materiais adequados para a concepção das estruturas de concreto.

Assim, a avaliação da penetrabilidade dos íons cloreto no concreto pelos métodos mais recorrentes consiste, geralmente, na medição das profundidades de penetração e/ou concentrações e, em seguida, na determinação dos coeficientes de difusão (efetivo ou aparente) de cloretos no concreto, sendo o princípio destes métodos de avaliação traduzidos no estabelecimento de um gradiente de concentração constante entre duas faces de um corpo de prova, medindo-se as quantidades da espécie em difusão que se transporta de uma face para a outra (OLLIVIER e TORRENTI, 2014).

Com vistas à determinação da melhor maneira de se evidenciar a penetração destes agentes no concreto, Otsuki *et al.* (1992 *apud* Schneider, 2005) realizaram um estudo em materiais cimentícios endurecidos, no qual verificaram a utilização de três diferentes indicadores químicos, a saber: nitrato de prata, nitrato de chumbo e nitrato de tálio. Somente no caso da aspersão do indicador nitrato de prata, a região contendo cloretos foi claramente delimitada pela mudança de cor, o que decorre do fato de que a solução de  $\text{AgNO}_3$ , em presença de luz, reage preferencialmente com os cloretos livres, presentes na região contaminada pelos cloretos, para formar um precipitado branco de cloreto de prata ( $\text{AgCl}$ ) e, na região isenta de cloretos, reage com os íons  $\text{OH}^-$  formando um precipitado marrom de óxido de prata ( $\text{Ag}_2\text{O}$ ), sendo, dessa forma, as regiões claramente evidenciadas na face do concreto.

Segundo estudos de Kim, Yang e Yi (2013) qualquer concentração maior que 0,05 N de  $\text{AgNO}_3$  é útil na avaliação da penetração de cloretos, entretanto, a concentração de 0,1 N é aquela na qual a quantidade de cloretos livres, na fronteira de mudança de cor, é semelhante ao valor crítico de cloretos no qual a corrosão se inicia e, em razão disso, essa concentração tem sido utilizada nos principais testes de avaliação da penetrabilidade.

Elfmarkova, Spiesz e Brouwers (2015) compararam os perfis de concentração total de cloretos medidos no concreto após a realização de ensaios acelerados de migração com os resultados das avaliações por testes colorimétricos e verificaram uma boa confiabilidade e precisão da técnica colorimétrica com utilização de nitrato de prata para a determinação da frente de penetração de cloretos em concretos com diferentes tipos de aglutinantes.

A evidenciação das profundidades de penetração no concreto visa, na maior parte dos casos, a determinação dos valores dos coeficientes de difusão de cloretos, sendo estes de primordial importância na determinação da vida útil das estruturas de concreto expostas à ambientes agressivos (LIU, PRESUEL-MORENO e PAREDES, 2015).

Neste sentido, os ensaios de difusão simples permitem o cálculo do coeficiente de difusão efetivo e consideram o fluxo em regime permanente, aplicando-se a primeira lei de Fick, tratando-se, porém, de uma simplificação do processo real. De outro modo, há ensaios que permitem a determinação do coeficiente de difusão aparente, aplicando-se a segunda lei de Fick, sendo nesse caso, realizados em situação de regime não permanente (OLLIVIER e TORRENTI, 2014).

Nilsson *et al.* (1998) *apud* Gjörv (2014) realizaram ensaios acelerados de migração de cloretos em concretos e propuseram uma classificação para a resistência à penetração de cloretos em função dos valores do coeficiente de difusão de cloretos aos 28 dias para diferentes tipos de cimento, a qual está apresentada no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 - Classificação da resistência à penetração de cloretos em função dos coeficientes de difusão obtidos por meio de ensaios acelerados de migração aos 28 dias

<b>Coeficiente de Difusão <math>D_{28}</math> (<math>\times 10^{-12}</math> m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>Resistência à penetração de cloretos</b>
$D \geq 15$	Baixa
$10 < D < 15$	Moderada
$5 \leq D \leq 10$	Alta
$2,5 < D \leq 10$	Muito alta
$D < 2,5$	Extremamente alta

Fonte: Adaptado de NILSSON *et al.*, 1998 *apud* GJØRV, 2014, pg. 114.

Como ainda não existem, no Brasil, normas técnicas que padronizem esses métodos de avaliação da penetração de cloretos, têm-se utilizado usualmente os métodos de ensaio recomendados por normas internacionais. Dessa forma, são apresentados, na sequência desta seção, alguns dos mais difundidos métodos de ensaio para avaliação da penetrabilidade de íons cloreto em concretos.

### 2.3.5.1 Ensaios de longa duração

#### a) AASHTO T259

A norma americana T259 (AASHTO, 2017) propõe um método de ensaio para avaliar a resistência de concreto à penetração de íons cloreto, em regime não estacionário, no qual placas com espessura mínima de 75 mm e área superficial de 300 mm<sup>2</sup> são, após a cura, armazenadas em ambiente seco por 28 dias. Decorrido este período e, com as faces laterais impermeabilizadas, a face superior da placa entra em contato com uma solução de 3 % de NaCl por 90 dias enquanto a face inferior é mantida em contato com um ambiente seco (umidade relativa de 50 %), conforme ilustra a Figura 2.22. A concentração de cloretos é então determinada progressivamente a cada 0,5 polegadas (SCHNEIDER, 2005).

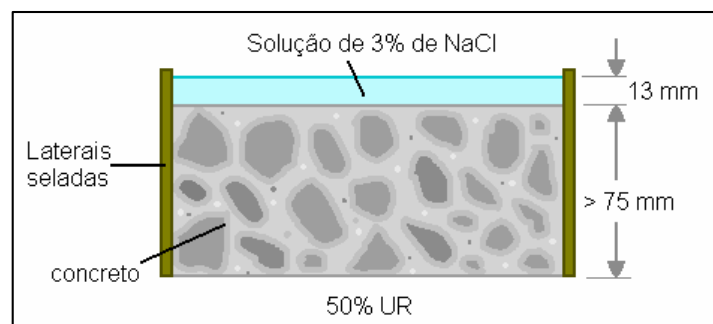


Figura 2.22 - Esquema de ensaio proposto pela norma AASHTO T259  
Fonte: SCHNEIDER, 2005, p. 30.

A concentração de cloretos é obtida por meio colorimétrico pela aspersão de nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ ) ou também por meio de um espectrômetro, para que seja traçado o perfil de cloretos da amostra estudada, a partir do qual a 2ª Lei de Fick é aplicada para a determinação do coeficiente de difusão de cloretos (OLIVEIRA, 2018).

Todavia, as avaliações obtidas neste método de ensaio tem, de acordo com Stanish *et al.* (1997), algumas imperfeições tais como o fato de que somente a média a cada 0,5 polegada é verificada, o que resulta em uma informação muito grosseira acerca do perfil de penetração. Ademais, além do mecanismo de difusão, ocorre uma inicial absorção capilar e uma transmissão de vapor da superfície úmida para a superfície em contato com o ambiente seco, o que tende a acelerar a penetração de cloretos na amostra analisada.

A norma portuguesa E 390 (LNEC, 1993) proposta pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil, adota este mesmo procedimento de ensaio para avaliação da resistência à penetração de cloretos no concreto.

#### b) NT BUILD 443

O procedimento de ensaio normatizado pela NT BUILD 443 (NORDTEST, 1995) baseia-se na segunda Lei de Fick e consiste na imersão da amostra de concreto, previamente saturada em água, em uma solução de cloreto de sódio por um período que pode variar de 35 a 120 dias, dependendo da qualidade do concreto.

Em comparação ao procedimento da norma T259 (AASHTO, 2017), a principal diferença consiste na condição de umidade da amostra de concreto, que ao invés de serem secas por 28 dias, são saturadas para prevenir qualquer absorção inicial e, então, somente uma das faces da amostra não é impermeabilizada, a qual é exposta a uma solução de 2,8 M de NaCl, conforme exhibe o esquema apresentado pela Figura 2.23. Decorrido o tempo de exposição previsto, a amostra é separada em finas camadas, paralelamente à superfície exposta, nas quais são diretamente medidas o teor de cloretos correspondente a cada uma delas.

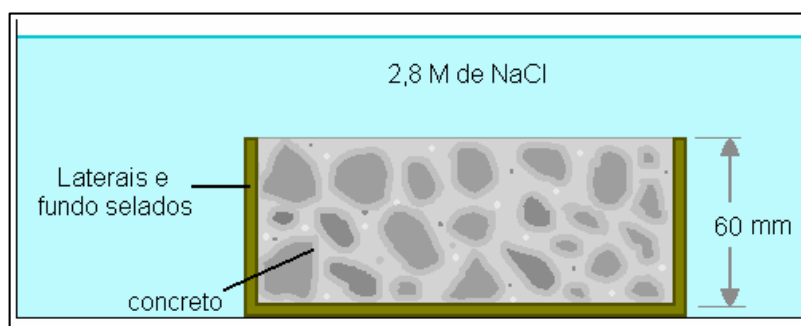


Figura 2.23 - Esquema de ensaio proposto pela norma NT BUILD 443  
Fonte: SCHNEIDER, 2005, p. 31.

Com isso, o coeficiente efetivo de difusão aparente de cloreto no concreto é calculado por meio da correlação entre os valores de profundidade de penetração medidos abaixo da superfície exposta, na condição inicial, e os teores de cloretos medidos para cada uma das camadas obtidas na amostra de concreto.

### **2.3.5.2 Ensaios acelerados por campo elétrico externo**

Os cloretos podem penetrar no concreto por um mecanismo puro de difusão quando há saturação dos poros, contudo, esta situação não é a de maior ocorrência e, em condições normais de exposição, o processo pode ser bastante demorado, podendo durar meses ou até anos. Deste modo, tem sido usual a utilização de ensaios de difusão por migração, isto é, ensaios acelerados pela aplicação de uma voltagem elétrica constante (SILVA, 2011).

Elfmarkova, Spiesz e Brouwers (2015) constataram uma boa correlação linear entre os coeficientes de difusão de cloretos obtidos em testes de longo prazo e de difusão acelerada por campo elétrico externo.

A avaliação da penetrabilidade de cloretos no concreto por meio destes ensaios baseia-se, geralmente, em um princípio eletroquímico, no qual uma fatia de concreto é colocada entre duas câmaras ou células, uma contendo cloretos e outra não, sendo aplicada entre elas uma diferença de potencial, o qual gera uma corrente que induz o deslocamento dos ânions, sob ação de um campo elétrico, através da amostra. Dessa forma, a quantidade equivalente de íons e/ou massa de ânions que as atravessam durante o período de ensaio pode ser determinada por meio da correlação entre o tempo de exposição e a corrente elétrica passante através das amostras de concreto (HELENE, 1993).

Nestes ensaios acelerados, o fluxo de cloretos por difusão pode ser negligenciado uma vez que o transporte de cloretos é, neste caso, dominado pela migração eletricamente forçada (SPIESZ e BROUWERS, 2013). Ocorre que a aplicação de um campo elétrico externo não acelera o mecanismo de difusão dos íons cloreto, mas os induz ao mecanismo único de migração iônica, sendo o aumento da velocidade de penetração de íons cloreto via migração da ordem de 100 vezes, o que permite negligenciar o transporte por difusão (STREICHER e ALEXANDER, 1995).

### a) NT BUILD 492

A norma finlandesa NT BUILD 492 (NORDTEST, 1999) descreve um procedimento de ensaio acelerado de migração de cloretos, em estado não-estacionário, com emprego de um campo elétrico constante e, usualmente, com a duração de apenas 24 horas.

A etapa de pré-condicionamento das amostras envolve a aplicação de uma pressão absoluta da ordem de 10-50 mbar (1-5 kPa) sobre as amostras de concreto por três horas até que a câmara seja preenchida com uma solução de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , sendo, a partir deste momento, mantida a condição de vácuo por mais uma hora. Após a supressão da pressão de vácuo, as amostras são mantidas submersas na solução por um período de  $(18 \pm 2)$  horas.

O procedimento de ensaio, inicialmente proposto por Tang e Nilsson (1992), é realizado com a utilização de cilindros com 100 mm de diâmetro e 50 mm de espessura, os quais são, após a etapa de pré-condicionamento, posicionados entre uma solução com 10%, em massa, de cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ ), utilizada como solução catódica, e uma solução com 0,3 N de hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ), utilizada como solução anódica, sendo mantida, durante todo o período do ensaio, uma diferença de potencial elétrico entre as duas faces das amostras, conforme esquema apresentado na Figura 2.24 (OLIVEIRA, 2018).

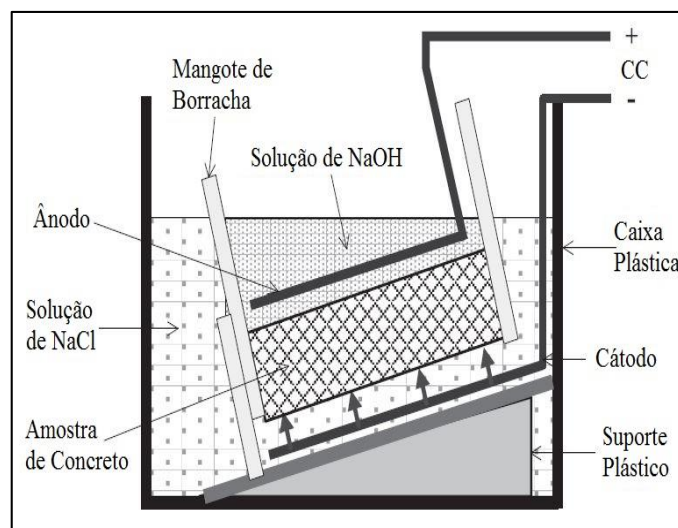


Figura 2.24 - Esquema proposto pela norma NT BUILD 492  
 Fonte: Adaptado de WANG *et al.*, 2016, pg. 218.

A diferença de potencial elétrico efetivamente utilizada durante o ensaio é determinada com base na medida das correntes que atravessam as amostras quando uma voltagem de 30 V é

previamente aplicada, sendo definida de maneira que, ao final do ensaio, a frente de penetração de cloretos não atinja a face de saída do corpo de prova.

Decorrido o período de duração previsto, as amostras são rompidas axialmente e uma solução de nitrato de prata é pulverizada em uma das seções recém-divididas para evidenciação das profundidades de penetração por processo colorimétrico. Os coeficientes de migração de cloretos são obtidos por meio de fórmula empírica baseada na 2ª Lei de Fick (Equação 3.9).

Este método de ensaio é sugerido por alguns pesquisadores como o mais adequado entre os ensaios acelerados de migração de cloretos com base em sua simplicidade, curta duração e pela base teórica clara e, em razão disso, foi utilizado nas avaliações das resistências à penetração de íons cloreto dos concretos produzidos na presente pesquisa. O procedimento experimental recomendado pela referida norma está detalhadamente apresentado na seção 3.3.6 deste trabalho.

#### **b) ASTM C 1202**

O procedimento de ensaio recomendado pela norma C 1202 (ASTM, 2019) é um dos mais difundidos para a avaliação da resistência de concreto à penetração de cloretos. Por meio deste, pode-se determinar a condutância elétrica representada pela carga total de coulombs que, durante um determinado intervalo de tempo, passa através de uma fatia de concreto posicionadas entre duas soluções sob uma diferença de potencial elétrico igual a 60V, em corrente contínua, a qual induz os íons cloreto a atravessá-la.

Neste ensaio, o mecanismo preponderante é a migração iônica tendo em vista que a elevada tensão permite desprezar as forças de difusão e a absorção inexistente em função da saturação do concreto (SCHNEIDER, 2005).

As amostras de concreto utilizadas no ensaio, com dimensões de 100 mm de diâmetro e espessura de 51 mm, são previamente colocadas em uma câmara com bomba à vácuo, na qual são mantidas por três horas sob uma pressão de 6650 Pa (66,5 mbar). Ainda sob a pressão de vácuo, a câmara é preenchida com água até que as amostras fiquem totalmente cobertas, permanecendo nesta condição por mais 1 hora. Após a supressão da pressão, as amostras são

mantidas submersas em água por um período de  $(18 \pm 2)$  horas, enxutas e mantidas em umidade relativa de 95% para o início do ensaio.

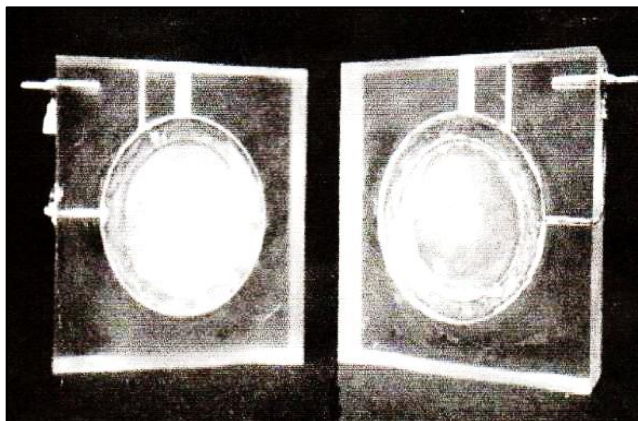


Figura 2.25 - Esquema de ensaio proposto pela norma C1202  
Fonte: ASTM, 2017, p. 3.

Com isso, as amostras são colocadas entre as meia-células do aparato de ensaio, apresentado na Figura 2.25, nas quais a face superior permanece em contato com solução 3% de cloreto de sódio (NaCl) e a face inferior com uma solução 0,3 N de hidróxido de sódio (NaOH). A diferença de potencial de  $(60 \pm 1)$  V é mantida durante período de 6 horas enquanto o monitoramento da corrente é realizado em intervalos de 30 minutos (OLIVEIRA, 2018).

A carga total passante pelas amostras, em coulombs, é determinada por meio de uma fórmula que considera as correntes medidas em diferentes períodos do ensaio, e então, com esse valor é possível fazer a classificação da resistência do concreto quanto à penetrabilidade de cloreto, conforme classificação, proposta pela própria norma, apresentada no Quadro 2.4.

Quadro 2.4 - Penetrabilidade de íons cloreto de acordo com a carga elétrica passante

<b>Carga passante (coulombs)</b>	<b>Penetrabilidade de íons cloreto</b>
$\geq 4000$	Alta
2000-4000	Moderada
1000-2000	Baixa
100-1000	Muito baixa
$\leq 100$	Insignificante

Fonte: Adaptado de ASTM C1202, 2017, p. 2.

Todavia, este método de ensaio apresenta algumas desvantagens e, em função disso, recebe críticas por parte de alguns pesquisadores. Shi (2004), por meio de uma revisão de resultados publicados, constatou que alguns fatores que pouco contribuem no transporte de íons cloreto pelo concreto, como a química da solução de poros, tem grande influência na condutividade elétrica do concreto, parâmetro este medido pelo ensaio proposto pela C1202 (ASTM, 2019), entretanto, o mesmo ressalta que este tipo de avaliação pode ser usada como um indicador de qualidade para concretos com os mesmos componentes e proporções de mistura.

Andrade (1993) considera que a produção de calor, oriundo da elevada voltagem elétrica utilizada (60 V), é um fator de erro do ensaio uma vez que, dessa forma, ensaios de concretos bastante porosos tendem, em função da elevação da temperatura, a aumentar ainda mais a carga elétrica passante quando comparados com concretos menos porosos. Apesar disso, este ensaio é uma forma rápida de avaliar a qualidade do concreto, sendo bastante difundido em vários centros de pesquisa.

Segundo Neville (2015), o ensaio pode ser útil para comparação e escolha do concreto mais adequado. Segundo Isaia (1995), o ensaio apresenta a vantagem de ser aplicado a quase todos os tipos de concretos, principalmente quando se deseja comparar resultados em relação a outro concreto de referência.

### **c) AASHTO T 277**

O método de ensaio recomendado pela T 277-83 (AASHTO, 2015) é um teste rápido de avaliação da resistência de concretos ao ingresso de cloretos, sendo o precursor do método proposto pela norma C1202 (ASTM, 2019), apresentado no item anterior.

O procedimento consiste em posicionar um corpo de prova de aproximadamente 50 mm de espessura entre dois recipientes, sendo um deles contenedor de uma solução de cloreto de sódio, com uma concentração de 3% e o outro de uma solução de hidróxido de sódio com concentração de 0,1 M, sendo aplicada, entre as faces, uma voltagem elétrica de 60 V e medidas a correntes passantes a cada 30 minutos durante um período de 6 horas, associando-se esse valor à resistência do concreto à penetração de íons cloretos (PEREIRA, 2001).

Como exposto, este método vem sendo criticado pelo fato de se elevar a temperatura devido à geração de calor proveniente da alta voltagem aplicada, provocando um aquecimento das soluções e do corpo de prova por efeito Joule, o que modifica a velocidade do fluxo dos íons, assim como pelo fato de não se distinguir o fluxo de cloretos das demais reações que ocorrem simultaneamente.

#### **d) ASTM C 1556**

O procedimento de ensaio sugerido pela norma C 1556 (ASTM, 2016) permite a determinação do coeficiente de difusão aparente de uma matriz cimentícia endurecida por meio da determinação da profundidade de penetração e do teor de íons cloreto em diferentes camadas de um corpo de prova saturado e exposto, primeiramente, em solução de hidróxido de cálcio, e logo após, em uma solução de cloreto de sódio. Os teores de íons cloreto finais são correlacionados ao teor inicial obtido em uma amostra de referência, no início do ensaio, para determinação do coeficiente de difusão aparente de íons cloreto no concreto.

#### **e) LNEC 463**

O procedimento de ensaio recomendado pela norma portuguesa E 463 (LNEC, 2004) possibilita a determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por migração, em regime não estacionário, com aplicação de voltagem elétrica constante, sendo este similar ao método de ensaio prescrito pela NT BUILD 492 (NORDTEST, 1999).

Neste ensaio, as amostras são previamente saturadas numa solução de  $\text{Ca(OH)}_2$  sob condições de vácuo e armazenadas nesta solução durante  $18 \pm 2$  horas. Posteriormente, as amostras são posicionadas em um aparato de ensaio, o qual utiliza uma solução catódica a 10 % em massa de NaCl em água. A duração do ensaio e voltagens elétricas aplicadas são determinadas com base na voltagem inicial pré-estabelecida em 30 V.

Após este período, as amostras são cortadas de forma perpendicular à direção da penetração dos agentes agressores e aspergidas com uma solução de  $\text{AgNO}_3$  (0,1 M) a fim de evidenciar a profundidade de penetração dos cloretos, sendo o coeficiente de difusão de íons cloreto determinado por meio de uma fórmula empírica.

## **f) ISO 1920**

O ensaio para determinação da resistência de concretos à penetração de íons cloreto padronizado pela norma 1920-11 (ISO, 2013) considera a difusão em fluxo unidirecional em estado não-estacionário.

Neste ensaio, o corpo de prova, que pode ser cilíndrico ou cúbico, é curado por 28 dias e dividido em duas partes, originando uma amostra controle, na qual é determinado o teor inicial de cloretos após moagem, e uma segunda amostra, a qual é saturada sob vácuo com água destilada e exposta a uma solução de cloreto de sódio (NaCl) a 3 % em massa por um período de 90 dias, sendo a concentração da solução mantida constante durante o ensaio.

O teor de cloretos é avaliado em diferentes profundidades da amostra e o coeficiente de difusão é determinado por meio de uma regressão não-linear dos resultados obtidos para cada uma das medições realizadas.

### **2.3.5.3 Resistividade elétrica do concreto**

Métodos tradicionais, como os testes de difusão em massa e de migração de cloretos, utilizados para determinar os coeficientes de difusão geralmente consomem muito tempo e mão-de-obra e, assim, o método de medição da resistividade elétrica foi desenvolvido como um método não destrutivo capaz de avaliar a permeabilidade das amostras de concreto à penetração de cloreto (LIU, PRESUEL-MORENO e PAREDES, 2015).

A medição da resistividade elétrica do concreto permite avaliar o contexto eletrolítico no qual está inserida a armadura, sendo que um concreto de baixa resistividade elétrica constitui um eletrólito favorável à ocorrência de corrosão, enquanto um concreto muito resistivo opõe-se ao estabelecimento das correntes iônicas, limitando, assim, a cinética da corrosão (BARONGHEL-BOUNY, CAPRA e LAURENS, 2014).

A técnica mais difundida de medição da resistividade superficial do concreto emprega quatro eletrodos e é conhecida como técnica de Wenner ou técnica das quatro pontas, a qual consiste na aplicação de uma corrente elétrica alternada entre os eletrodos externos, a uma frequência

entre 100 e 1000 Hz, e na medição da diferença de potencial entre os eletrodos internos (MEIRA, 2017), como mostra o esquema apresentado na Figura 2.26.

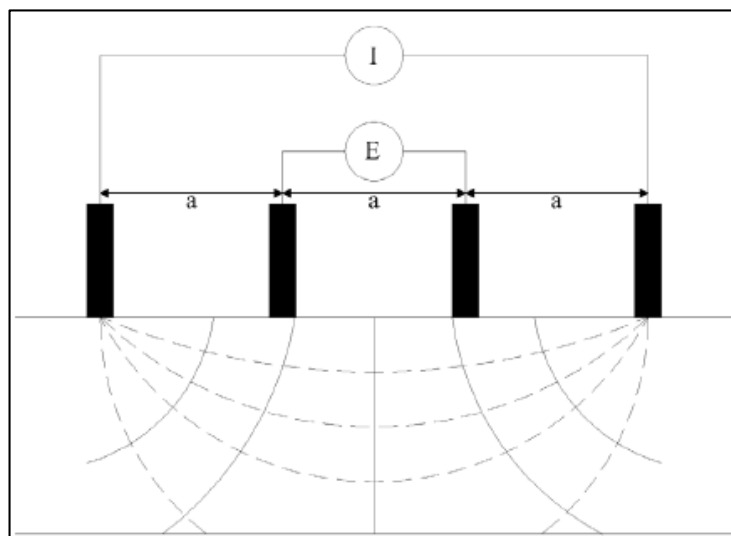


Figura 2.26 - Esquema da técnica de Wenner para medição da resistividade elétrica do concreto

Fonte: MEIRA, 2017, pg. 82.

O Quadro 2.5 apresenta uma correlação entre os resultados de resistividade superficial do concreto obtidos por meio da técnica e o risco de corrosão das armaduras embutidas neste.

Quadro 2.5 - Correlação entre a resistividade elétrica superficial e o risco de corrosão

Resistividade elétrica superficial ( $k\Omega \cdot cm$ )	Risco de corrosão das armaduras
$\geq 100$	insignificante
50-100	baixo
10-50	moderado a elevado
$\leq 10$	a resistividade não controla o processo de corrosão

Fonte: Adaptado de CIGNA *et al.*, 2003 *apud* MEIRA, 2017, pg. 83.

Segundo Liu, Presuel-Moreno e Paredes (2015), os resultados experimentais indicam que a resistividade elétrica está bem correlacionada aos coeficientes de difusão de cloretos. Do mesmo modo, Yildirim, Ilica e Sengul (2011) verificaram ser evidente a forte relação entre a

resistividade elétrica do concreto e os resultados dos testes rápidos de penetração de íons cloreto.

Sendo assim, tem sido recorrente a utilização destes testes para avaliação da durabilidade dos concretos, correlacionando-os com os testes de avaliação da resistência à cloretos, e em razão disso, a técnica de medição da resistividade elétrica superficial do concreto foi adotada para o plano experimental deste trabalho.

# 3

## MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados e descritos os materiais e métodos utilizados no presente trabalho. São apontados, dentre outras importantes informações, os parâmetros e procedimentos adotados, as caracterizações físico-química dos materiais, as variáveis analisadas, bem como os métodos de ensaio utilizados na pesquisa.

### 3.1 Materiais utilizados

Para a realização deste estudo foram confeccionados 174 corpos de prova cilíndricos de concreto nas dimensões de (10 x 20) cm.

Os concretos foram produzidos com a utilização de cimentos Portland especiais (aglomerantes), areia de origem natural lavada de granulação média (agregado miúdo), pedra britada tipo 1 (agregado graúdo) e água potável.

#### 3.1.1 Aglomerantes

Os cimentos Portland especiais utilizados neste trabalho foram fornecidos pela InterCement - Camargo Correa Cimentos S/A, provenientes da fábrica instalada na cidade de Pedro Leopoldo/MG, sendo estes extraordinariamente produzidos em três diferentes formulações, a saber, com três diferentes teores de substituição parcial (0, 30 e 60%) de clínquer por escória granulada de alto-forno de modo a possibilitar a avaliação da influência desta adição mineral no comportamento mecânico e de durabilidade dos concretos produzidos. Os cimentos Portland especiais utilizados neste estudo foram identificados de acordo com nomenclatura proposta pela Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Nomenclaturas adotadas para os cimentos Portland

Nomenclatura do cimento	Percentual de escória de alto-forno (% em massa)
CP00	0
CP30	30
CP60	60

A caracterização química do clínquer utilizado na fabricação dos cimentos Portland está apresentada na Tabela 3.2. Da mesma forma, a Tabela 3.3 apresenta a caracterização química dos demais insumos utilizados.

Tabela 3.2 - Análise química (DRX) do clínquer utilizado na fabricação dos cimentos (%)

Substância	(%)	Substância	(%)
C <sub>3</sub> S	67,34	Langbeinite [K <sub>2</sub> Mg <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ]	0,24
C <sub>2</sub> S	13,27	Aphthitalite [(K,Na) <sub>3</sub> Na(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ]	0,22
C <sub>4</sub> AF	11,01	Periclásio (MgO)	0,08
C <sub>3</sub> A	6,05	Quartzo (SiO <sub>2</sub> )	0,07
Cal livre	1,08	Portlandita [Ca(OH) <sub>2</sub> ]	0,06
Arcanite (K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	0,62		

Fonte: Assessoria técnica da InterCement Cimentos

Tabela 3.3 - Análise química do insumos utilizados na fabricação dos cimentos Portland (%)

Composto	Escória	Clínquer	Calcário	Gesso	Composto	Escória	Clínquer	Calcário	Gesso
CaO	43,52	65,40	53,91		S	0,39			
SiO <sub>2</sub>	36,86	21,23	1,12		TiO <sub>2</sub>	0,35			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,65	4,52	0,57		Na <sub>2</sub> O	0,12			
MgO	7,06	2,76	0,10		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		2,43	0,33	
MnO	0,87				CaO		1,57		
K <sub>2</sub> O	0,43	0,79	0,09		SO <sub>3</sub>		1,08		43,21
FeO	0,42				Na <sub>2</sub> O		0,21		

Fonte: Assessoria técnica da InterCement Cimentos

As propriedades químicas e físicas dos cimentos Portland utilizados estão apresentadas nas Tabelas 3.4 e 3.5.

Tabela 3.4 - Propriedades químicas do cimentos Portland utilizados

Propriedade	Norma utilizada	CP00 (%)	CP30 (%)	CP60 (%)
Óxido de cálcio (CaO)		63,93	53,78	46,66
Óxido de silício (SiO <sub>2</sub> )		22,3	29,21	33,82
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		5,81	7,73	9,36
Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )	NBR 14656 (ABNT, 2001)	3,77	2,51	1,74
Óxido de magnésio (MgO)		2,83	2,92	3,67
Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		2,01	2,84	2,97
Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)		0,73	0,91	0,92
Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)		0,08	0,07	0,10
Resíduo insolúvel (RI)	NBR NM 15 (ABNT,2012)	0,86	0,79	0,65
Perda ao fogo (PF)	NBR NM 18 (ABNT, 2012)	4,5	3,18	3,17

Fonte: Relatório de ensaios fornecido pela assessoria técnica da InterCement (10/01/18 a 18/04/18)

Tabela 3.5 - Propriedades físicas dos cimentos Portland utilizados

Propriedade	Norma utilizada	Unidade	CP00	CP30	CP60	
Finura Blaine	NBR NM 16372 (ABNT, 1998)	cm <sup>2</sup> /g	5170	3992	3487	
Massa Específica	NBR 16605 (ABNT, 2017)	g/cm <sup>3</sup>	3,09	3,07	2,99	
Tempo de início de pega	NBR NM 65 (ABNT, 2003)	min	140	110	180	
Tempo de fim de pega		min	200	170	240	
Resíduo # 200 (75 µm)	IT InterCement	%	0,16	0,4	0,53	
Resíduo # 325 (44 µm)		%	2,05	4,09	5,6	
		MPa	26,0	13,5	5,1	
Resistência à compressão	ABNT NBR 7215:1996	3 dias	MPa	34,2	37,9	15,6
		7 dias	MPa	43,1	30,0	20,1
		28 dias	MPa	51,1	45,9	41,2

Fonte: Relatório de ensaios fornecido pela assessoria técnica da InterCement (10/01/18 a 18/04/18)

As caracterizações granulométricas dos cimentos Portland especiais utilizados foram avaliadas por meio de um equipamento analisador de tamanho de partículas a laser, sendo os resultados obtidos apresentados nas Figuras 3.1 a 3.3 e na Tabela 3.6.

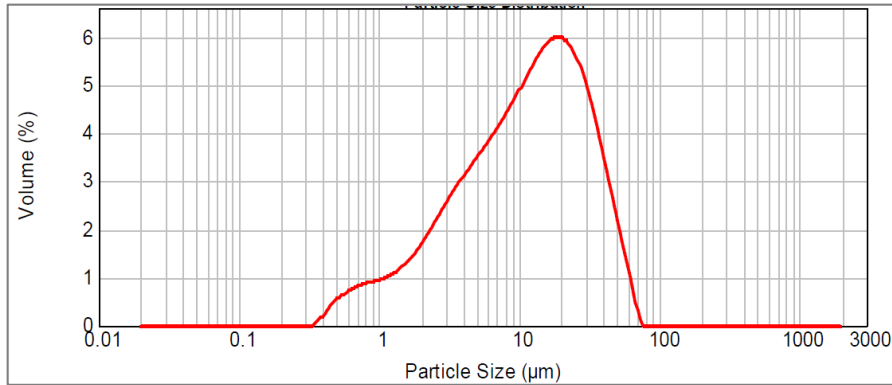


Figura 3.1 - Distribuição granulométrica a laser do cimento CP00  
Fonte: Relatório de ensaios fornecido pela assessoria técnica da InterCement

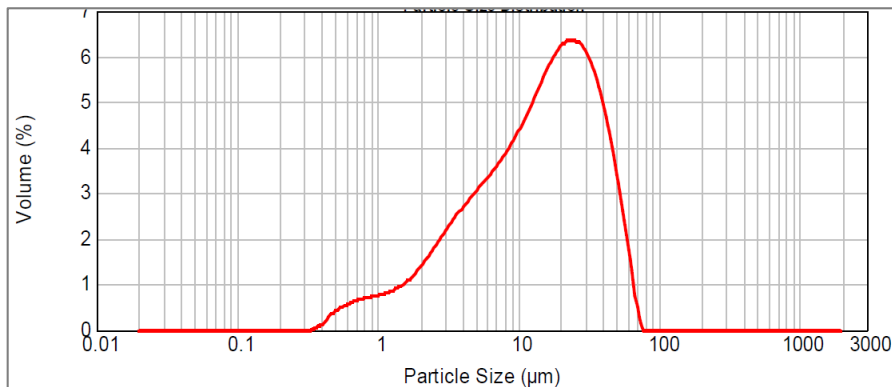


Figura 3.2 - Distribuição granulométrica a laser do cimento CP30  
Fonte: Relatório de ensaios fornecido pela assessoria técnica da InterCement

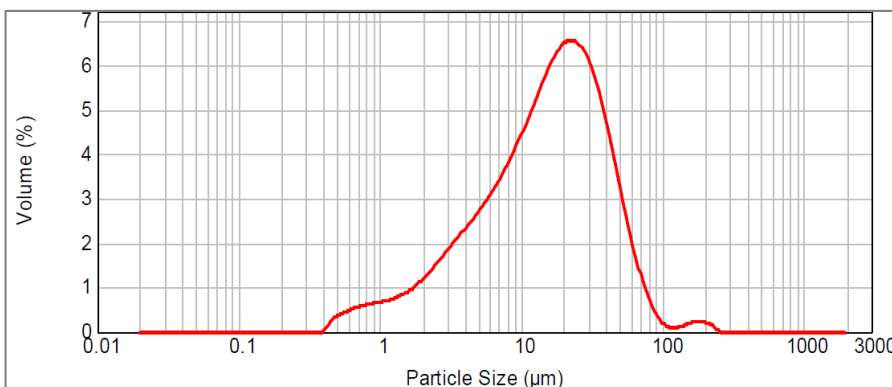


Figura 3.3 - Distribuição granulométrica a laser do cimento CP60  
Fonte: Relatório de ensaios fornecido pela assessoria técnica da InterCement

Tabela 3.6 - Dados da granulometria dos cimentos utilizados

<b>Cimento</b>	<b>D<sub>10</sub> (µm)</b>	<b>D<sub>50</sub> (µm)</b>	<b>D<sub>90</sub> (µm)</b>
CP00	2,021	11,804	35,606
CP30	2,475	14,675	41,015
CP60	2,829	15,931	44,752

Fonte: Relatório da assessoria técnica da InterCement

Os cimentos utilizados foram também caracterizados por meio de análise termogravimétrica (TGA), na qual se monitora a variação da massa das amostras em função da temperatura em um ambiente com condições controladas. Os resultados desta análise apontados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Resultados das análises de termogravimetria (TGA) realizada nos cimentos

<b>Propriedade (%)</b>	<b>CP00</b>	<b>CP30</b>	<b>CP60</b>	<b>Transformação</b>
Umidade	0,12	0,19	0,31	
PF 250° C	0,42	0,43	0,44	liberação da água livre e transformação da gipsita em hemidrato
PF 500° C	0,71	0,23	0,27	transformação do hemidrato em anidrita
PF 950° C	2,21	1,92	1,58	desidratação da anidrita
PF Total	3,34	2,58	2,28	

Fonte: Relatório de ensaios fornecido pela InterCement Cimentos

### 3.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado nos ensaios do presente trabalho é de origem natural e foi fornecido pela mineração Montreal localizada na cidade de Betim/MG. A Tabela 3.8 apresenta as principais características físicas do material.

A distribuição granulométrica do material foi obtida de acordo com as recomendações da NBR 7211 (ABNT, 2009) para a determinação da composição granulométrica de agregados

miúdos para concreto. Após o devido quarteamento do material, uma amostra de 1000 g foi selecionada e peneirada, sendo pesada a fração retida em cada peneira. A Tabela 3.9 e a Figura 3.4 apresentam os resultados obtidos, os quais equivalem à média aritmética de duas determinações realizadas para o mesmo material.

Tabela 3.8 - Propriedades físicas do agregado miúdo utilizado

<b>Propriedade - Unidade</b>	<b>Norma Utilizada</b>	<b>Valor obtido</b>
Massa específica real - g/cm <sup>3</sup>	NBR NM 52 (ABNT, 2009)	2,66
Massa unitária solta - g/cm <sup>3</sup>	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1,43
Massa unitária compactada - g/cm <sup>3</sup>		1,68
Teor de materiais pulverulentos - %	NBR NM 46 (ABNT, 2003)	1,61

Fonte: Relatório de ensaio fornecido pela Viatest/Laborloc de 23/05/2018

Tabela 3.9 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo

<b>Abertura da peneira (mm)</b>	<b>Material retido (g)</b>	<b>Material retido acumulado (%)</b>
9,5	1,89	0,2
6,3	4,67	0,7
4,8	1,69	0,8
2,4	24,02	3,2
1,2	101,74	13,4
0,6	460,43	59,6
0,3	289,20	88,5
0,15	85,15	97,1
0,075	17,74	98,9
Fundo	11,43	100,0
Dimensão máxima característica (mm)		2,4
Módulo de Finura (MF)		2,63

Fonte: Relatório de ensaio da Viatest/Laborloc de 23/05/2018.

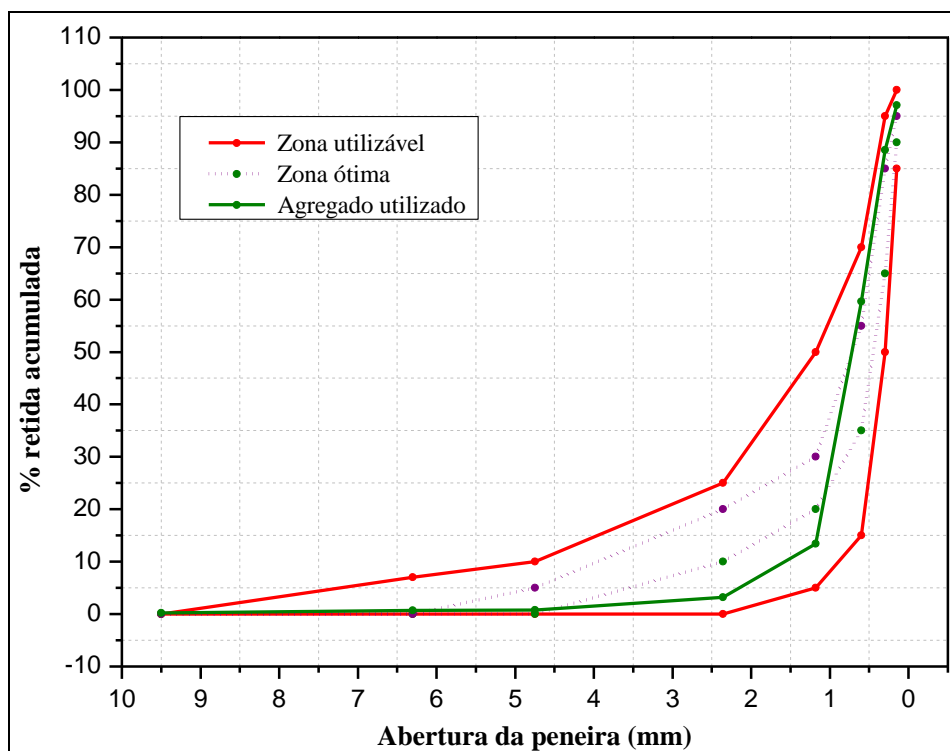


Figura 3.4 - Curva granulométrica do agregado miúdo utilizado

Fonte: Relatório de ensaio fornecido pela Viatest/Laborloc de 23/05/2018

A dimensão máxima característica do agregado correspondente à abertura nominal da malha da peneira, em milímetros, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa, sendo para o material caracterizado igual a 2,4 mm. O módulo de finura do agregado, obtido pela soma das porcentagens retidas acumuladas em massa do agregado nas peneiras de série normal dividido por 100, foi determinado para o agregado miúdo utilizado igual a 2,63.

### 3.1.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado é oriundo de britagem de rocha do tipo gnaiss, tendo sido processada pela Mineração Santiago localizada na região metropolitana de Belo Horizonte/MG. A Tabela 3.10 apresenta as principais características físicas do material.

A análise da distribuição granulométrica do agregado graúdo foi realizada de acordo com o procedimento recomendado pela NBR 7211 (ABNT, 2009). Após o devido quarteamento do material, uma amostra de 3000 g foi selecionada e peneirada, sendo pesada a fração retida em

cada uma das peneiras. A Tabela 3.11 e a Figura 3.5 apresentam os resultados obtidos, os quais equivalem à média aritmética de duas determinações realizadas para o mesmo material.

Tabela 3.10 - Propriedades físicas do agregado graúdo utilizado

<b>Propriedade - Unidade</b>	<b>Norma Utilizada</b>	<b>Valor obtido</b>
Massa específica do agregado seco - g/cm <sup>3</sup>		2,54
Massa específica do agregado saturado superfície seca - g/cm <sup>3</sup>	NBR NM 53 (ABNT, 2009)	2,53
Massa específica aparente - g/cm <sup>3</sup>		2,52
Absorção de água - %		0,40
Massa Unitária Compactada - g/cm <sup>3</sup>	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1,57
Massa Unitária Solta - g/cm <sup>3</sup>		1,39
Teor de Materiais Pulverulentos - %	NBR NM 46 (ABNT, 2003)	0,30

Fonte: Relatório de ensaio fornecido pela Viatest/Laborloc. Realizado em 04/06/2018.

Tabela 3.11 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo

<b>Abertura da peneira (mm)</b>	<b>Material retido (g)</b>	<b>Material retido acumulado (%)</b>
19,0	72,14	2,4
12,5	1532,57	53,1
9,5	852,89	81,4
6,3	384,24	94,1
4,8	53,82	95,9
2,4	46,96	97,5
Fundo	76,89	100,0
d/D		9,5/25
Dimensão máxima característica (mm)		19,0

Fonte: Relatório de ensaio da Viatest/Laborloc de 04/06/2018.

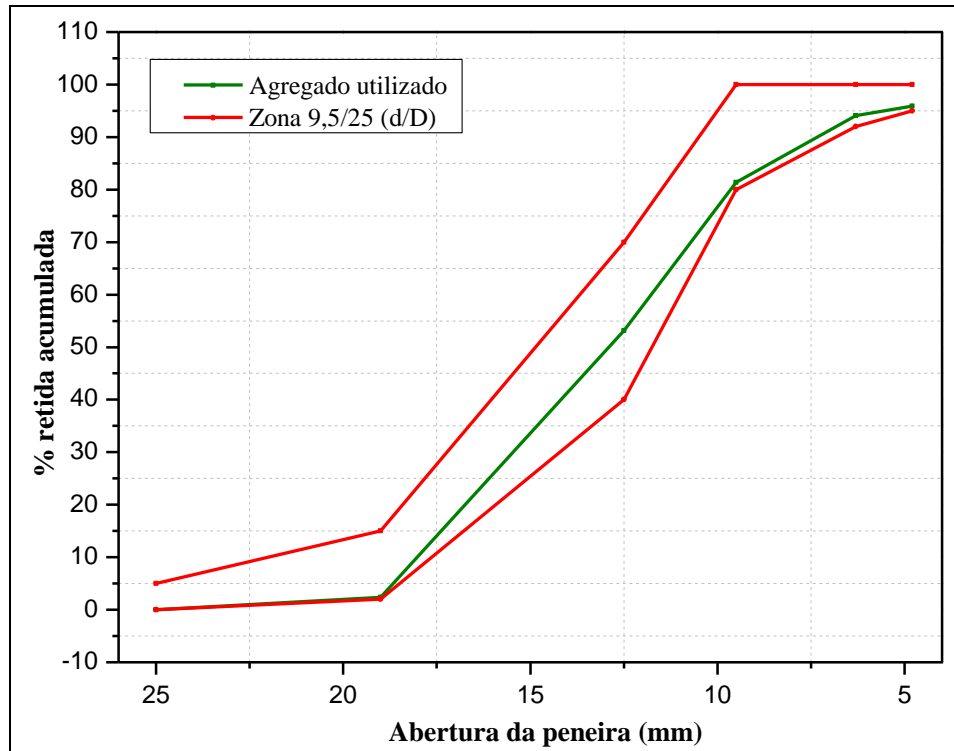


Figura 3.5 - Curva granulométrica do agregado graúdo utilizado  
 Fonte: Relatório de ensaio fornecido pela Viatest/Laborloc. Realizado em 04/06/2018.

### 3.1.4 Água de amassamento

A água utilizada na mistura dos concretos produzidos foi fornecida pela rede pública de abastecimento concessionada pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA) e utilizada de acordo com as recomendações especificadas na NBR 15900-1 (ABNT, 2009).

## 3.2 Plano experimental

O plano experimental do presente trabalho consistiu nas seguintes etapas:

- a) dosagem experimental e ajustes dos traços de concreto;
- b) confecção dos concretos propostos de acordo com os traços de concreto definidos;
- c) realização dos ensaios de consistência dos concretos produzidos, por meio da medição do abatimento do tronco de cone, conforme descrito pela NBR NM 67 (ABNT, 1998);

- d) moldagem e cura de 174 corpos de prova, de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015);
- e) preparação dos corpos de prova para os ensaios propostos;
- f) execução dos ensaios propriamente ditos, a saber:
  - caracterização mecânica dos CPs (10 x 20) cm por meio de ensaio de compressão axial aos 7 dias, aos 28 dias e aos 91 dias, conforme NBR 5739 (ABNT, 2018);
  - caracterização mecânica dos CPs (10 x 20) cm por meio de ensaio de tração por compressão diametral aos 28 dias, conforme NBR 7222 (ABNT, 2010);
  - caracterização física dos CPs (10 x 20) cm por meio dos ensaios de absorção por capilaridade e ensaios de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica aos 28 dias, conforme, respectivamente a NBR 9778 (ABNT, 2009) e NBR 9779 (ABNT, 2012);
  - avaliação do avanço da frente de penetração de íons cloreto nos CPs (10 x 20) cm por meio do método de ensaio descrito pela norma finlandesa NT BUILD 492 (NORDTEST, 1999) aos 28 dias, aos 56 dias e aos 91 dias;
  - avaliação da resistividade elétrica dos CPs aos 28 dias, aos 56 dias e aos 91 dias, conforme metodologia de medição recomendada pela T 358-17 (AASHTO, 2017);
  - análise microestrutural das amostras extraídas dos corpos de prova submetidos ao ensaio acelerado de migração de cloretos por meio da técnica de microscopia eletrônica de varredura.

### **3.2.1 Dosagem experimental e produção dos concretos**

Para a produção dos concretos utilizados no presente estudo, procedeu-se a dosagem experimental, em laboratório de tecnologia de concreto, de modo com que estes atendessem aos requisitos de qualidade estabelecidos para as classes de agressividade ambiental II e III

(concreto armado) da NBR 6118 (ABNT, 2014), conforme apresentado nos Quadros 3.1 e 3.2. Optou-se pela adoção destes parâmetros, durante a fase de concepção dos concretos estudados, como forma de padronizar os traços de concreto propostos, produzir materiais com aplicabilidade ao mercado comercial, bem como com o propósito de avaliar e validar as recomendações da norma brasileira vigente.

Quadro 3.1 - Classes de agressividade ao concreto de acordo com o meio ambiente

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 <sup>1, 2</sup>	Pequeno
III	Forte	Marinha <sup>1</sup>	Grande
		Industrial <sup>1, 2</sup>	
IV	Muito forte	Industrial <sup>1, 3</sup>	Elevado
		Respingo de maré	

Fonte: Adaptado de NBR 6118 (ABNT, 2014), pg. 9.

Quadro 3.2 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe do concreto (de acordo com a ABNT NBR 8953)	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$
Consumo do cimento por m <sup>3</sup> de concreto kg/m <sup>3</sup>	CA e CP	$\geq 260$	$\geq 280$	$\geq 320$	$\geq 360$

**Notas:**

1 - O concreto empregado deve cumprir com os requisitos estabelecidos na NBR 12655 (ABNT, 2006)

2 - CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado

3 - CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido

Fonte: NBR 12655 (ABNT, 2006) p. 10.

Com isso, foram dosados e ajustados dois traços de referência, utilizando-se cimentos sem adição de escória de alto forno (CP00), sendo um para cada uma das classes de agressividade ambiental propostas, II e III, e para cada uma destas mais dois traços de concreto com utilização de cimentos compostos com substituição parcial de cimento Portland por escória de alto forno (CP30 e CP60), adotando-se as seguintes nomenclaturas conforme Tabela 3.12.

Tabela 3.12 - Resumo esquemático dos traços de concreto propostos para a presente pesquisa

Nomenclatura do traço de concreto	Cimento utilizado	Classe de agressividade ambiental	Relação água/cimento em massa	Classe do concreto (vide ABNT NBR 8953)	Teor de escória de alto-forno (% em massa)
TE00C2	CP00				0
TE30C2	CP30	II	0,60	C25	30
TE60C2	CP60				60
TE00C3	CP00				0
TE30C3	CP30	III	0,55	C30	30
TE60C3	CP60				60

A Tabela 3.13 apresenta a composição dos traços de concreto utilizados na presente pesquisa.

Tabela 3.13 - Composição dos traços de concreto dosados e utilizados na pesquisa

Nomenclatura do traço de concreto	Relação água/cimento (em massa)	Cimento / Escória (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado miúdo (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado graúdo (kg/m <sup>3</sup> )	Água (litros)
TE00C2		370 / 0			
TE30C2	0,60	259 / 111	783	941	222
TE60C2		148 / 222			
TE00C3		395 / 0			
TE30C3	0,55	276 / 119	748	972	217
TE60C3		158 / 237			

Optou-se pela não utilização de aditivos plastificantes e/ou superplastificantes com o intuito de se evitar a introdução de uma variável adicional às análises, bem como para se evitar eventuais interações químicas e físicas com os reagentes utilizados no ensaio acelerado de migração de cloretos.

Durante a etapa de dosagem dos traços, determinou-se que os abatimentos de tronco de cone, avaliado por procedimento estabelecido pela NBR NM 67 (ABNT, 1998), deveriam estar compreendidos nos intervalos de  $(9 \pm 2)$  cm e  $(7 \pm 2)$  cm para as classes de agressividade II e III, respectivamente, mantendo-se constante a relação água/cimento previamente estabelecida.

### 3.2.2 Produção dos concretos, moldagem e cura dos corpos de prova

Previamente à etapa de produção dos concretos, os agregados miúdo e graúdo foram secos ao ar, sob abrigo, armazenados em sacos plásticos apropriados e acondicionados em *pallets* e/ou caixotes plásticos. Os cimentos Portland especiais, assim que coletados junto ao fabricante, foram embalados à vácuo em sacos plásticos apropriados para minimização do contato com o ambiente externo a fim de evitar qualquer tipo de hidratação precoce e garantir a qualidade até a data de utilização. Além disso, foram acondicionados em estruturas de madeira elevadas em relação ao piso e afastadas de alvenarias.

A produção dos concretos e moldagem dos corpos de prova se deu em seis etapas, sendo uma para cada um dos traços de concreto propostos para o trabalho. Para tal, foi utilizada uma betoneira elétrica marca CSM com capacidade de 130 litros, ilustrada na Figura 3.6.



Figura 3.6 - Betoneira utilizada na produção dos concretos

Ao fim de cada mistura foram realizados, conforme mostra a Figura 3.7, os ensaios de consistência dos concretos produzidos, por meio da medição do abatimento do tronco de cone (*slump test*) de acordo com o procedimento recomendado pela NBR NM 67 (ABNT, 1998) para verificação da trabalhabilidade das misturas no estado fresco.



Figura 3.7 - Ensaio de consistência por abatimento do tronco de cone (*slump test*)

Ao todo, para o presente trabalho, foram produzidos 312 litros de concreto para moldagem de 174 corpos de prova cilíndricos com dimensões de (10 x 20) cm.

As moldagens dos corpos de prova se deram em ambiente com umidade relativa à  $(65 \pm 2) \%$  e temperatura de  $(26 \pm 1)^\circ \text{C}$ , conforme estabelece a NBR 5738 (ABNT, 2015). As formas metálicas padronizadas tiveram suas faces previamente revestidas com uma fina camada de óleo desmoldante mineral. Com isso, iniciou-se o procedimento de moldagem, o qual consistiu em:

- 1) preenchimento de metade da forma com dimensões (10 x 15) cm, com o auxílio de uma concha de seção U para acomodar a massa de concreto no seu interior;
- 2) adensamento manual da primeira camada com 12 golpes da haste padrão de adensamento com conseqüente abatimento no volume de concreto;
- 3) novo preenchimento da forma até o seu volume total;

- 4) adensamento manual da segunda camada com 12 golpes da haste padrão de adensamento com consequente novo abatimento do volume de concreto;
- 5) novo preenchimento total da forma, excedendo o seu limite do topo;
- 6) arrasamento e acabamento do topo com auxílio de uma espátula.

Todos os corpos de prova foram mantidos, após a moldagem, sob abrigo e em temperatura ambiente por um período 24 horas.

Decorrido tal período, foram desmoldados, identificados de acordo com o inventário de amostras e submersos em água potável, conforme ilustra a Figura 3.8. A condição de cura saturada se manteve até as idades previstas para cada um dos ensaios propostos.

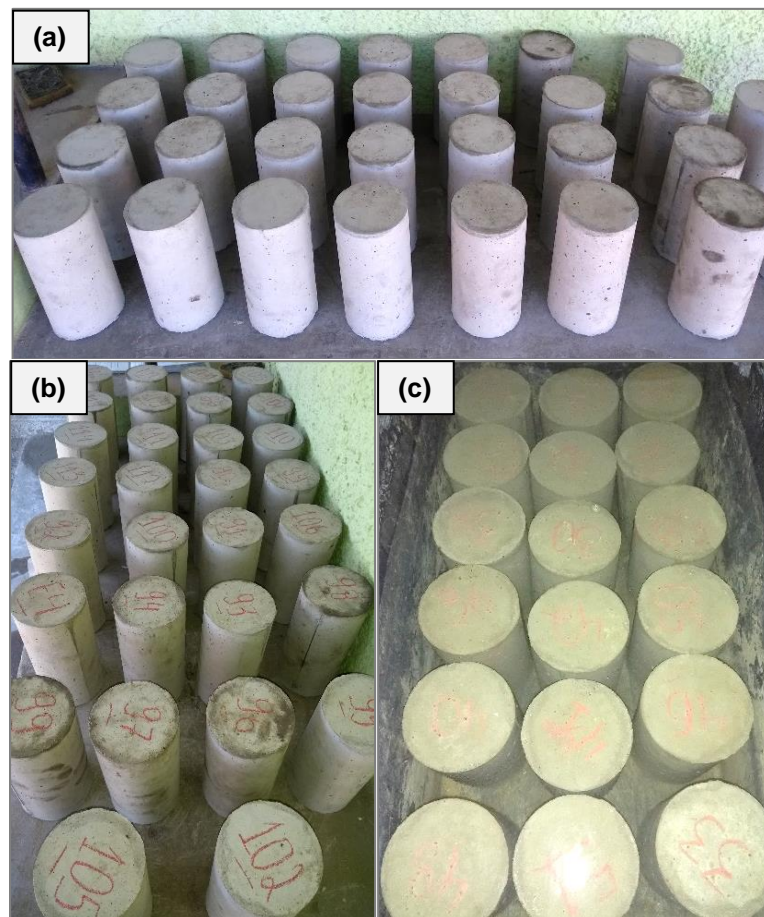


Figura 3.8 - Procedimento de desforma e cura dos corpos de prova  
(a) corpos de prova desformados  
(b) identificação dos corpos de prova  
(c) corpos de prova em condição de cura saturada

Para cada um dos traços propostos, foram necessários 52 litros de concreto suficientes para a fabricação de 29 corpos de prova, os quais foram, após a etapa de desforma, devidamente distribuídos para a realização dos ensaios propostos de acordo com o exibido na Tabela 3.14.

Tabela 3.14 - Detalhamento da distribuição geral dos corpos de prova de concreto produzidos

<b>Idade (dias)</b>	<b>TE00C2</b>	<b>TE30C2</b>	<b>TE60C2</b>	<b>TE00C3</b>	<b>TE30C3</b>	<b>TE60C3</b>
Resistência à compressão axial						
7	3	3	3	3	3	3
28	3	3	3	3	3	3
91	3	3	3	3	3	3
	9	9	9	9	9	9
Total do ensaio	54					
Resistência à tração por compressão diametral						
28	3	3	3	3	3	3
	3	3	3	3	3	3
Total do ensaio	18					
Absorção, índice de vazios e massa específica						
28	2	2	2	2	2	2
	2	2	2	2	2	2
Total do ensaio	12					
Absorção de água por capilaridade						
28	6	6	6	6	6	6
	6	6	6	6	6	6
Total do ensaio	36					
Migração de cloretos e Resistividade elétrica						
28	3	3	3	3	3	3
56	3	3	3	3	3	3
91	3	3	3	3	3	3
	9	9	9	9	9	9
Total do ensaio	54					
Total geral	174					

### 3.3 Métodos dos Ensaios

São apresentados, nesta seção, todas as informações relevantes acerca dos procedimentos experimentais seguidos, dos parâmetros e variáveis adotadas, assim como dos instrumentos e equipamentos utilizados no desenvolvimento dos ensaios previstos no plano experimental.

#### 3.3.1 Resistência à compressão

Aos 28, 56 e 91 dias de idade, três corpos de prova de cada traço de concreto, com dimensões (10 x 20) cm, foram retirados da condição de cura saturada e submetidos ao ensaio mecânico de determinação da resistência à compressão, conforme procedimento recomendado pela NBR 5739 (ABNT, 2018).

Previamente, os corpos de prova tiveram suas faces retificadas, conforme prescrito na NBR 5738 (ABNT, 2015), com o intuito de se garantir o paralelismo das mesmas durante a realização do ensaio.

Os CPs foram rompidos com utilização de prensa eletro-hidráulica marca VIATEST VC 751 para 2000 kN, apresentada na Figura 3.9, respeitando-se as idades previstas e as tolerâncias em concordância com a Tabela 3.15.

Tabela 3.15 - Idade e tolerância de atraso para rompimento

Idade de ensaio	Tolerância permitida
7 dias	6 horas
28 dias	24 horas
91 dias	48 horas

Fonte: Adaptado de NBR 5739 (ABNT, 2007), pg. 4.

O carregamento foi aplicado continuamente e sem choques, sendo a velocidade de aplicação da carga mantida constante na ordem de  $(0,45 \pm 0,15)$  MPa/s consoante com a recomendação da NBR 5739 (ABNT, 2018).



Figura 3.9 - Prensa hidráulica VC751

O carregamento foi cessado somente quando uma queda no acúmulo de força foi observada, o que indica a ruptura do corpo de prova. Com isso, a resistência à compressão foi calculada a partir da Equação 3.1.

$$f_c = \frac{4F}{\pi D^2} \quad \text{Eq. 3.1}$$

Onde:

$f_c$  = resistência a compressão (MPa);

F = força máxima alcançada (N);

D = diâmetro do corpo de prova (mm).

### 3.3.2 Resistência à tração por compressão diametral

Os corpos de prova, com dimensões de (10 x 20) cm, destinados ao ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral foram retirados da cura saturada aos 28 dias e transferidos para câmara úmida, com umidade relativa acima de 95% e com temperatura entre 20° C e 25° C, onde foram mantidos por 72 horas.

Decorrido tal período, 3 (três) CP's de cada traço foram ensaiados em prensa eletro-hidráulica marca VIATEST modelo VC 751 com capacidade para 2000 kN, seguindo o procedimento

de ensaio previsto pela NBR 7222 (ABNT, 2011). Para facilitar o posicionamento dos CPs na máquina, foi utilizado um dispositivo metálico auxiliar e tiras de chapa dura de fibra de madeira entre este e os corpos de prova, conforme apresenta a Figura 3.10.

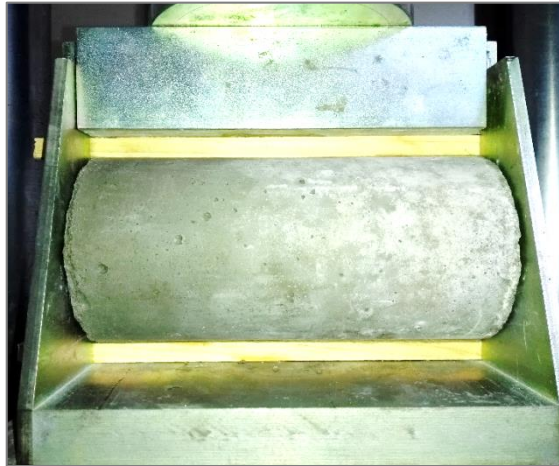


Figura 3.10 - Aparato utilizado nos ensaios de tração

As dimensões dos CPs foram obtidas com a utilização de paquímetro digital com resolução igual a 0,01 mm, sendo determinados os diâmetros dos CPs por meio da média de dois diâmetros, medidos ortogonalmente na metade da altura do corpo de provas, assim como as alturas dos CPs medidas sobre o eixo longitudinal destes.

A carga foi aplicada continuamente e sem choques, com crescimento constante da tensão de tração e a uma velocidade de aplicação da força de  $(0,05 \pm 0,02)$  MPa/s até a ruptura do corpo de prova, conforme especifica a NBR 7222 (ABNT, 2011).

A resistência à tração por compressão diametral foi calculada a partir da Equação 3.2.

$$f_t = \frac{2F}{\pi dl} \quad \text{Eq. 3.2}$$

Onde:

$f_t$  = resistência à tração por compressão diametral (MPa);

F = força máxima obtida no ensaio (N);

d = diâmetro do corpo de prova (mm);

l = comprimento do corpo de prova (mm).

### 3.3.3 Absorção de água por capilaridade

Os concretos produzidos foram avaliados quanto à absorção de água por ascensão capilar de acordo com as diretrizes da NBR 9779 (ABNT, 2012). Para isso, 6 (seis) CPs, de cada traço, com dimensões de (10 x 20) cm e devidamente isentos de óleo ou outros materiais aderidos na moldagem, foram retirados da cura saturada após 28 dias, sendo neste momento determinada a massa ao ar para cada um deles.

Em seguida, os CPs foram levados a estufa à temperatura de  $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$  por 72 horas e, após o resfriamento destes até a temperatura ambiente, foram determinados os valores da massa seca de cada um dos corpos de prova, que foram então inseridos em um recipiente fechado com tampa, devidamente preparado para o ensaio num ambiente com temperatura constante de  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ , no qual foram posicionados sobre pinos de modo com que ficassem em contato com uma lâmina d'água de  $(5 \pm 1)$  mm acima de sua face inferior, evitando-se a molhagem de outras superfícies, conforme apresenta a Figura 3.11.

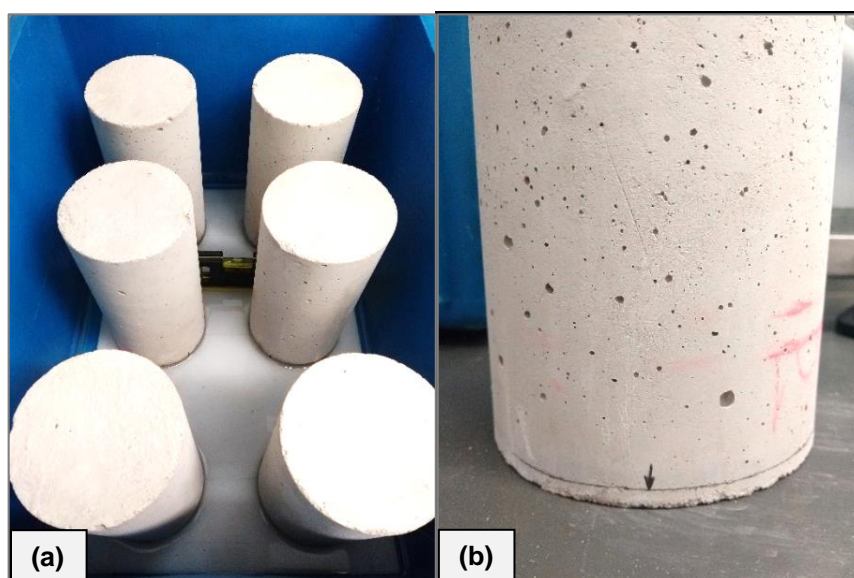


Figura 3.11 - Ensaio de absorção de água por capilaridade

- (a) instalação dos corpos de prova no recipiente com água
- (b) marcação da altura da lâmina d'água nos corpos de prova

Com isso, as massas dos corpos de prova foram determinadas após decorridas 3, 6, 24, 48 e 72 horas, contados a partir do contato destes com a lâmina d'água. A espessura da lâmina d'água foi mantida constante, completando-se sempre que necessário.

Após a última determinação de massa, isto é, após 72 horas em contato com a lâmina d'água, os corpos de prova foram rompidos por compressão diametral, consoante com as orientações da NBR 7222 (ABNT, 2011), de modo a permitir a anotação da distribuição da água no seu interior, conforme ilustra a Figura 3.12.



Figura 3.12 - Rompimento diametral e medição das alturas de ascensão capilar

A absorção de água por capilaridade, expressa em  $\text{g}/\text{cm}^2$ , foi calculada para cada amostra, dividindo-se o aumento de massa em cada intervalo de tempo pela área da seção transversal da superfície do corpo-de-prova em contato com a água, de acordo com a Equação 3.3.

$$C = \frac{A-B}{S} \quad \text{Eq. 3.3}$$

Onde:

C = absorção de água por capilaridade ( $\text{g}/\text{cm}^2$ );

A = massa do corpo-de-prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período de tempo especificado (g);

B = massa do corpo-de-prova seco, assim que este atingir a temperatura de  $(23 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$  (g);

S = área da seção transversal ( $\text{cm}^2$ ).

### 3.3.4 Absorção, índice de vazios e massa específica

O ensaio para a determinação da absorção de água, do índice de vazios por imersão e fervura, e das massas específicas foi realizado conforme os procedimentos recomendados pela NBR 9778 (ABNT, 2005).

Aos 28 dias, 2 (dois) corpos de prova de cada traço foram retirados da cura saturada e submetidos à secagem em estufa com temperatura constante de  $(105 \pm 2) ^\circ\text{C}$  por um período de 72 horas, sendo, neste momento, determinadas as massas secas ( $m_s$ ) dos CPs.

Na sequência, os CPs foram submersos em água à temperatura de  $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$  e mantidos nessa condição por um período de 72 horas. Consumada a etapa de submersão, os CPs foram dispostos em um recipiente cheio de água, que foi progressivamente levada à ebulição, conforme mostra a Figura 3.13, sendo esta condição mantida por um período de 5 horas, mantendo-se aproximadamente constante o volume de água.



Figura 3.13 - Submersão e ebulição dos corpos de prova

Decorrido o período de fervura e após o resfriamento natural da água até a temperatura ambiente de  $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ , as massas imersa dos CPs ( $m_i$ ) foram determinadas com auxílio de uma balança hidrostática. Logo após, os CPs foram retirados da água, secos com pano úmido e então foram determinadas as suas massas na condição saturada superfície seca ( $m_{sat}$ ).

De posse destas informações, a absorção de água, o índice de vazios por imersão e fervura e as massas específicas dos CPs foram determinados. O percentual de absorção (A) foi calculado pela razão entre a diferença da massa saturada superfície seca ( $M_{sat}$ ) pela massa seca ( $m_s$ ) e o valor da massa seca ( $m_s$ ) de cada CP, conforme Equação 3.4.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad \text{Eq. 3.4}$$

Onde:

A = absorção de água (%);

$m_{sat}$  = massa da amostra saturada em água após imersão e fervura (g);

$m_s$  = massa da amostra seca em estufa (g).

O percentual de índices de vazios ( $I_v$ ) foi calculado pela razão entre as diferenças da massa saturada superfície seca ( $m_{sat}$ ) pela massa seca ( $m_s$ ) e diferença entre a massa saturada superfície seca ( $m_{sat}$ ) e massa imersa ( $m_i$ ), conforme Equação 3.5.

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad \text{Eq. 3.5}$$

Onde:

$I_v$  = índice de vazios (%);

$m_{sat}$  = massa da amostra saturada em água após imersão e fervura (g);

$m_s$  = massa da amostra seca em estufa (g);

$m_i$  = massa da amostra saturada imersa em água após fervura (g).

Para o cálculo da massa específica da amostra seca ( $\rho_s$ ), massa específica da amostra saturada ( $\rho_{sat}$ ) e massa específica real ( $\rho_r$ ), foram utilizadas, respectivamente, as Equações 3.6, 3.7 e 3.8, apresentadas a seguir :

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad \text{Eq. 3.6}$$

$$\rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \quad \text{Eq. 3.7}$$

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad \text{Eq. 3.8}$$

### 3.3.5 Migração de Cloretos

A avaliação da penetrabilidade dos íons cloreto nos concretos produzidos baseou-se na determinação dos coeficientes de migração de cloretos obtidos por meio do ensaio acelerado de migração em estado não-estacionário prescrito pela NT BUILD 492 (NORDTEST, 1999). Após 28, 56 e 91 dias de cura, 3 (três) CPs com dimensões de (10 x 20) de cada traço foram retirados da cura saturada e devidamente preparados para a realização do ensaio. Optou-se pela utilização deste método devido a sua facilidade de execução, rapidez e boa reprodutibilidade na obtenção de resultados e por não apresentar algumas das desvantagens executivas verificadas em outros métodos similares, como apresentado no capítulo anterior.

#### a) Obtenção das amostras

Primeiramente, os CPs (10 x 20) cm foram secos superficialmente, devidamente marcados na superfície lateral e cortados, com utilização de máquina de corte apropriada, em quatro fatias com iguais alturas de  $(50 \pm 2)$  mm e com 100 mm de diâmetro, conforme esquema apresentado na Figura 3.14. As fatias provenientes do topo e da base dos corpos de prova foram descartadas e as fatias internas destinadas à realização do ensaio, as quais foram limpas em água corrente com o auxílio de escova de aço e identificadas de acordo com a sua origem.

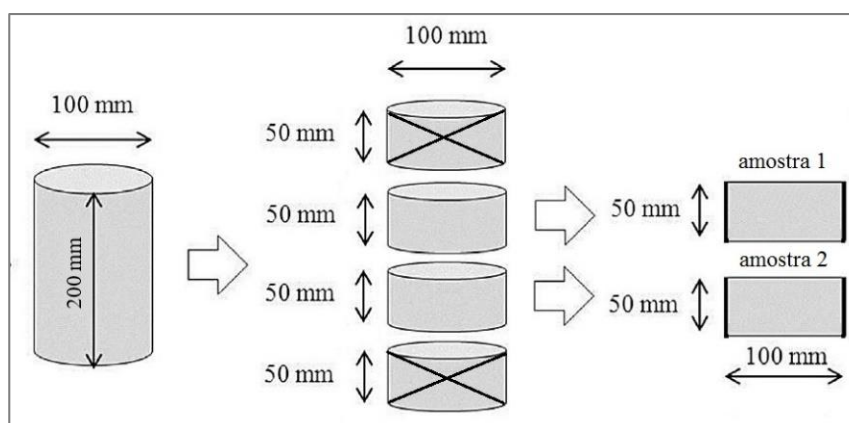


Figura 3.14 - Esquema para corte das amostras para o ensaio de migração

Com isso, foram obtidas 6 (seis) amostras para cada traço/idade, como ilustra a Figura 3.15.



Figura 3.15 - Fatias de concreto obtidas após o corte dos CPs

### b) Preparo das amostras e processo de vácuo

As seis amostras geradas por ensaio foram inseridas em uma câmara de vácuo de modo que não houvesse contato entre elas, e então, foram submetidas à uma pressão de vácuo de aproximadamente 50 mBar (5 kPa) durante um período de 3 horas, a qual foi obtida por meio de uma bomba de vácuo EDWARDS com potência de 240 W e vácuo máximo de 0,020 mbar com pressão máxima de 200 mbar acoplada à um equipamento do tipo “armadilha gelada” CentriVap/ColdTrap que, por sua vez, tem a função de impedir que a umidade atinja a bomba, conforme aparato apresentado na Figura 3.16.



Figura 3.16 - Conjunto: câmara de vácuo, ColdTrap e bomba

Decorridas 3 horas, a câmara foi preenchida, ainda sob pressão de vácuo, com uma solução, previamente preparada sob aquecimento composta por 10 litros de água potável e 20 gramas do reagente hidróxido de cálcio  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ , permanecendo nesta condição por mais 1 hora, conforme mostra a Figura 3.17.

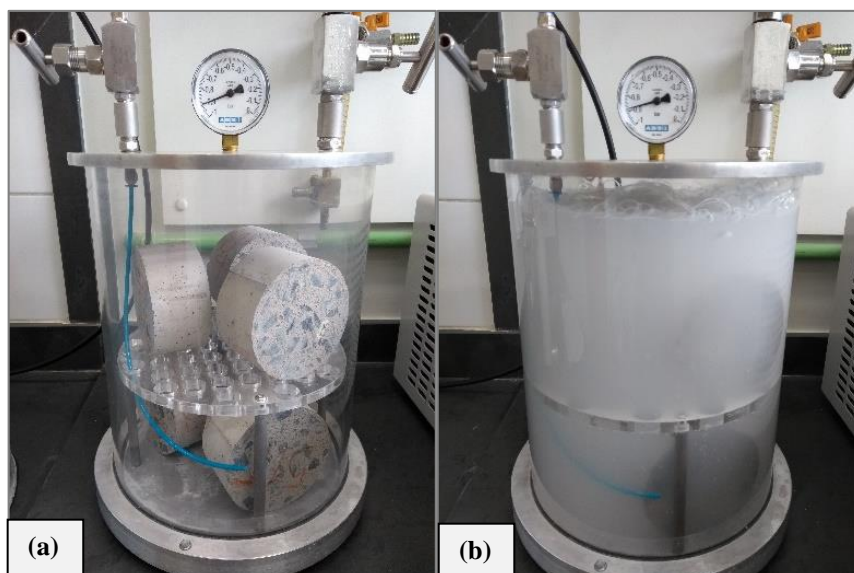


Figura 3.17 - Processo de pré-condicionamento das amostras sob vácuo  
(a) Amostras em câmara com pressão de vácuo e sem solução  
(b) Preenchimento da câmara com solução de hidróxido de cálcio

Com o término deste período, permitiu-se que o ar retornasse para o interior da câmara, mantendo-se as amostras em solução por um período de  $(18 \pm 2)$  horas.

Com a conclusão da etapa de repouso em solução, as amostras foram retiradas da câmara, lavadas em água corrente e jateadas com ar comprimido para desobstrução dos poros superficiais do concreto.

### c) Migração de cloretos

As superfícies laterais das amostras, já devidamente limpas e superficialmente secas, foram impermeabilizadas com graxa de silicone e, então, estas foram posicionadas no interior de camisas de borracha, as quais foram envolvidas por duas abraçadeiras metálicas cada, conforme mostra a Figura 3.18.



Figura 3.18 - Amostras no interior das camisas de silicone

A estanqueidade dos conjuntos (amostra + camisa de silicone) foi verificada pela submersão parcial destes em água, como ilustra a Figura 3.19.



Figura 3.19 - Teste de estanqueidade dos conjuntos do ensaio

Com isso, as camisas de borracha contendo as amostras foram internamente preenchidas com uma solução anódica previamente preparada e constituída por uma quantidade total de 24 gramas de hidróxido de sódio (NaOH) dissolvidos em 2 litros de água potável.

Em seguida, os conjuntos (amostra + camisa de silicone) foram convenientemente posicionados em suportes plásticos, levemente inclinados, no interior das duas câmaras de ensaio contendo, cada uma delas, uma solução catódica constituída pela quantidade total de 1112 gramas de cloreto de sódio (NaCl) dissolvidos em 10 litros de água potável, como demonstra o aparato esquemático proposto pela Figura 3.20.

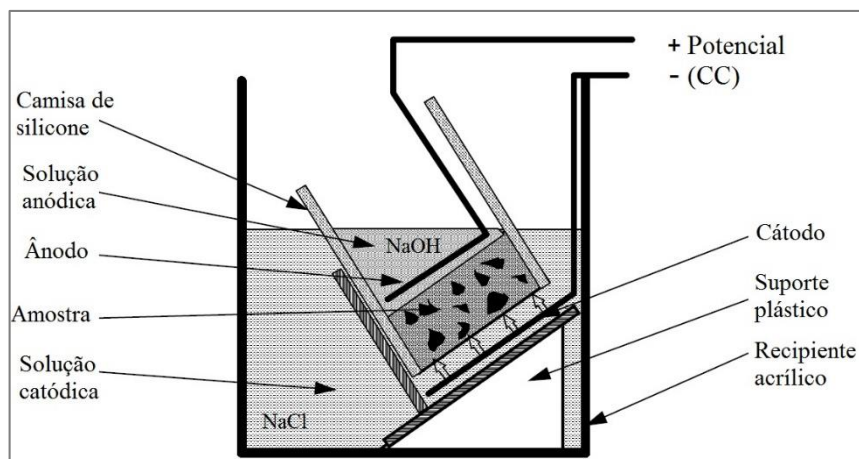


Figura 3.20 - Arranjo esquemático do aparato recomendado pela NT BUILD 492  
Fonte: Adaptado de NORDTEST, 1999, p. 5.

Com isso, os eletrodos foram conectados de forma a interligar as hastes e placas metálicas do aparato de ensaio à uma caixa de comutação que, por sua vez, foi conectada à uma fonte de alimentação de energia responsável pela geração de uma diferença de potencial elétrico entre o cátodo e o ânodo, como expõe a Figura 3.21.

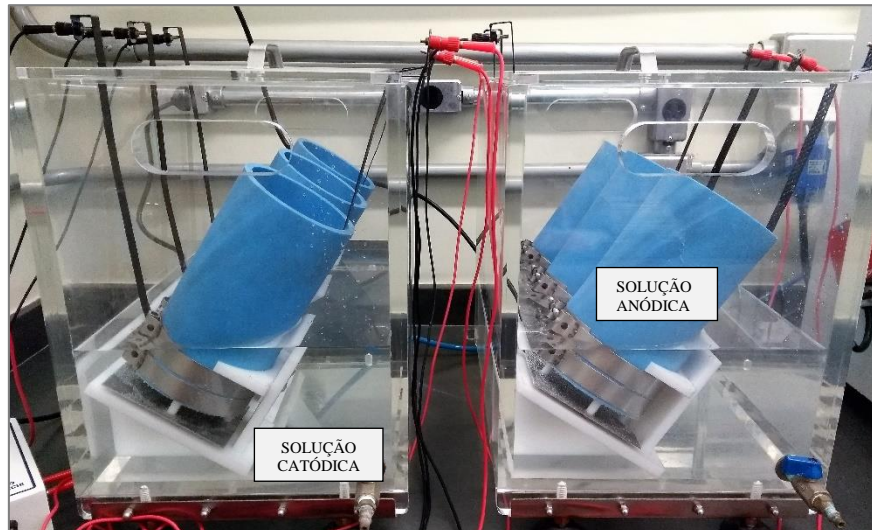


Figura 3.21 - Aparato de ensaio montado e conectado à fonte de alimentação

A voltagem elétrica inicial foi ajustada, inicialmente, na fonte de alimentação em 30 V para todos os ensaios. As correntes elétricas (ampères) e as voltagens aplicadas (volts), em cada uma das amostras, foram medidas, respectivamente, por meio de um amperímetro da marca FLUKE 289 TRUE RMS e de um voltímetro da marca FLUKE 117 TRUE RMS, ambos conectados à caixa de comutação, que permite alternar as leituras em cada uma das seis amostras do conjunto. Além disso, as temperaturas das soluções anódicas foram medidas, em

cada uma das amostras, com a utilização de um termômetro digital modelo TESTO 735. A Figura 3.22 explica uma visão geral do aparato de ensaio e dos instrumentos de medição.

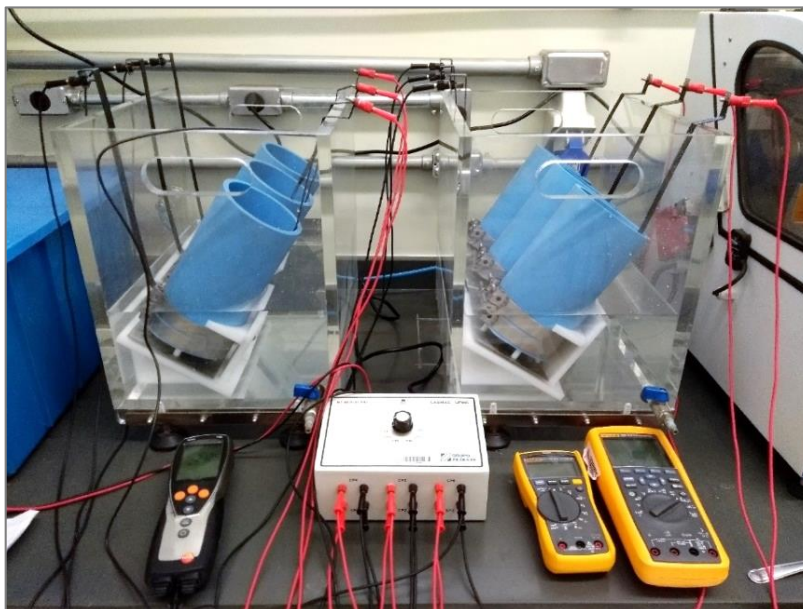


Figura 3.22 - Visão geral do aparato de ensaio de migração de cloretos

Tabela 3.16 - Diferença de potencial e duração do ensaio de migração de uma amostra de concreto

Corrente inicial $I_{30V}$ (com 30V) - (mA)	Diferença de potencial aplicada U (após ajuste) - (V)	Nova corrente inicial admissível - (mA)	Duração do ensaio t - (horas)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 \leq 10$	60	$10 \leq I_0 \leq 20$	48
$10 \leq I_0 \leq 15$	60	$20 \leq I_0 \leq 30$	24
$15 \leq I_0 \leq 20$	50	$25 \leq I_0 \leq 35$	24
$20 \leq I_0 \leq 30$	40	$25 \leq I_0 \leq 40$	24
$30 \leq I_0 \leq 40$	35	$35 \leq I_0 \leq 50$	24
$40 \leq I_0 \leq 60$	30	$40 \leq I_0 \leq 60$	24
$60 \leq I_0 \leq 90$	25	$50 \leq I_0 \leq 75$	24
$90 \leq I_0 \leq 120$	20	$60 \leq I_0 \leq 80$	24
$120 \leq I_0 \leq 180$	15	$60 \leq I_0 \leq 90$	24
$180 \leq I_0 \leq 360$	10	$60 \leq I_0 \leq 120$	24
$I_0 > 360$	10	$I_0 > 120$	6

Fonte: NORDTEST, 1999, pg. 8.

De acordo com os valores medidos para as correntes elétricas passantes nas amostras com a voltagem inicial de 30 V, ajustou-se a voltagem efetiva para a realização do ensaio de acordo com as recomendações da NT BUILD 492 (NORDTEST, 1999) apresentadas na Tabela 3.16, que por sua vez determina também o tempo total de duração do ensaio.

Decorrido o tempo previsto para a duração do ensaio, as correntes elétricas finais passantes pelas amostras e as temperaturas finais das soluções anódicas foram novamente medidas em cada uma das amostras, e então, a fonte de alimentação de energia foi desligada e os conjuntos retirados e desmontados.

#### **d) Medição da frente de penetração de cloretos**

Com a desmontagem dos conjuntos, as amostras foram retiradas das camisas de silicone, lavadas com água corrente e escova de aço, secas superficialmente com toalhas de papel, e então, seccionadas diametralmente em duas partes com utilização de um aparato metálico posicionado entre os pratos de em uma prensa eletro-hidráulica da marca EMIC com capacidade para 2000 kN, conforme exibe a Figura 3.23

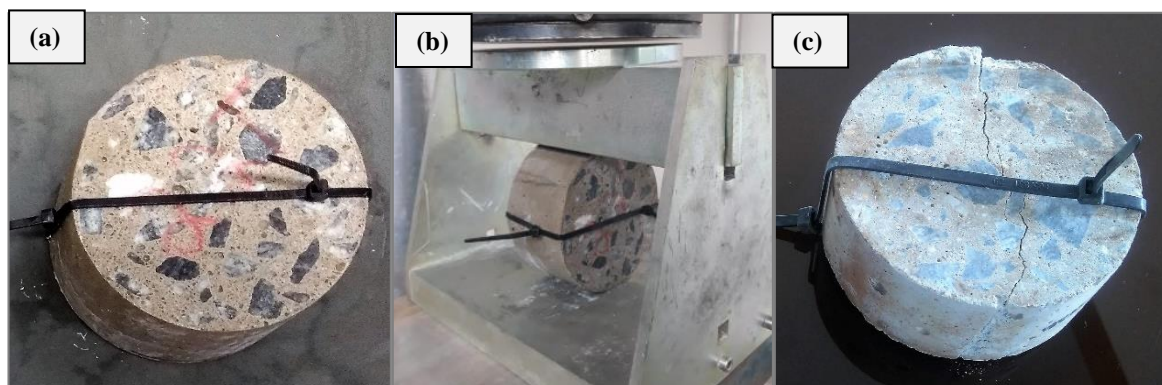


Figura 3.23 - Processo de seccionamento das amostras para evidenciação das penetrações  
(a) amostra íntegra após o término do processo de migração de íons cloreto  
(b) aplicação da carga para rompimento diametral das amostras  
(c) amostra seccionada diametralmente

Logo após, uma solução constituída por uma quantidade total de 1,70 gramas de nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ ) dissolvidos em 100 mililitros de água potável foi aspergida sobre as superfícies internas recém seccionadas de modo a se obter a evidenciação da penetração de cloretos nas amostras.

Transcorrido um período de cerca de 10 minutos da aspersão da solução de nitrato de prata, as profundidades de penetração de cloretos, identificadas por um precipitado branco de cloreto de prata claramente visível, foram medidas, diretamente sobre a superfície da amostra, a partir do centro em intervalos de 10 mm para obtenção de sete valores, não sendo realizadas quaisquer medidas de profundidade na zona compreendida na região distante de 10 mm a partir das bordas das amostras. As Figuras 3.24 e 3.25 ilustram o aspecto das amostras após a aspersão no indicador nitrato de prata e as posições de medida das penetrações.

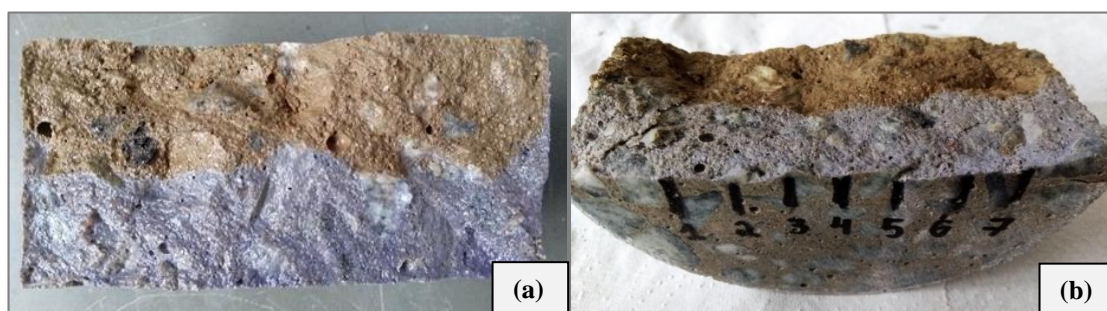


Figura 3.24 - Amostras submetidas à aspersão de solução de nitrato de prata  
 (a) evidenciação das alturas de penetração de cloretos  
 (b) marcação das posições de medida das alturas de penetração de cloretos

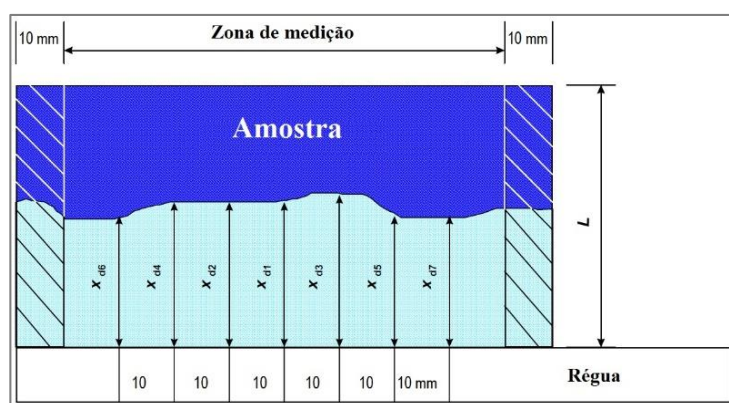


Figura 3.25 - Área de medição da frente de penetração de cloretos  
 Fonte: NORDTEST, 1999, p.7 (adaptado).

Com isso, os coeficientes de migração de íons cloreto no estado não estacionário ( $D_{mene}$ ) foram calculados por meio da Equação 3.9.

$$D_{mene} = \frac{0,0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \left( X_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273 + T)L \cdot X_d}{(U - 2)}} \right) \quad \text{Eq. 3.9}$$

Onde:

$D_{menc}$  = coeficiente de migração em estado não estacionário,  $\times 10^{-12}$  ( $m^2/s$ );

$U$  = valor absoluto da voltagem aplicada (V);

$T$  = valor médio das temperaturas iniciais e finais na solução anódica ( $^{\circ}C$ );

$L$  = altura da amostra (mm)

$x_d$  = valor médio das profundidades de penetração (mm);

$t$  = duração do teste (h).

### 3.3.6 Resistividade Elétrica

Nas idades de 28, 56 e 91 dias, os corpos de prova produzidos para a realização do ensaio de migração de cloretos foram avaliados, primeiramente, quanto às suas resistividades elétricas superficiais.

Optou-se pelo ensaio não destrutivo baseado no método dos quatro eletrodos, que consiste na aplicação uma corrente alternada entre os dois eletrodos externos a uma frequência entre 100 e 1000 Hz e na medição da diferença de potencial entre os eletrodos internos, conforme esquema apresentado pela Figura 3.26.

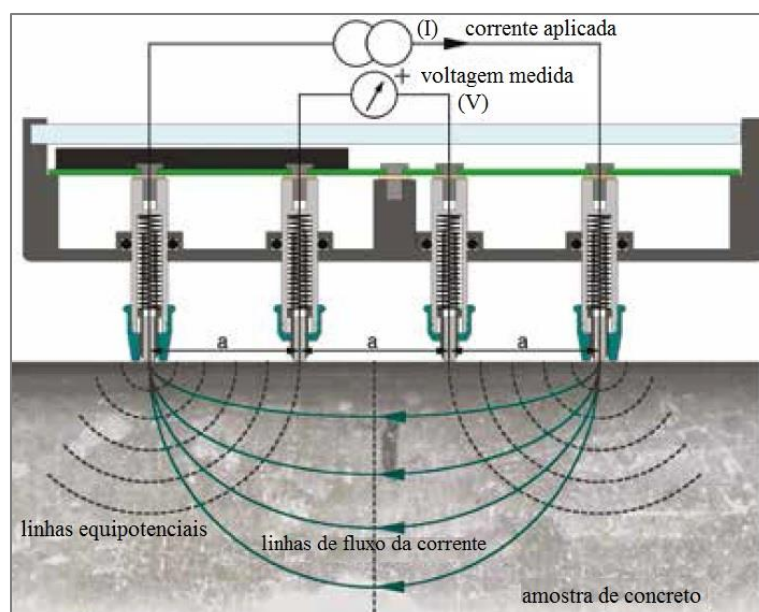


Figura 3.26 - Desenho esquemático da sonda de quatro eletrodos para medição da resistividade elétrica superficial do concreto  
Fonte: PROCEQ, 2018, pg. 2.

O valor da resistividade elétrica do concreto é dado pela Equação 3.10.

$$\rho = \frac{2 \pi a E}{I} \quad \text{Eq. 3.10}$$

Onde:

E = diferença de potencial elétrico (V);

I = corrente elétrica (A);

a = distância entre os eletrodos, devendo ser maior que o diâmetro máximo do agregado graúdo, sendo comumente igual a 5 (cm).

As medições de resistividade elétrica foram realizadas nos corpos de prova saturados, em oito posições diametralmente afastadas por 90°, conforme as recomendações da norma T358-17 (AASHTO, 2017), sendo os valores obtidos diretamente pela leitura, em kΩ.cm, no visor digital do instrumento de sonda Resipod, da marca Proceq, como mostra a Figura 3.27.

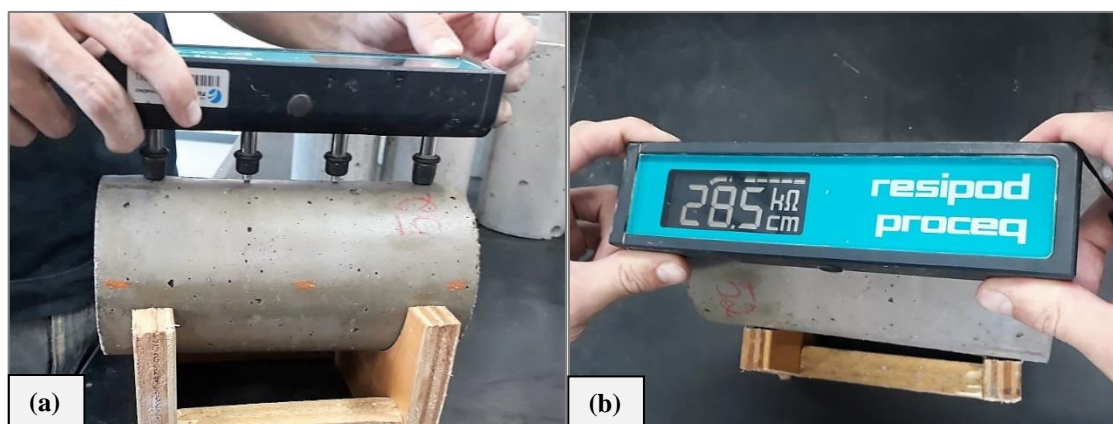


Figura 3.27 – Procedimento de medição da resistividade elétrica dos corpos de prova  
 (a) posicionamento da sonda nas posições de medida pré-estabelecidas  
 (b) leitura direta dos valores de resistividade elétrica dos concretos

Ressalta-se que, embora haja a recomendação normativa para que o equipamento de sonda utilizado na avaliação de corpos de prova com dimensões de (10 x 20) mm possua espaçamento entre eletrodos igual a 38 mm, utilizou-se, no presente estudo, a sonda com espaçamento entre eletrodos igual a 50 mm tendo em vista a sua disponibilidade em laboratório e o propósito meramente comparativo, entre os diferentes concretos produzidos, das avaliações de resistividade elétrica realizadas, as quais não devem ser extrapoladas para eventuais análises externas à esta pesquisa.

### 3.3.7 Microscopia eletrônica de varredura

As análises microestruturais dos concretos produzidos foram realizadas com a utilização da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV), a qual permite a obtenção de informações acerca da densificação, da morfologia, do grau de porosidade e da presença de fissuras na matriz cimentícia.

Para isso, amostras foram extraídas dos corpos de prova submetidos aos ensaios de migração de íons cloretos aos 28 dias, tomando-se o cuidado de que estas contivessem regiões com e sem a presença de cloretos, de acordo com a demarcação obtida após o procedimento de aspersão de nitrato de prata, procedimento integrante do referido ensaio.

As amostras para análise microestrutural foram cortadas com auxílio de máquina de corte, com resfriamento por circulação de água, da marca AROTEC, modelo COR 250, nas medidas aproximadas de (25 x 25) mm e retificadas pelo mesmo equipamento, conforme retratado na Figura 3.28.

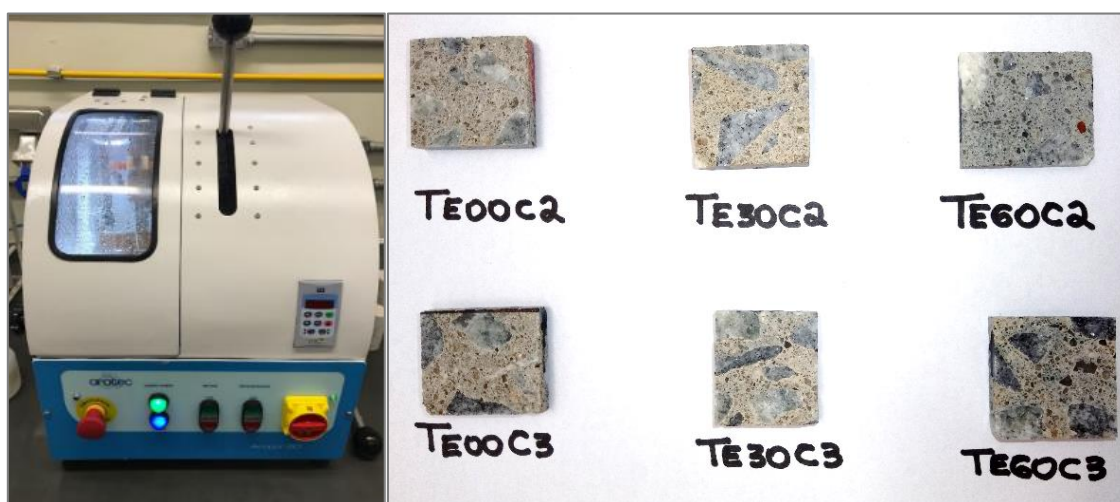


Figura 3.28 - Preparação das amostras para a realização da MEV  
(a) máquina de corte AROTEC COR250 utilizada  
(b) amostras extraídas dos corpos de prova

A preparação das amostras incluiu a limpeza, a devida fixação em porta amostras de alumínio e a cobertura das superfícies de análise com 15 nanômetros de carbono, a qual foi realizada por meio de uma evaporadora de carbono marca LEICA modelo SCD500 com pressão de

vácuo de ( $10^{-3}$ ) mbar e corrente elétrica de 2,5A. Após a preparação, as amostras foram mantidas em dessecador até o momento das análises.

As Figuras 3.29 e 3.30 apresentam, respectivamente, o equipamento utilizado na preparação e as amostras de concreto já preparadas para a realização das análises.



Figura 3.29 – Evaporadora de carbono modelo FEICA SDC500

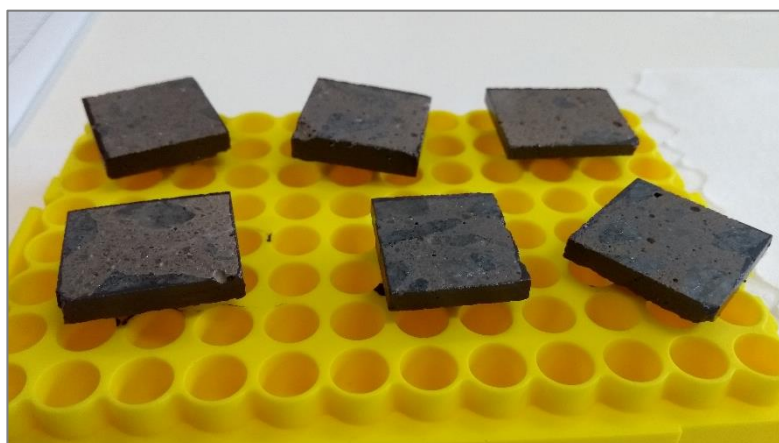


Figura 3.30 – Amostras preparadas para a realização das análises MEV

As análises foram realizadas no Centro de Microscopia da UFMG com utilização de um microscópio eletrônico de varredura com feixe duplo da marca Quanta modelo FEG 3D FEI. Foram adotadas tensões de aceleração da ordem de 15 a 20 kV, spot de 6,5 e distância de trabalho, entre a lente e a amostra, de 10 mm.

O equipamento utilizado conta ainda com um sistema acoplado de espectrometria de dispersão de energia (EDS) modelo Pegasus capaz de gerar imagens da microestrutura da ordem de microns e identificar os elementos químicos presentes na amostra.

As imagens foram geradas por meio de detectores de elétrons secundários, que fornecem imagens de alta resolução da topografia da superfície da amostra, e de elétrons retroespalhados, que fornecem imagens características de variação da composição. A Figura 3.31 apresenta o equipamento utilizado nas análises.



Figura 3.31 - Microscópio eletrônico de varredura de feixe duplo - Quanta FEG 3D FEI

### 3.4 Análise estatística dos resultados

As unidades amostrais, representadas pelos diversos corpos de prova, foram submetidos aos ensaios propostos neste capítulo e após a devida obtenção e compilação dos resultados obtidos em cada um destes, foram realizadas as análises estatísticas dos dados, as quais objetivaram verificar a significância e a representatividade destes, correlacionando as informações e comparando as respostas obtidas em relação a vários quesitos tais como os diferentes teores de escória e as classes de qualidade de concreto utilizadas.

As principais variáveis respostas estudadas consistiram em: “resistência à compressão axial”, “resistência à tração por compressão diametral”, “absorção de água”, “índice de vazios”, “massa específica”, “absorção de água por capilaridade”, “migração de íons de cloreto” e “resistividade elétrica”.

A verificação isolada de como cada um dos quesitos influenciou nas variáveis respostas estudadas, bem como as comparações múltiplas envolvendo os diversos quesitos foram efetuadas com utilização de técnicas estatísticas de planejamento de experimento.

#### *- Metodologia das análises estatísticas*

Com vistas à averiguação dos efeitos de alguns quesitos nas distintas variáveis respostas analisadas, foram implementados diferentes modelos estatísticos fatoriais, tais como os modelos de dois fatores com interações e o de três fatores com interações, os quais estão apresentados nas Equações 3.11 e 3.12, respectivamente.

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + e_{ijk} \quad \text{Eq. 3.11}$$

$$Y_{ijkh} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + e_{ijkh} \quad \text{Eq. 3.12}$$

Onde:

$Y$  = variável resposta de interesse;

$\mu$  = efeito global;

$\tau_i, \beta_j, \gamma_k$  = efeito dos níveis dos fatores na variável resposta;

$(\tau\beta)_{ij}, (\tau\gamma)_{ik}$  = combinações dos efeitos das interações entre os níveis dos fatores;

$e$  = erro aleatório inerente ao experimento e que, por suposição, deve ser independente e normalmente distribuído com média igual a 0 e uma variância constante (homocedástico).

Em alguns casos analisados, a suposição de homocedasticidade dos resíduos, isto é, da variância constante dos erros experimentais para observações distintas foi violada. Nestes casos, a correção do modelo estatístico consistiu na utilização do Método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MMQP), sendo o peso adotado igual ao inverso do quadrado dos valores preditos do modelo em que a variável resposta é o módulo do resíduo do modelo

inadequado. Dessa forma, obteve-se, para estes casos, regressões lineares ponderadas para os dados analisados. Em outros casos, foram necessárias transformações nas variáveis respostas para a correção da não normalidade dos resíduos.

Para as análises descritivas foram produzidos gráficos do tipo *boxplot*, que representa a variação de dados observados para a variável analisada, e do tipo *violinplot*, que acrescenta ao gráfico anterior uma estimativa da densidade de probabilidade dos dados. A escolha dos modelos e a análise dos resíduos foram verificados por intermédio de testes paramétricos conhecidos como análise de variância ANOVA, os quais buscam verificar a existência de diferenças entre as médias de uma determinada variável (variável resposta) em relação a um tratamento com dois ou mais níveis categóricos (variável preditora).

As comparações múltiplas envolvendo os diversos quesitos foram efetuadas por meio da utilização do Teste de Tukey, o qual permite a realização de comparações, duas a duas, entre os níveis dos fatores cujos efeitos considerados são significantes. Este teste foi adotado por ser adequado às análises necessárias e por ser bastante rigoroso e de fácil aplicação.

As análises foram realizadas com a utilização do Sistema Estatístico R, o qual disponibiliza uma ampla variedade de técnicas estatísticas e gráficas, incluindo modelação linear e não linear, testes estatísticos clássicos, análise de séries temporais, entre outros recursos. As análises estatísticas relativas aos ensaios de resistividade elétrica do concreto foram realizadas com a utilização do software Minitab. Em todos os casos, as diferenças entre as variáveis respostas foram consideradas significativas quando  $p < 0,05$ .

### 3.5 Apresentação das medidas e das suas incertezas

Uma vez que em todo processo de medida experimental incorporam-se erros estatísticos, que afetam desordenadamente as medidas, os resultados obtidos ao longo das sucessivas determinações realizadas ao longo deste trabalho foram tomados como o valor mais provável para cada série de medidas, isto é, como a média aritmética das mensurações realizadas, calculadas de acordo com a Equação 3.13.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Eq. 3.13

Onde:

$n$  = número total de medições realizadas na série;

$x_i$  = valor aferido em cada medição sucessiva;

$\bar{x}$  = média aritmética dos valores aferidos em cada medição.

Por sua vez, o erro de uma medida indica a maior diferença esperada entre o valor mais provável e o valor efetivamente medido. Dessa forma, o erro médio absoluto das medidas, calculado por meio da Equação 3.14, é a média dos módulos das diferenças algébricas entre as medidas sucessivas e a da média aritmética, como mostra a Equação 3.15. O erro médio absoluto é apresentado, ordinariamente, com apenas um algarismo significativo.

$$\Delta\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta x_i| \quad \text{Eq. 3.14}$$

$$\Delta x_i = \bar{x} - x_i \quad \text{Eq. 3.15}$$

Onde:

$\Delta\bar{x}$  = erro médio absoluto das medidas;

$\Delta x_i$  = diferença algébrica entre a medida e a média aritmética de todas as medidas da série.

# 4

## APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos com a realização dos ensaios propostos no plano experimental do presente trabalho.

Os concretos produzidos, para atendimento de duas distintas classes de qualidade e concebidos com a utilização de cimentos Portland especiais contendo diferentes teores de substituição de clínquer por escória de alto forno, tiveram seus desempenhos comparados quanto às suas características mecânicas, físicas e de durabilidade.

Consoante com as informações apresentadas no capítulo anterior, as propriedades mecânicas dos concretos estudados foram avaliadas por meio dos ensaios de determinação da resistência à compressão axial e da tração por compressão diametral. Outras propriedades, tais como a absorção de água por capilaridade, a absorção de água por imersão, o índice de vazios e as massas específicas também foram investigadas. Além disso, características diretamente relacionadas com a durabilidade dos concretos foram apuradas mediante a medição da resistividade elétrica e determinação da resistência à penetração de cloretos, sendo esta última obtida por meio de ensaio acelerado de migração em estado não estacionário. Todos os ensaios foram realizados em corpos de prova cilíndricos com dimensões de (10 x 20) cm.

Ademais, análises microestruturais dos concretos produzidos foram realizadas por meio da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em amostras criteriosamente extraídas de corpos de prova após serem submetidos ao ensaio acelerado de migração de cloretos.

Ressalta-se que os resultados apresentados neste capítulo estão acompanhados pelas suas respectivas incertezas de modo a exprimir o desvio esperado das medidas em relação ao seu valor mais provável. Sendo assim, os valores apresentados foram calculados com base na

técnica do erro médio absoluto, isto é, pela média dos módulos das diferenças entre a medida realizada e a média dessas medidas, conforme metodologia apresentada na seção 3.5.

Todas as incertezas são apresentadas com apenas 1 algarismo significativo, forçando o ajuste do número de casas decimais das medidas. Sendo assim, as sequências de dados são apresentadas com diferentes casas decimais, representando a grandeza da dispersão das medidas encontradas para cada um dos ensaios.

Além disso, salienta-se que as classes de agressividade ambiental, apresentadas no capítulo anterior, serão doravante denominadas de classes de qualidade ou meramente por classe a fim de facilitar o entendimento dos resultados obtidos e propiciar maior fluidez as discussões.

#### 4.1 Avaliação da consistência dos concretos no estado fresco

As consistências dos concretos produzidos foram avaliadas, no estado fresco, por meio do método de determinação do abatimento do tronco de cone (*slump test*) normatizado pela NBR NM 67 (ABNT, 1998). A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 4.1 - Resultados dos ensaios de consistência dos concretos

<b>Traço</b>	<b>Relação água/aglomerante</b>	<b>Abatimento do tronco de cone (cm)</b>
TE00C2		8 ± 1
TE30C2	0,60	10,0 ± 0,5
TE60C2		10 ± 1
TE00C3		7,5 ± 0,5
TE30C3	0,55	7,5 ± 0,5
TE60C3		8 ± 1

Constatou-se que todos os concretos produzidos apresentaram consistências, no estado fresco, dentro dos limites pré-estabelecidos na etapa de concepção apresentada no capítulo anterior, o

que possibilitou a obtenção de concretos com a trabalhabilidade requerida para as moldagens dos corpos de prova.

## 4.2 Resistência à compressão axial

O comportamento mecânico dos concretos, no estado endurecido, foi avaliado por meio dos ensaios de determinação da resistência à compressão axial, conforme prescrito pela NBR 5739 (ABNT, 2018).

Estes ensaios foram realizados com o objetivo de investigar a influência do teor de substituição de cimento Portland por escória de alto forno nesta propriedade, bem como de verificar o enquadramento dos concretos de referência (TE00C2 e TE00C3) nas classes de agressividade ambiental II e III da NBR 6118 (ABNT, 2014).

A Tabela 4.2 e a Figura 4.1 apresentam os resultados obtidos pela média de três corpos de prova, por idade, ensaiados à compressão axial aos 7, 28 e 91 dias.

Tabela 4.2 - Resultados do ensaio de resistência à compressão

<b>Traço</b>	<b>f<sub>c</sub> - 7 dias</b> <b>(MPa)</b>	<b>f<sub>c</sub> - 28 dias</b> <b>(MPa)</b>	<b>f<sub>c</sub> - 91 dias</b> <b>(MPa)</b>
TE00C2	23 ± 1	31 ± 1	34 ± 1
TE30C2	14,1 ± 0,6	21,5 ± 0,7	26 ± 1
TE60C2	7,8 ± 0,7	14,4 ± 0,6	24,3 ± 0,4
TE00C3	28,1 ± 0,5	32 ± 2	36,5 ± 0,5
TE30C3	17,6 ± 0,3	23,3 ± 0,9	32,5 ± 0,9
TE60C3	9,8 ± 0,6	19 ± 1	26,3 ± 0,5

Diante dos resultados ora apresentados, constatou-se, em todos os traços analisados, uma redução da resistência à compressão com a substituição parcial do cimento Portland por escória de alto forno para uma mesma idade e classe de qualidade, sendo que o aumento do

teor de substituição implicou em uma diminuição mais expressiva desta resistência, isto é, os concretos com utilização de 60% de escória obtiveram uma resistência menor do que os concretos com 30% de escória, assim como estes últimos apresentaram resistências menores do que os concretos de referência.

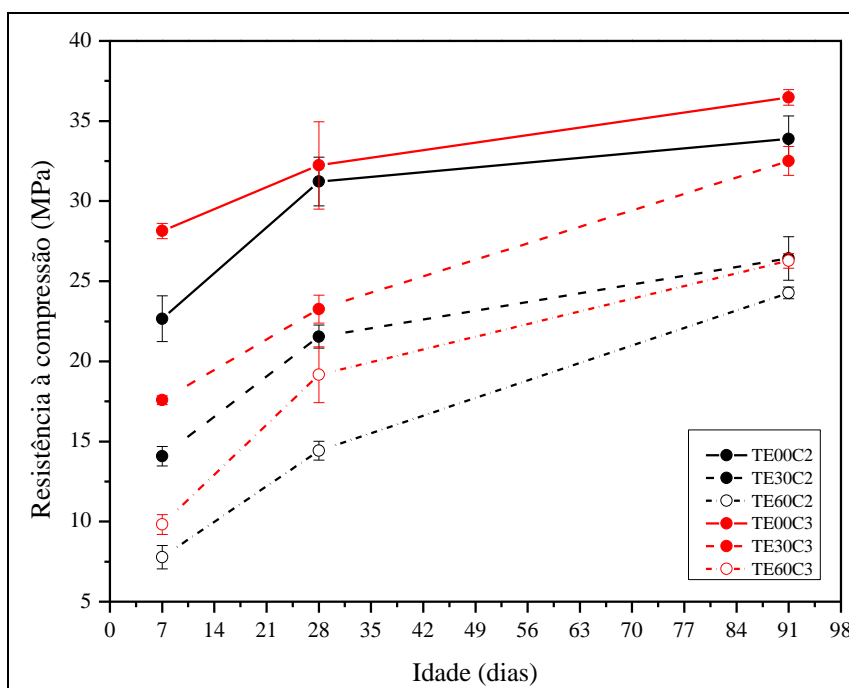


Figura 4.1 - Evolução das resistências à compressão com o avanço da idade

Na primeira idade analisada, aos 7 dias, as substituições parciais de 30% e 60% do cimento Portland por escória de alto forno representaram, respectivamente, reduções de 38% e 65% nas resistências à compressão, para as duas classes de qualidade de concreto analisadas.

Aos 28 dias, as substituições parciais de 30% de cimento Portland por escória de alto forno acarretaram reduções de 31% e 28% nas resistências à compressão, para a classe II e III, respectivamente. Quando o teor de escória foi aumentado para 60%, as reduções nas resistências à compressão, em relação aos respectivos concretos de referência, foram amplificadas para 54% na classe II e 41% para a classe III.

Por fim, aos 91 dias, foram observadas reduções de 22% e 10% nas resistências à compressão pela utilização de 30% de escória em concretos da classe II e III, respectivamente. Para ambas as classes de qualidade, reduções de 28% nas resistências se deram quando utilizou-se 60% de substituição de cimento Portland por escória de alto forno.

Posto isto, apesar das reduções observadas, notou-se que, com a evolução do processo de hidratação, as diferenças entre as resistências dos concretos de referência, sem adições (TE00), e dos demais concretos, com as adições de escória (TE30 e TE60), diminuíram para uma mesma idade, indicando, em vista disso e das características dos cimentos utilizados (CP30 e CP60), que estes concretos ainda apresentavam significativa capacidade de ganho de resistência na última idade analisada. Nesta perspectiva, Choi, Kim e Choi (2017) verificaram que as resistências à compressão dos concretos, por eles estudados, diminuíram com o aumento do teor de adição de escória de alto forno nas idades precoces, enquanto que, em idades avançadas, estas superaram as resistências dos concretos de referência quando utilizou-se até 65% de escória.

Ainda neste contexto, salienta-se que, embora o comportamento observado em relação a influência da adição de escória de alto forno nas resistências à compressão dos concretos fosse esperado em função dos aspectos mencionados na seção 2.3.4.2, as reatividades dos cimentos utilizados podem ter sido aditivamente afetadas pela diferença de finura verificada entre o cimento sem escória (CP00) e os com adição de escória (CP30 e CP60).

Constatou-se também os desempenhos dos concretos produzidos se deram em conformidade com a chamada Lei de Abrams, segundo a qual o aumento da relação água/cimento resulta em uma menor resistência à compressão. De fato, os concretos produzidos de acordo com os critérios estabelecidos para a classe de agressividade ambiental III ( $a/c = 0,55$ ) apresentaram resistências à compressão maiores do que os concretos da classe II ( $a/c = 0,60$ ), em todos os cenários analisados para uma mesma idade e teor de utilização de escória de alto forno. Contudo, a adoção de uma relação água/cimento maior, isto é, de uma classe de qualidade menos restritiva acarretou em menores efeitos sobre as resistências à compressão quando comparados àqueles advindos da adição de escória de alto forno.

#### *- Análise estatística dos resultados de resistência à compressão axial*

Para a realização das análises estatísticas dos resultados de resistência à compressão axial, considerou-se como fatores intervenientes a idade de ensaio, a classe de qualidade dos concretos e o teor de escória utilizado na mistura, bem como as interações entre eles.

A apresentação das análises estatísticas descritivas, realizadas para os resultados de todos os ensaios do plano experimental do presente trabalho, utilizou-se de gráficos do tipo *boxplot* e do tipo *violinplot*, como descrito na seção 3.4.1. As Figuras 4.2 e 4.3 exibem, respectivamente, estes gráficos para as análises realizadas, nos níveis de cada um dos fatores considerados, para os resultados de resistência à compressão.

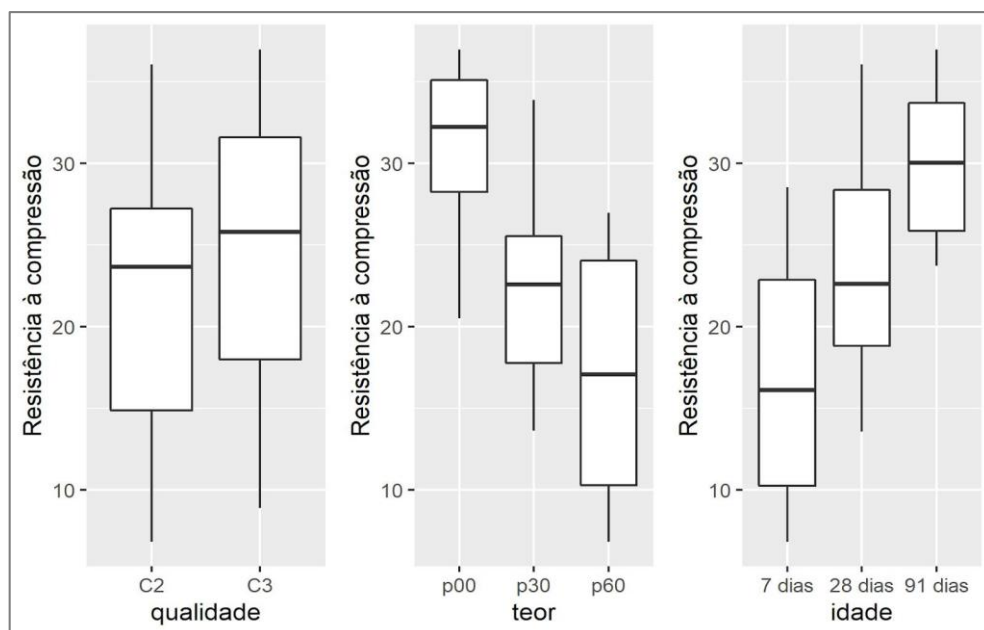


Figura 4.2 - *Boxplots*, nos níveis dos fatores, dos resultados de resistência à compressão axial

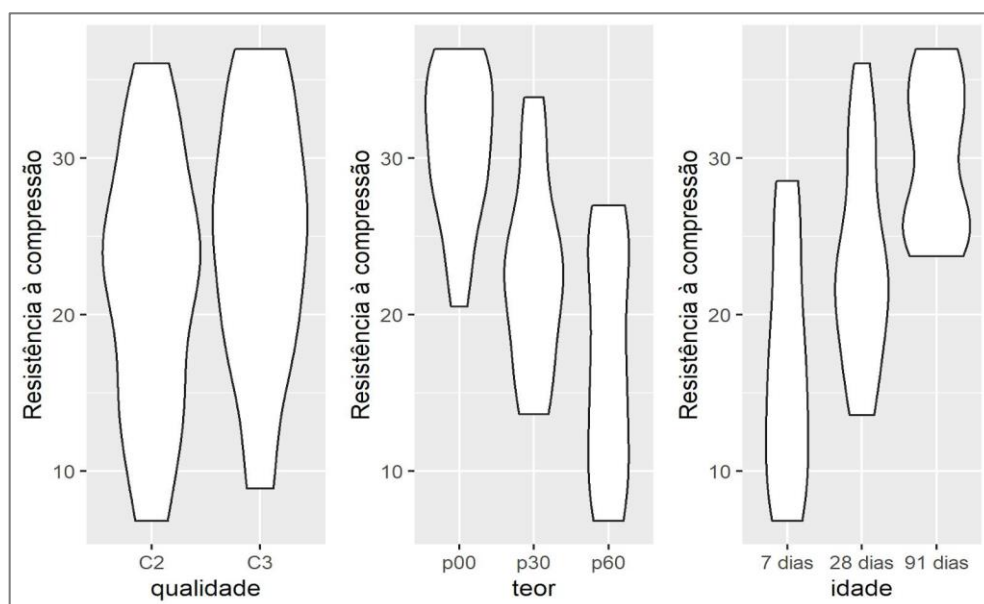


Figura 4.3 - *Violinplots* dos resultados de resistência à compressão nos níveis dos fatores

Quando os valores de resistência são tratados em função dos fatores considerados, fica notória a forma como cada um deles influi sobre os resultados observados. Consta-se que as resistências são sutilmente maiores nos concretos da classe de qualidade III em relação aos da classe II. No que concerne ao teor de substituição de cimento por escória de alto forno, observa-se um decaimento dos valores de resistência à compressão no sentido da sequência 0%, 30%, 60%, sendo a diminuição observada de 0% para 30% maior do que a de 30% para 60%. Já em relação ao fator idade, há um crescimento dos valores de resistências à compressão com o avanço do tempo, isto é, na sequência 7, 28, 91 dias.

Não identificou-se, no gráfico *boxplot* apresentado na Figura 4.2, a presença de *outliers*. O Método de Mínimos Quadrados Ponderados (MMQP) foi utilizado para correção da heterocedasticidade que se apresentou durante o ajuste do modelo fatorial com três fatores, não sendo necessário aplicar nenhuma transformação na variável resposta. Com isso, o modelo adotado mostrou-se adequado para as análises, sendo os resíduos considerados normais ( $p$ -valor = 0,1123), como está apresentado no Apêndice A. Além disso, não observou-se indícios visuais de heterocedasticidade e de autocorrelação.

Tabela 4.3 - Análise de variância do modelo estatístico aplicado aos resultados de resistência à compressão

Variável	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Soma dos quadrados médios	F	p-valor
Idade	2	3856	1927,9	1035,872	< 0,001
Teor	2	4056	2028,2	1089,788	< 0,001
Classe	1	183	183,2	98,431	< 0,001
Interação entre idade e teor	4	280	70,1	37,650	< 0,001
Interação entre idade e classe	2	4	2,2	1,202	0,311
Interação entre teor e classe	2	7	3,5	1,903	0,163
Interação entre teor, idade e classe	4	30	7,4	3,977	0,008
Resíduo	38	71	1,9		

A Tabela 4.3 apresenta a análise de variância ANOVA para o modelo estatístico adotado, a qual permite observar que todos os fatores foram significativos a 5% de significância para

explicar os valores de resistência à compressão. Constatou-se que o teor de escória de alto forno é o fator que mais explica a variabilidade dos dados, seguido pela idade e classe de qualidade dos concretos. As interações entre os fatores idade e teor de escória, assim como a interação entre os três fatores analisados também foram significativas a 5% de significância. Dessa forma, há indícios de que os fatores se interagem de alguma forma, e por isso, procedeu-se a análise de comparações múltiplas entre os seus níveis, fixando-se os níveis dos outros fatores considerados. Os resultados destas comparações estão detalhadamente apresentados no curso do Apêndice B, sendo graficamente retratados nas Figuras 4.4 a 4.6.

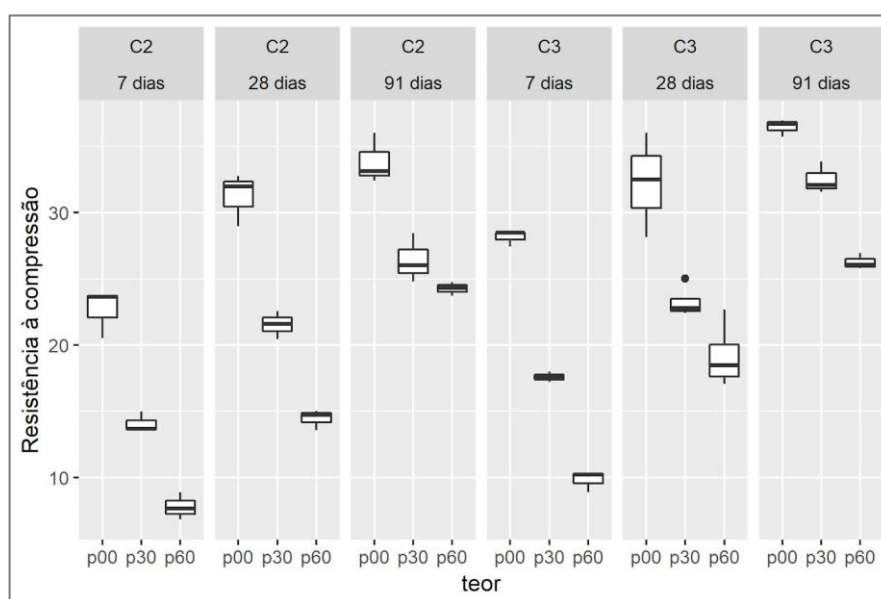


Figura 4.4 - Boxplots dos teores de escória com os níveis dos demais fatores fixados

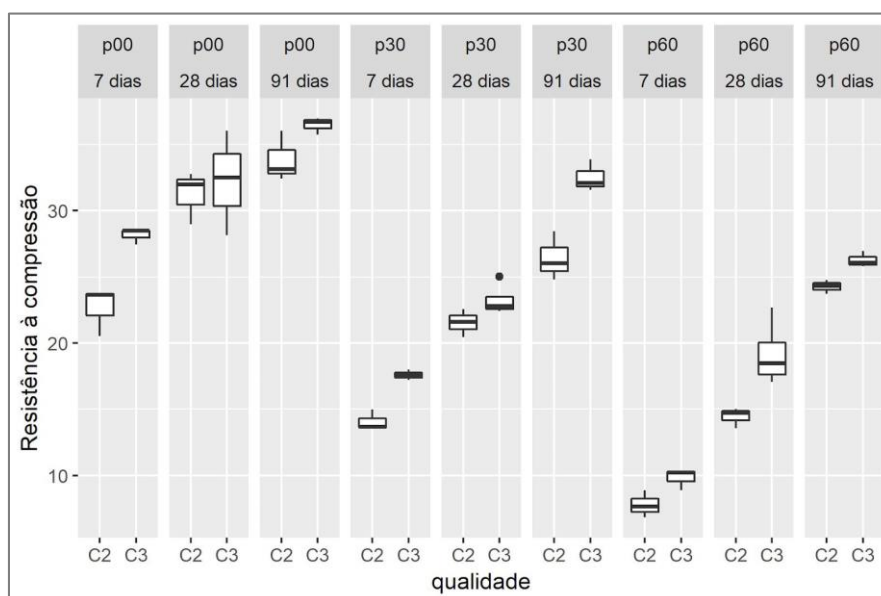


Figura 4.5 - Boxplots das classes com os níveis dos demais fatores fixados

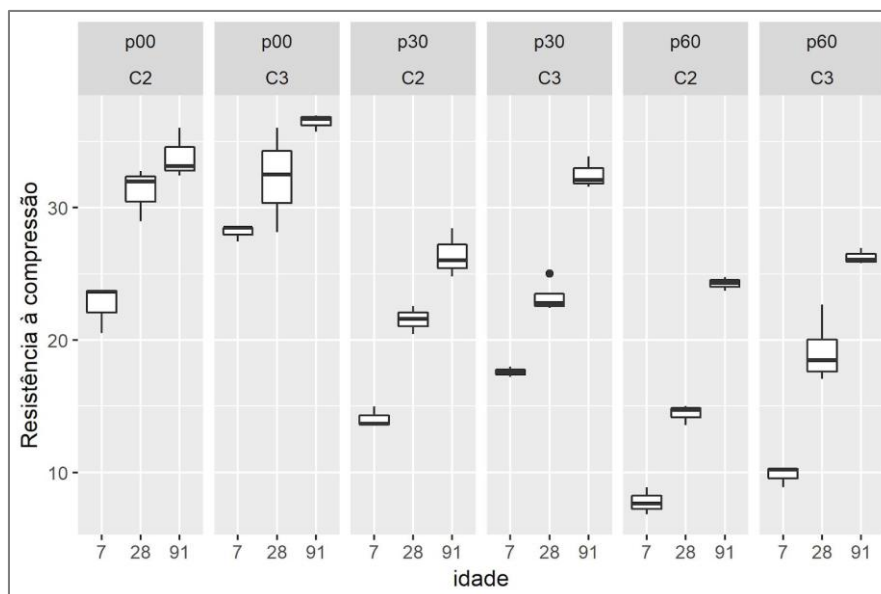


Figura 4.6 - Boxplots das idades com os níveis dos demais fatores fixados

A análise de comparações múltiplas permite a observação da influência isolada de cada um dos fatores considerados. A apreciação destes dados, apresentados nas Figuras 4.4 a 4.6, evidenciou que, para todos os fatores considerados, o comportamento dos valores de resistência se manteve constante quando os níveis dos demais fatores considerados foram mantidos constantes, isto é, quando tais fatores foram tratados de maneira isolada.

Atestou-se que, para todos os casos analisados, a resistência à compressão dos concretos diminuiu com o aumento do teor de substituição de cimento Portland por escória de alto forno, sendo a diferença entre as resistências dos traços de referência (TE00) e com adição (TE30 e TE60) reduzidas à medida que a idade dos concretos avança.

No tocante ao fator classe de qualidade, a maioria das comparações múltiplas entre os fatores indicaram que este é um fator significativo a 5% de significância. Os concretos da classe II apresentaram maiores resistências à compressão do que os da classe III em todos os casos analisados e quando os níveis dos demais fatores considerados foram fixados.

Em relação ao fator idade, verificou-se que a maioria das comparações múltiplas efetuadas apontaram que este fator é significativo a 5% de significância. O avanço da idade dos concretos acarretou, em todos os casos, no aumento da resistência à compressão, sendo tal diferença potencializada nos concretos pertencentes à classe III em relação aos da classe II.

Neste sentido, a Figura 4.7 apresenta graficamente os valores preditos de resistência à compressão nos níveis dos fatores considerados.

Verificou-se que a variação do teor de substituição parcial de cimento Portland por escória de alto forno foi um fator efetivamente interveniente em todas as idades (7, 28 e 91 dias) e classes de qualidade de concreto (II e III) analisadas. É notório ainda o fato de que as diferenças de resistência à compressão entre os concretos com diferentes teores reduziram-se com o aumento da idade, indicando uma possível equiparação em uma idade mais avançada.

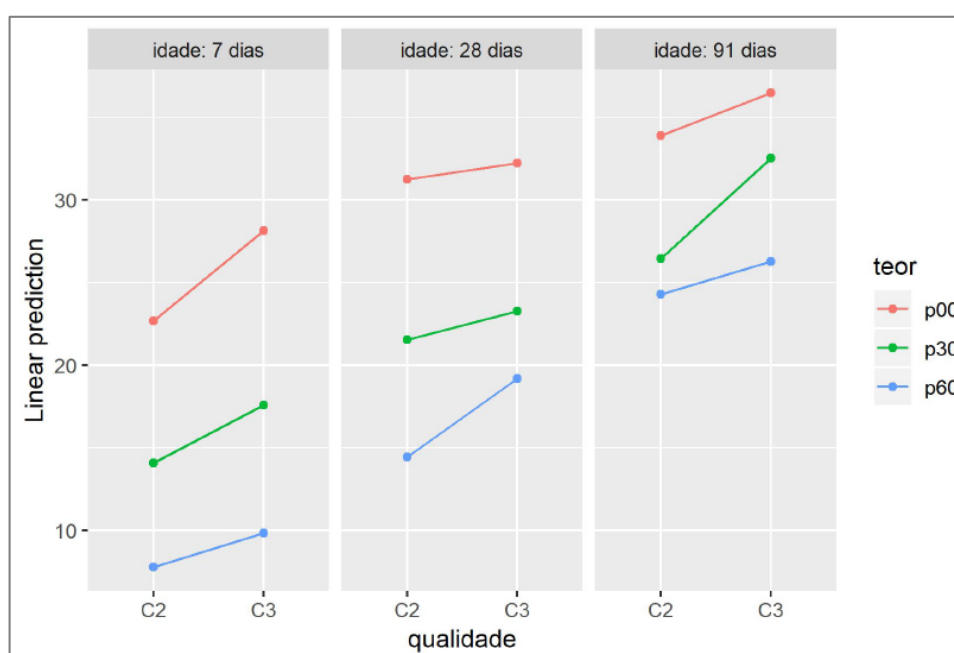


Figura 4.7 - Valores preditos de resistência à compressão nos níveis dos fatores

### 4.3 Resistência à tração por compressão diametral

Os concretos produzidos foram avaliados quanto as resistências à tração por compressão diametral por meio do procedimento de ensaio prescrito pela NBR 7222 (ABNT, 2010), também conhecido como ensaio de tração indireta.

A Tabela 4.4 apresenta os resultados obtidos pela média de três determinações por traço, sendo estas realizadas após os corpos de prova serem mantidos por 28 dias em cura saturada, e em seguida, por 3 dias em cura úmida.

Tabela 4.4 - Resultados da resistência à tração

Traço	$f_t$ (MPa)
TE00C2	$3,4 \pm 0,1$
TE30C2	$2,84 \pm 0,4$
TE60C2	$2,34 \pm 0,05$
TE00C3	$4,3 \pm 0,8$
TE30C3	$3,3 \pm 0,2$
TE60C3	$2,97 \pm 0,09$

A Figura 4.8 expõe graficamente os resultados médios de resistências à tração por compressão diametral obtidos nos ensaios realizados.

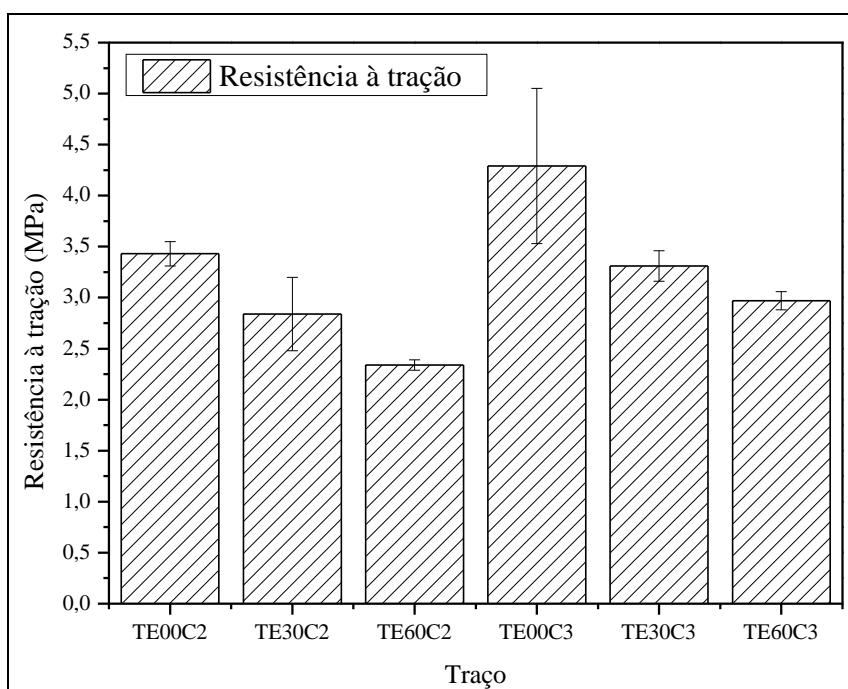


Figura 4.8 - Resultados das resistências à tração por compressão diametral

Os resultados apresentados apontam que a substituição parcial de cimento Portland por escória representou um decréscimo nas resistências à tração para as duas classes de qualidade analisadas. Quando comparados aos concretos de referência, sem adição de escória (TE00), os concretos com 30% (TE30) e 60% (TE60) de escória obtiveram resistências da ordem de 20%

e 30% menores, respectivamente. Além disso, verificou-se que, para a idade avaliada, o aumento do teor de substituição por escória representou uma queda mais significativa nas resistências à tração em relação aos concretos de referência, assim como ocorreu com as resistências à compressão axial.

Constatou-se também que os valores de resistência à tração foram maiores à medida que a relação água/cimento dos concretos foi reduzida, isto é, os concretos produzidos de acordo com os critérios estabelecidos para a classe III ( $a/c = 0,55$ ) apresentaram resistências à tração maiores do que os concretos da classe II ( $a/c = 0,60$ ), para todos os teores de substituição de cimento por escória de alto forno.

*- Análise estatística dos resultados de resistência à tração por compressão diametral*

A análise estatística dos resultados de resistência à tração por compressão diametral foi realizada por meio da implementação de um modelo de dois fatores com interação, os quais consistiram na classe de qualidade (II e III) e no teor de substituição de cimento por escória de alto forno (0%, 30%, 60%).

As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam, respectivamente, os gráficos *boxplots* e *violinplots*, que analisam os dados obtidos nos ensaios nos níveis dos fatores considerados.

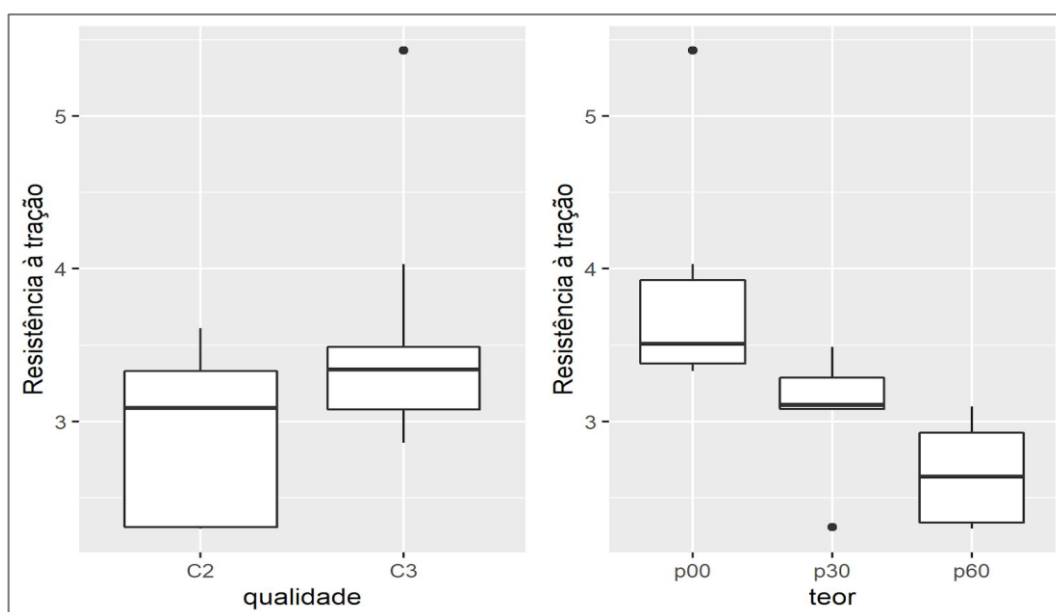


Figura 4.9 - *Boxplots*, nos níveis dos fatores, dos resultados de resistência à tração

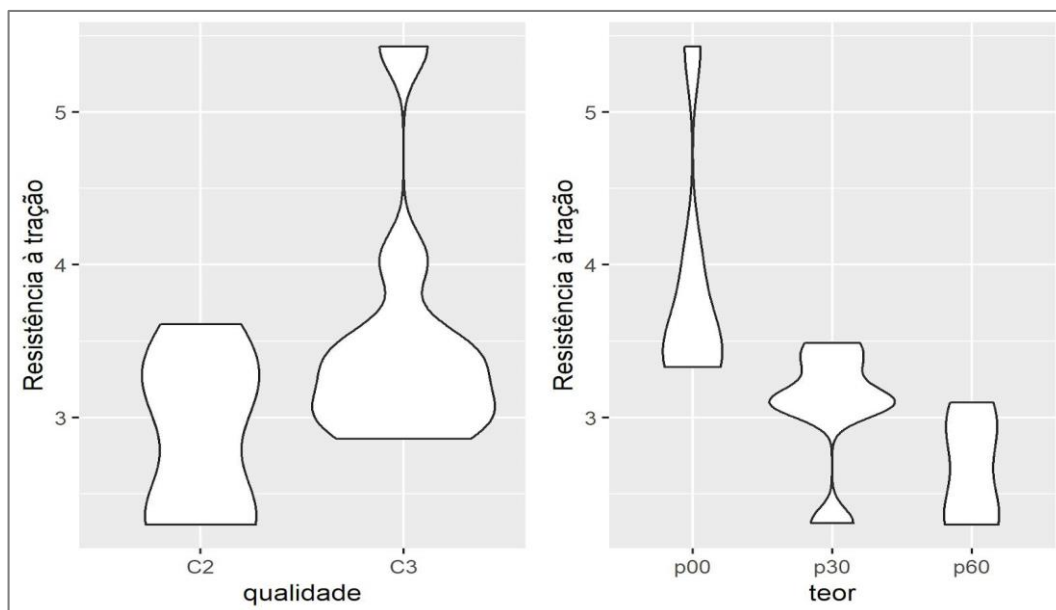


Figura 4.10 - Violinplots dos resultados de resistência à compressão, nos níveis dos fatores

Por meio das análises ora apresentadas, observou-se que os concretos pertencentes a classe III ( $a/c = 0,55$ ) apresentaram valores de resistência à tração mais elevados do que os da classe II ( $a/c = 0,60$ ) como era esperado. Ademais, percebeu-se uma boa estratificação na distribuição dos valores de resistência à tração entre os distintos níveis do fator teor de escória de alto forno, sendo as resistências reduzidas à medida que o nível deste fator aumentou.

Em função da presença de dois *outliers* nas análises, fez-se necessária a implantação de uma transformação na variável resposta. Além disso, a não normalidade dos resíduos foi corrigida por meio da utilização da variável na escala logarítmica e a heterocedasticidade verificada foi corrigida com a utilização do Método de Mínimos Quadrados Ponderados (MMQP). Com isso, o modelo estatístico adotado se mostrou adequado uma vez que a análise dos resíduos, após as transformações realizadas, indicou a ocorrência de homocedasticidade e a ausência de autocorrelação. O teste de Shapiro-Wilk para os resíduos não rejeitou a hipótese nula de normalidade a 5% de significância ( $p\text{-valor} = 0,1752$ ), entretanto, os ganhos oriundos das transformações foram consideráveis quando se comparou o modelo adotado com outro sem nenhuma transformação.

A Tabela 4.5 apresenta a análise de variância ANOVA para o modelo estatístico adotado, a qual mostrou que os dois fatores analisados apresentaram algum nível diferente de zero em

análise com 5% de significância, podendo os valores serem considerados significantes. O fator teor de escória de alto forno foi aquele que mais explicou a variabilidade dos dados.

Tabela 4.5 - Análise de variância do modelo estatístico aplicado aos resultados de resistência à compressão

Variável	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Soma dos quadrados médios	F	p-valor
Classe	1	82,540	82,540	45,312	< 0,001
Teor	2	300,900	150,450	82,596	< 0,001
Interação	2	0,960	0,480	0,265	0,772
Resíduo	14	1,820	0,130		

Em relação a interação entre os dois fatores, verificou-se que esta não é significativa visto que esta variável apresentou um *p-valor* elevado. Diante disso, as comparações múltiplas entre os fatores foram efetuadas de forma independente com a utilização da correção de Tukey, as quais estão detalhadamente explicitadas no curso do Apêndice B.

Constatou-se, por meio de tais comparações, que a diferença entre os níveis do fator classe de qualidade foi significativa a 5% de significância e que, assim sendo, as resistências à tração dos concretos da classe III são maiores do que os da classe II. No tocante ao fator teor de escória, averiguou-se que as diferenças entre os níveis de 0% e 30% e de 0% e 60% foram significativas a 5% de significância. Nesta mesma condição, a diferença obtida pela comparação entre os níveis de 30% e 60% não foi significativa, indicando que as resistências à tração, são maiores no nível 0% e não diferem entre os níveis 30% e 60% de escória, nas condições analisadas.

A Figura 4.11 apresenta graficamente os valores preditos de resistência à tração nos níveis dos fatores intervenientes considerados, a partir dos quais verificou-se que, na idade analisada, quanto menor o teor de escória de alto forno, maior foram as resistências à tração por compressão diametral. Além disso, observou-se que os concretos pertencentes a classe III apresentaram maiores resistências à tração em todos os cenários propostos.

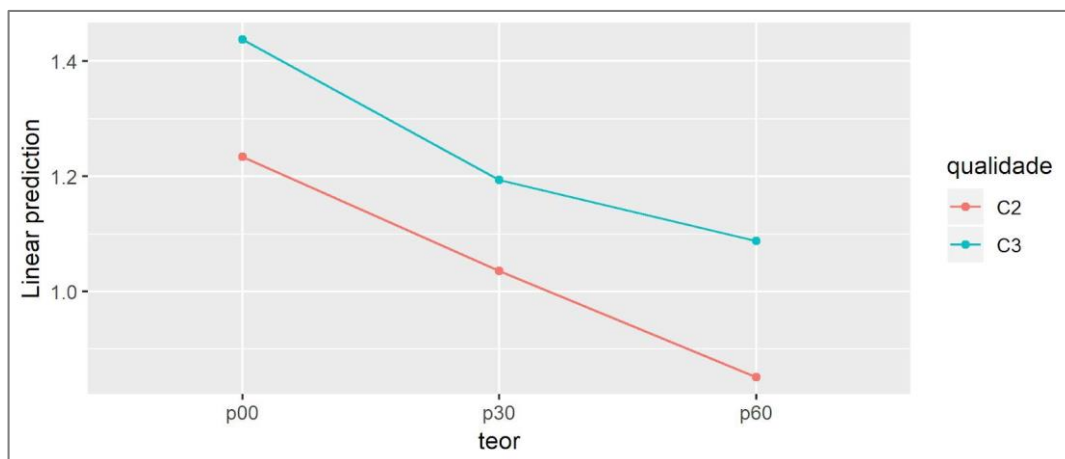


Figura 4.11 - Valores preditos de resistência à tração preditos nos níveis dos fatores

#### 4.4 Absorção por capilaridade

Os resultados obtidos por meio dos ensaios de absorção de água por capilaridade consistem em uma medição direta da quantidade de massa de água absorvida por unidade de área durante um determinado período de exposição.

A Tabela 4.6 e a Figura 4.12 apresentam os resultados médios de absorção de água por capilaridade obtidos após a exposição dos corpos de prova à lâmina d'água por intervalos de tempo de 3, 6, 24, 48 e 72 horas.

Tabela 4.6 - Média dos resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade

Traço	Relação água/cimento	Após 3 h (g/cm <sup>2</sup> )	Após 6 h (g/cm <sup>2</sup> )	Após 24 h (g/cm <sup>2</sup> )	Após 48 h (g/cm <sup>2</sup> )	Após 72 h (g/cm <sup>2</sup> )
TE00C2		0,27 ± 0,01	0,39 ± 0,02	0,78 ± 0,03	1,09 ± 0,03	1,32 ± 0,04
TE30C2	0,60	0,27 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,70 ± 0,02	0,91 ± 0,03	1,05 ± 0,03
TE60C2		0,23 ± 0,04	0,32 ± 0,05	0,58 ± 0,09	0,76 ± 0,12	0,9 ± 0,1
TE00C3		0,24 ± 0,01	0,36 ± 0,02	0,75 ± 0,05	1,05 ± 0,06	1,25 ± 0,08
TE30C3	0,55	0,22 ± 0,01	0,31 ± 0,02	0,57 ± 0,05	0,76 ± 0,07	0,88 ± 0,08
TE60C3		0,17 ± 0,01	0,23 ± 0,01	0,41 ± 0,03	0,52 ± 0,04	0,60 ± 0,05

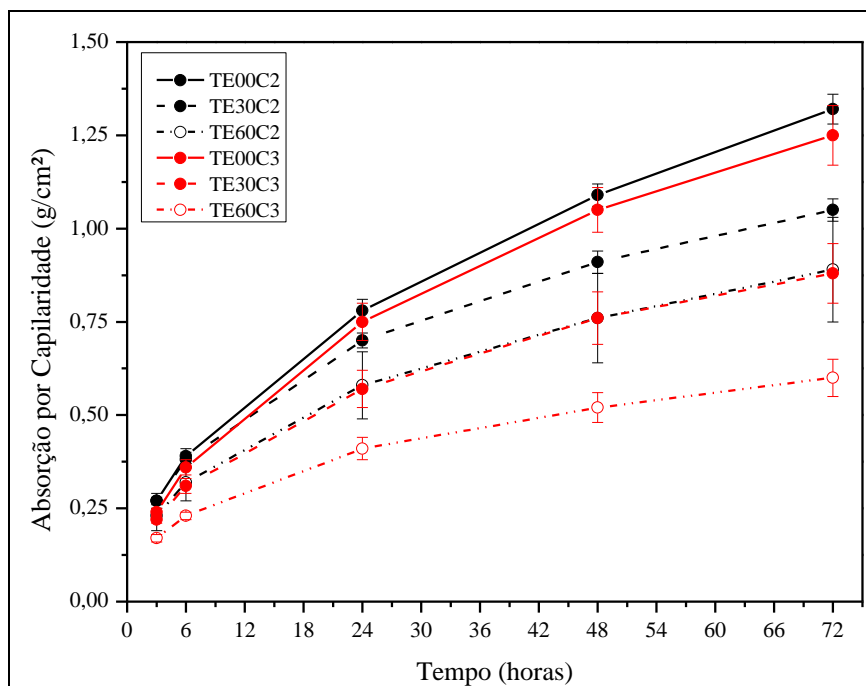


Figura 4.12 - Resultados de absorção por capilaridade com o avanço do tempo

Os traços de concreto com substituição de cimento Portland por escória (TE30 e TE60) apresentaram menores absorções de água por capilaridade, em todos os intervalos de tempo e para as duas classes analisadas, quando comparados aos traços de referência, sem adição de escória (TE00). Ocorre que, como observado nas literaturas consultadas e apresentadas no capítulo 2, a adição de escória de alto forno provoca um refinamento da estrutura de poros da pasta de cimento hidratada, que diminui a porosidade e dificulta o deslocamento de água no interior do concreto.

Além disso, verificou-se, para as duas classes de qualidade e após todos os períodos de exposição estudados, que o aumento do teor de escória incorporada acarretou em uma diminuição mais expressiva nas absorções de água por capilaridade, e assim sendo, tanto o aumento do teor de escória de 0% para 30% quanto o de 30% para 60% provocaram reduções efetivas na absorção de água.

Decorridas 72 horas de exposição, os concretos pertencentes à classe II ( $a/c = 0,60$ ) com adição de 30% e 60% de escória em substituição parcial ao cimento Portland apresentaram reduções na absorção de água por capilaridade de cerca de 20% e 33%, respectivamente. Já os concretos da classe III tiveram reduções da ordem de 29% e 52%, respectivamente, quando comparados ao concreto de referência, sem adição de escória.

A redução da relação água/cimento também mostrou-se um fator gerador de redução da absorção de água por capilaridade uma vez que os concretos produzidos de acordo com os critérios estabelecidos para a classe de agressividade ambiental III ( $a/c = 0,55$ ) apresentaram absorções significativamente menores do que os concretos pertencentes à classe II ( $a/c = 0,60$ ) quando comparados os concretos com o mesmo teor de escória e após um mesmo intervalo de exposição dos corpos de prova à lamina d'água.

Todavia, a redução da relação água/cimento representou uma diminuição de cerca de 5%, 16% e 32%, respectivamente, das absorções de água por capilaridade nos concretos com 0%, 30% e 60% de escória de alto forno, e dessa forma, estas foram menos expressivas do que àquelas advindas puramente da substituição parcial de cimento Portland por escória de alto forno.

*- Análise estatística dos resultados de absorção por capilaridade*

O estudo estatístico dos resultados obtidos pela realização dos ensaios de absorção de água por capilaridade considerou a interveniência de três fatores, a saber: teor de escória (0%, 30%, 60%), classe de qualidade (II e III) e tempo de exposição (3, 6, 24, 48 e 72 horas), resultando em um banco de dados com um total de 180 observações.

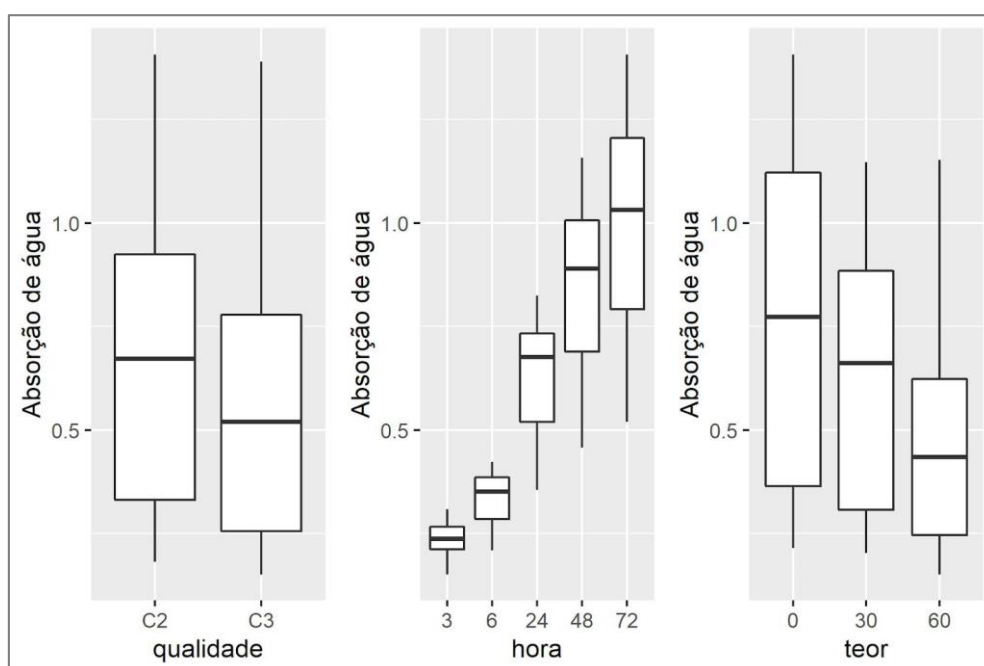


Figura 4.13 - *Boxplots*, nos níveis dos fatores, dos resultados de absorção por capilaridade

Os gráficos *boxplots* e *violinplots* apresentam as análises realizadas nos níveis dos fatores considerados e estão apresentados, respectivamente, nas Figuras 4.13 e 4.14.

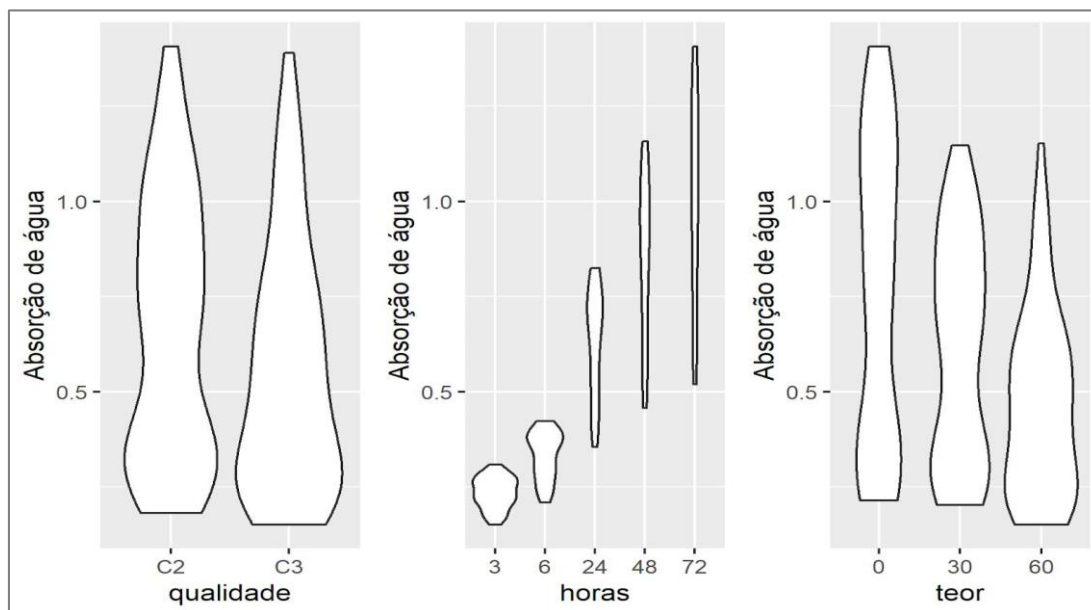


Figura 4.14 - *Violinplots* dos resultados de absorção de água por capilaridade nos níveis dos fatores

O modelo estatístico mais adequado à análise em questão foi obtido por meio de uma transformação exponencial ( $x^{0,05}$ ) da variável resposta. Ademais, não foram consideradas interações entre os fatores intevenientes admitidos e a normalidade dos resíduos não foi rejeitada à 1% de significância.

A Tabela 4.7 apresenta a análise de variância ANOVA para o modelo estatístico adotado, a qual apontou que os dois fatores analisados são significativos a 5% de significância.

Tabela 4.7 - Análise de variância do modelo estatístico aos resultados de absorção de água por capilaridade

Variável	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Soma dos quadrados médios	F	p-valor
Teor	2	0,013	0,006	163,9	< 0,001
Qualidade	1	0,003	0,003	97,5	< 0,001
Horas	4	0,124	0,031	769,7	< 0,001
Resíduo	172	0,006	< 0,001		

Uma vez que não houve interação entre os fatores, as comparações múltiplas foram realizadas sem a fixação do nível dos outros fatores, as quais estão detalhadamente apresentadas no Apêndice B. Tais comparações permitiram constatar que todos os níveis dos fatores são significativamente distintos entre si.

Com isso, verificou-se que o aumento do teor de escória de alto forno e a adoção de uma classe de qualidade do concreto mais restritiva (por exemplo, de II para III) implicou na diminuição da absorção de água por capilaridade. De outro modo, o aumento do período de exposição do concreto à lâmina d'água representou um considerável aumento desta variável resposta, como era previamente expectável.

#### 4.5 Absorção, índice de vazios e massa específica

A realização do ensaio normatizado pela NBR 9778 (ABNT, 2005) permitiu, após a realização de cura saturada dos corpos de prova por 28 dias, a avaliação das propriedades de absorção de água por imersão, do índice de vazios e das massas específicas dos seis traços de concretos produzidos. Os resultados obtidos consistem na média de duas determinações para cada traço de concreto avaliado e estão apresentados na Tabela 4.8 e nas Figuras 4.15 a 4.17.

Tabela 4.8 - Resultados da absorção de água por imersão, do índice de vazios e das massas específicas

Traço	Absorção de água por imersão (%)	Índice de vazios (%)	Massa Específica Seca (g/cm <sup>3</sup> )	Massa Específica Saturada (g/cm <sup>3</sup> )	Massa Específica Real (g/cm <sup>3</sup> )
TE00C2	6,2 ± 0,3	13,6 ± 0,5	2,19 ± 0,01	2,33 ± 0,01	2,53 ± 0,01
TE30C2	6,1 ± 0,5	13 ± 1	2,18 ± 0,01	2,31 ± 0,01	2,51 ± 0,03
TE60C2	5,0 ± 0,5	11 ± 1	2,21 ± 0,01	2,31 ± 0,01	2,48 ± 0,03
TE00C3	5,6 ± 0,4	12,3 ± 0,8	2,22 ± 0,01	2,35 ± 0,01	2,54 ± 0,02
TE30C3	5,0 ± 0,2	11,2 ± 0,4	2,24 ± 0,01	2,35 ± 0,01	2,52 ± 0,01
TE60C3	4,8 ± 0,4	10,8 ± 0,9	2,23 ± 0,01	2,33 ± 0,01	2,50 ± 0,02

Diante dos resultados acima expostos, constatou-se que a utilização da escória de alto forno em substituição parcial ao cimento Portland reduziu a absorção de água por imersão e o índice de vazios dos concretos nos quais foram incorporadas (TE30 e TE60), para todos os casos analisados, em comparação aos concretos de referência, sem adição de escória (TE00).

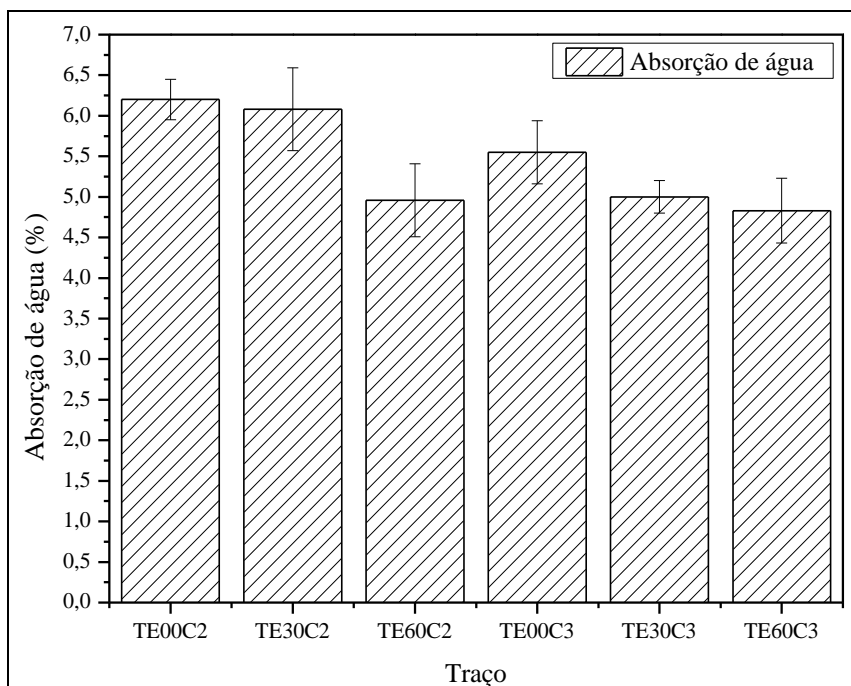


Figura 4.15 - Resultados das absorções de água por imersão

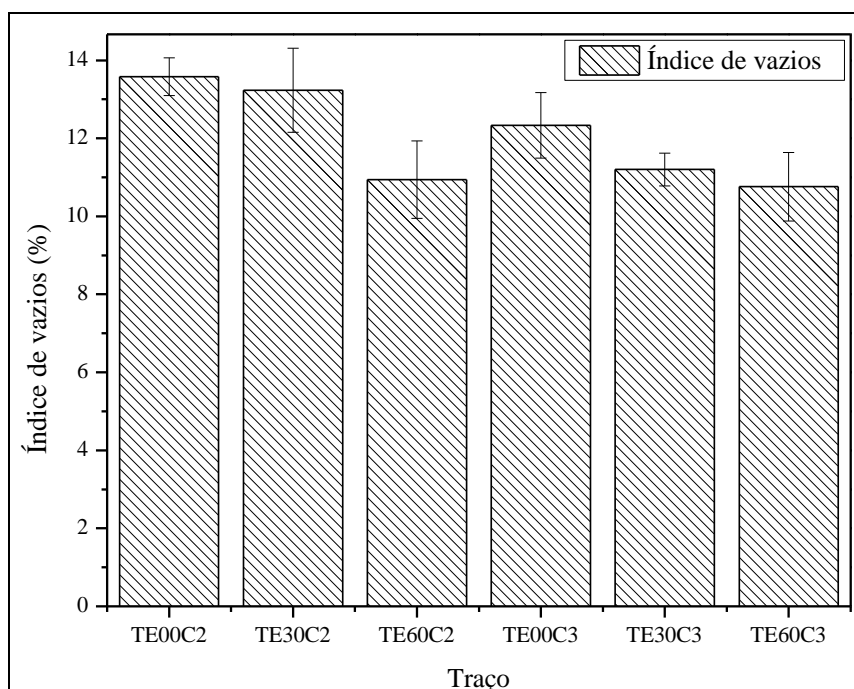


Figura 4.16 - Resultados dos índices de vazios

O aumento do teor de escória utilizado implicou, para as duas classes de qualidade analisadas, em reduções mais expressivas nas absorções de água por imersão e nos índices de vazios em comparação aos valores obtidos nos concretos de referência. Tais reduções, verificadas nos concretos com escória, estão diretamente relacionadas ao refinamento da estrutura de poros da pasta de cimento hidratada, consoante com a bibliografia apresentada na seção 2.3.4.2.

A redução da relação água/cimento foi também um fator gerador de diminuição destas propriedades visto que os concretos produzidos de acordo com os requisitos estabelecidos para a classe de agressividade ambiental III ( $a/c = 0,55$ ) apresentaram valores de absorção de água por imersão e de índice de vazios menores do que os concretos pertencentes à classe II ( $a/c = 0,60$ ), quando comparados os concretos com o mesmo teor de substituição de cimento por escória. Esta observação corrobora com o fato de que a redução da relação água/cimento dos concretos provoca uma conseqüente diminuição da porosidade da matriz cimentícia, dificultando o deslocamento de água no interior da rede de poros do concreto.

Neste sentido, quando comparados os concretos com mesmo teor de escória, a redução da relação água/cimento provocou também o aumento da massa específica real. Ocorre que esta relação está diretamente relacionada com a estrutura de poros do concreto e, dessa forma, a sua redução implica em uma matriz cimentícia mais densa, isto é, com uma maior massa específica real.

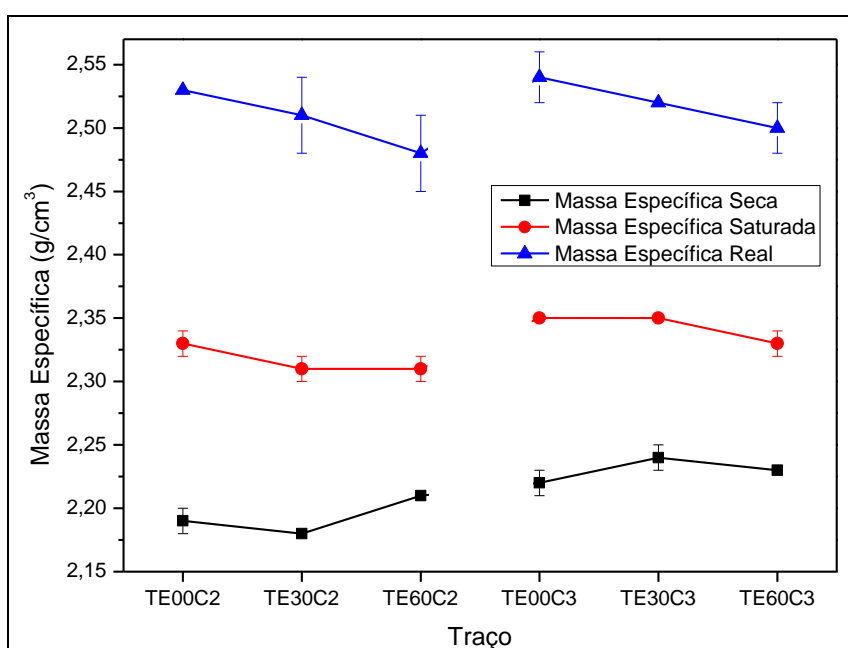


Figura 4.17 - Resultados das massas específicas seca, real e saturada

No que concerne à influência da escória nestas propriedades, verificou-se que o aumento do teor de substituição acarretou em uma diminuição das massas específicas real e saturada dos concretos analisados. Sucede-se que, apesar da adição de escória propiciar um refinamento da estrutura de poros, os valores obtidos para as massas específicas real e saturada dos concretos acompanharam o mesmo comportamento observado para os valores destas propriedades nos respectivos cimentos utilizados, isto é, os concretos com maior teor de escória apresentaram menores massas específicas.

- *Análise estatística dos resultados de absorção, índice de vazios e massa específica*

As análises estatísticas dos resultados obtidos por meio dos ensaios de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica consideraram como fatores intervenientes o teor de escória (0%, 30% e 60%) e a classe de qualidade dos concretos (II e III), produzindo um banco de dados composto por um total 12 observações para cada variável resposta.

*Absorção de água por imersão*

Os gráficos *boxplots* e *violinplots* gerados a partir da análise dos resultados dos ensaios de absorção de água por imersão estão apresentados nas Figuras 4.18 e 4.19, respectivamente.

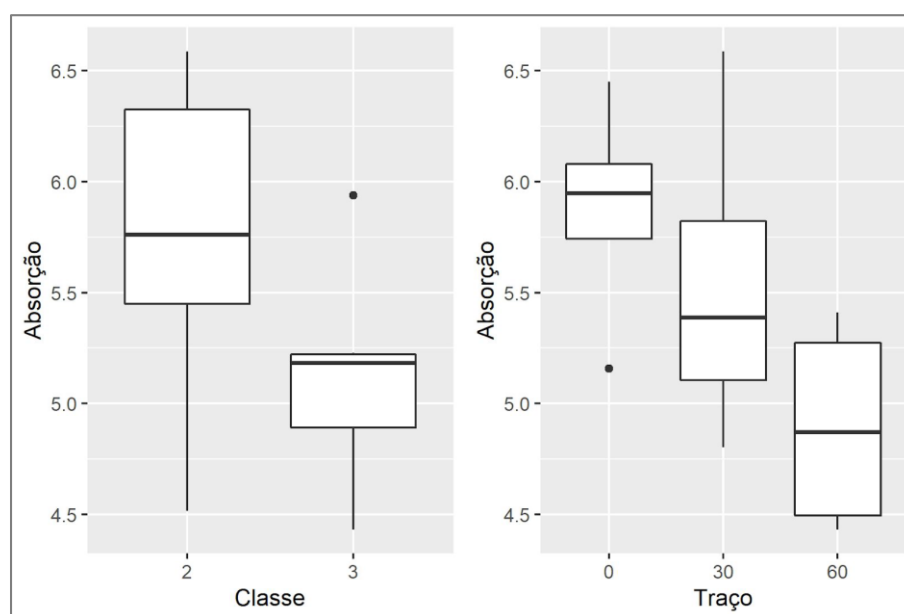


Figura 4.18 - *Boxplots* de absorção de água por imersão nos níveis dos fatores.

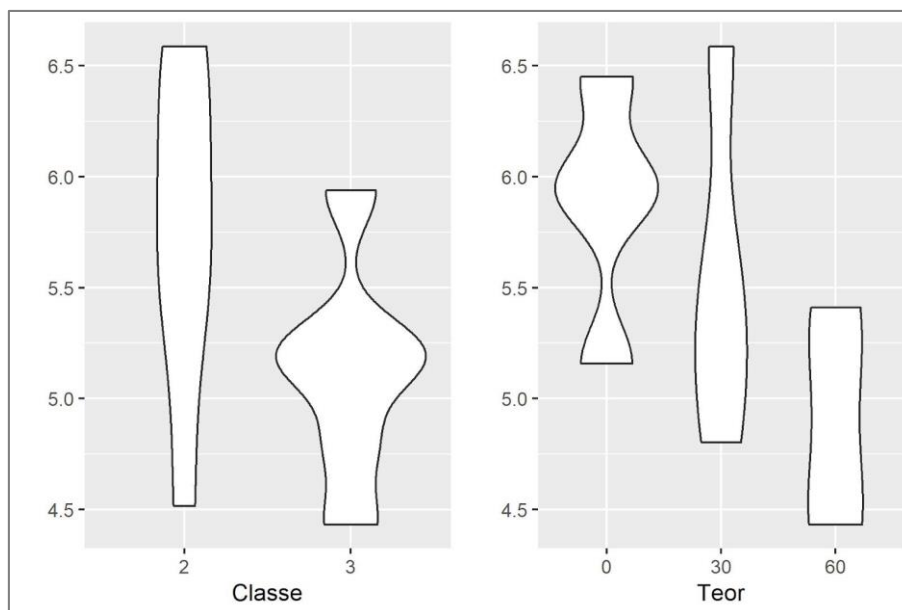


Figura 4.19 - Violinplots dos resultados de absorção de água nos níveis dos fatores

A Tabela 4.9 apresenta a análise de variância ANOVA para o modelo estatístico adotado, a qual apontou que os dois fatores analisados não são significativos a 5% de significância. Não foram consideradas interações entre os fatores e a normalidade dos resíduos não foi rejeitada para as condições estabelecidas.

Tabela 4.9 - Análise de variância do modelo estatístico aos resultados de absorção de água por imersão

Variável	Graus de liberdades	Soma dos quadrados	Soma dos quadrados médios	F	p-valor
Classe	1	1,15	1,15	4,21	0,074
Teor	2	1,98	0,99	3,61	0,076
Resíduos	8	2,19	0,27		

Uma vez que os fatores classe de qualidade e teor de escória não foram significativos (valor-p > 0,05) para análise dos dados da variável resposta em questão, não procedeu-se a realização das comparações múltiplas entre os níveis dos fatores, sendo estes tratados de maneira isolada, conforme exibem os gráficos *boxplots* apresentados nas Figuras 4.20 e 4.21.

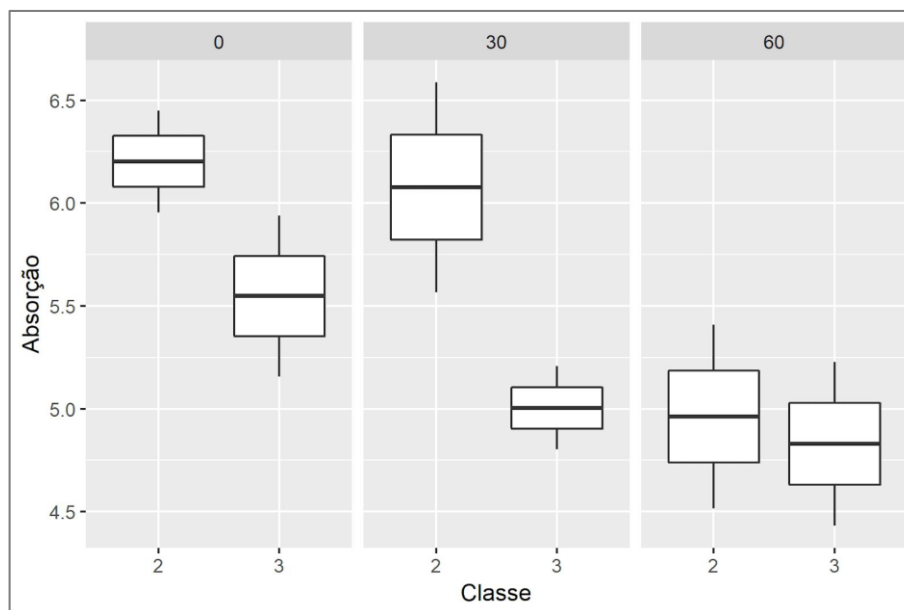


Figura 4.20 - *Boxplots* das classes de qualidade fixando-se os níveis de teor de escória

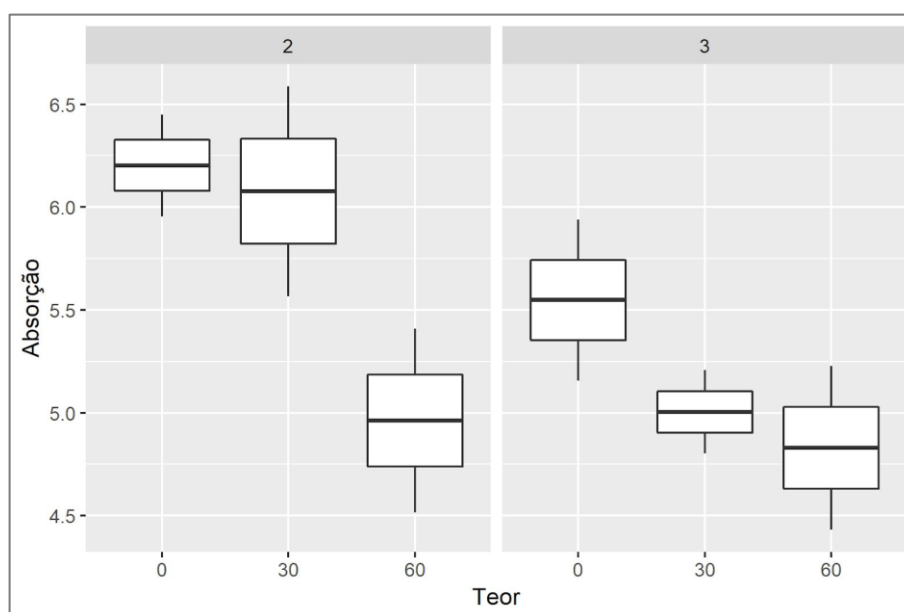


Figura 4.21 - *Boxplots* do teor de escória fixando-se os níveis da classe de qualidade

Atestou-se, por meio das comparações isoladas dos fatores, que os valores de absorção de água por imersão reduziram-se tanto com o incremento do teor de escória de alto forno na mistura quanto com a adoção de uma classe de qualidade com uma menor relação água/cimento.

Do mesmo modo, a Figura 4.22 apresenta graficamente os valores preditos de absorção de água nos níveis dos fatores intervenientes analisados, a partir da qual verifica-se que, nas

condições analisadas, quanto maior o teor de escória de alto forno, menor foi a absorção de água por imersão. Além disso, os concretos da classe III apresentaram menores absorções de água quando comparados aos concretos da classe II com os mesmos níveis de teor de escória.

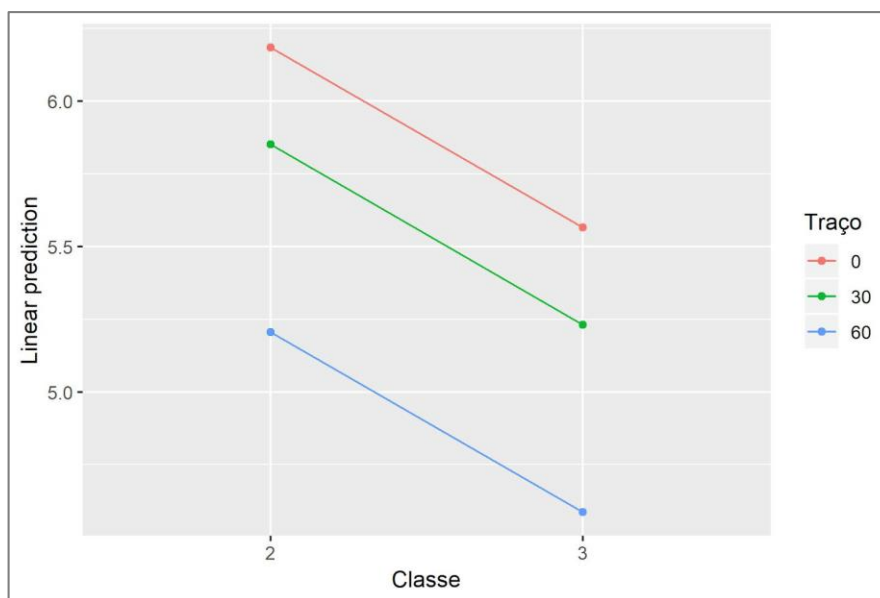


Figura 4.22 - Valores preditos de absorção de água por imersão nos níveis dos fatores

### Índice de vazios

Os gráficos *boxplots* e *violinplots* gerados a partir da análise dos resultados dos índices de vazios estão apresentados nas Figuras 4.23 e 4.24, respectivamente.

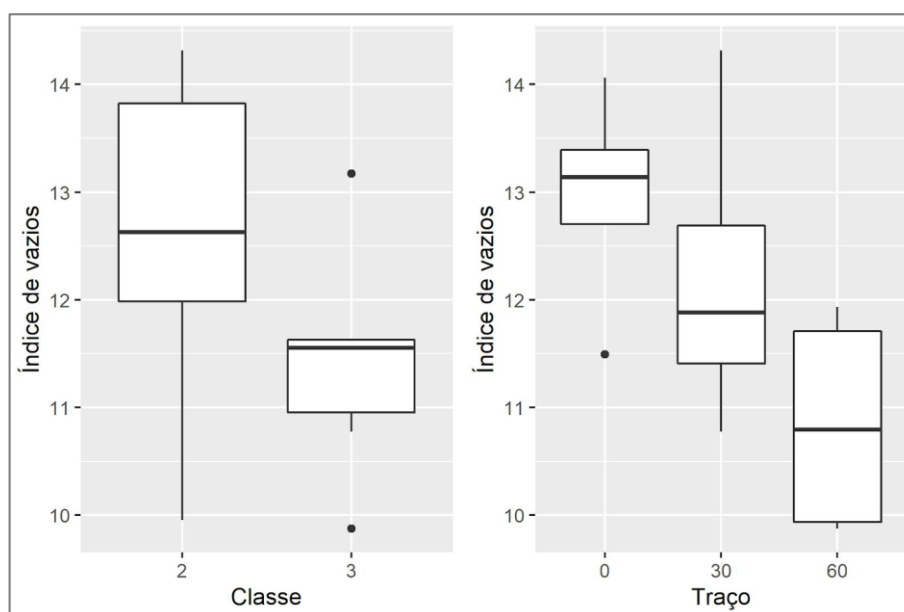


Figura 4.23 - *Boxplots* de índice de vazios nos níveis dos fatores



Figura 4.24 - *Violinplots* dos resultados de índice de vazios nos níveis dos fatores

A Tabela 4.10 apresenta a análise de variância ANOVA para o modelo estatístico adotado para verificação dos dados de índice de vazios, a qual apontou que os dois fatores intevenientes considerados, teor de escória e classe de qualidade, não são significativos a 5% de significância. Não foram consideradas interações entre os fatores e a normalidade dos resíduos não foi rejeitada para as condições estabelecidas.

Tabela 4.10 - Análise de variância do modelo estatístico aos resultados de índice de vazios

Variável	Graus de liberdades	Soma dos quadrados	Soma dos quadrados médios	F	p-valor
Classe	1	4,03	4,03	3,29	0,107
Teor	2	9,15	4,58	3,74	0,071
Resíduos	8	9,79	1,22		

Dado que os ambos os fatores não foram significativos (valor-p > 0,05) para a análise estatística desta variável resposta, não procedeu-se a realização das comparações múltiplas entre os níveis dos fatores, os quais tiveram os efeitos avaliados de maneira isolada, como exibem os gráficos *boxplots* apresentados nas Figuras 4.25 e 4.26.

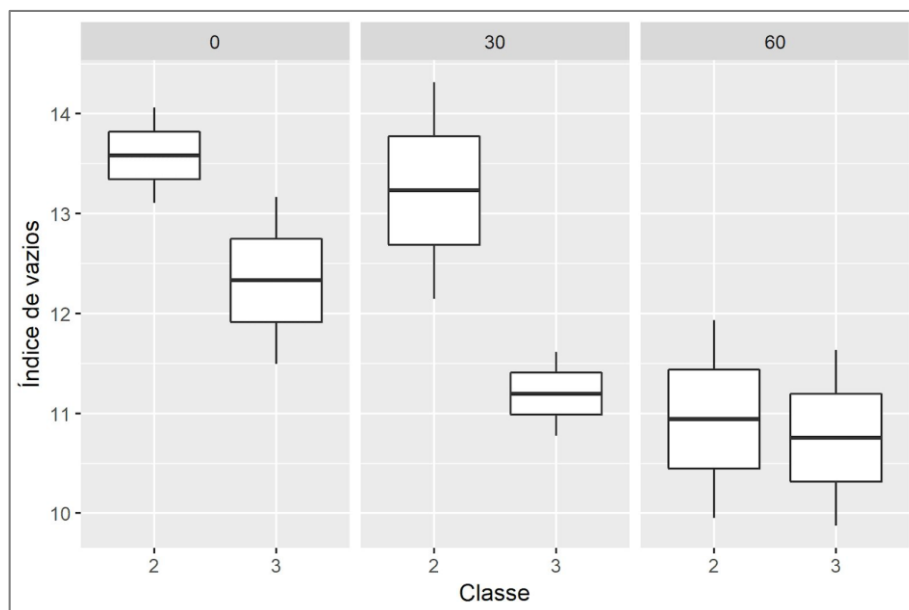


Figura 4.25 - *Boxplots* das classes de qualidade fixando-se os níveis de teor de escória

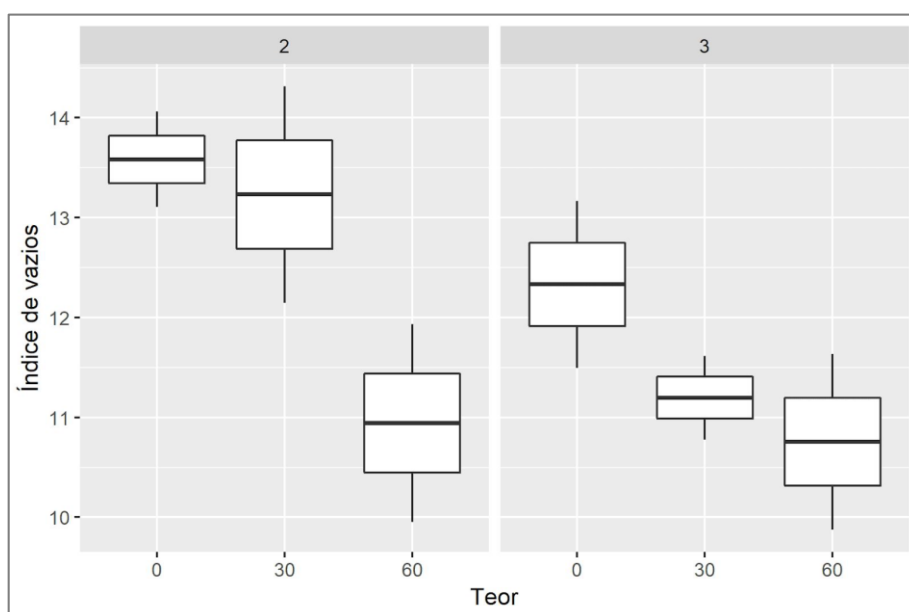


Figura 4.26 - *Boxplots* do teor de escória fixando-se os níveis de classe de qualidade

Diante das comparações dos efeitos isolados dos fatores considerados, constatou-se que os valores de índices de vazios dos concretos analisados reduziram-se à medida que uma classe de qualidade superior foi adotada e/ou que uma maior quantidade de escória de alto forno foi incorporada à mistura. Essa constatação também pode ser observada pela análise dos valores preditos dos níveis dos fatores apresentados graficamente na Figura 4.27.

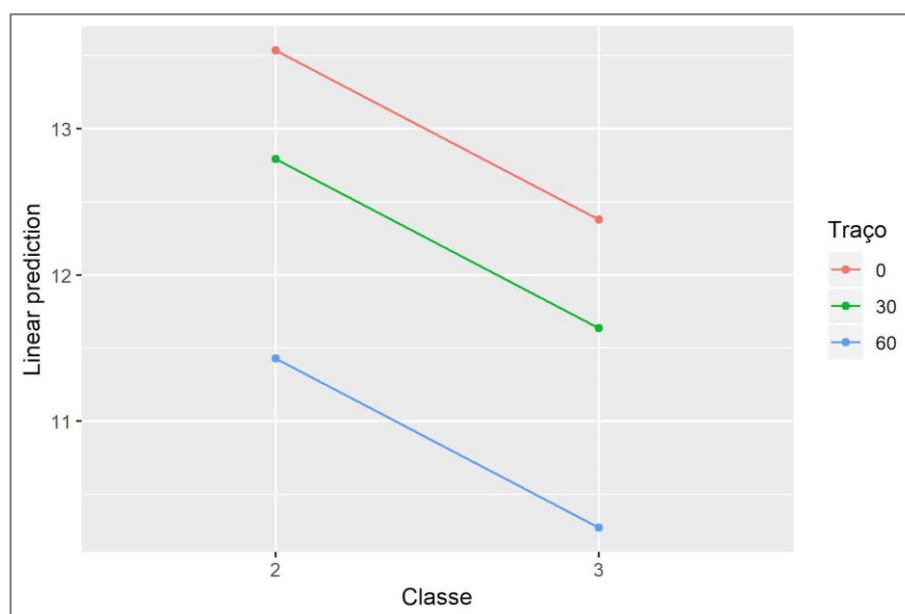


Figura 4.27 - Valores preditos de índice de vazios nos níveis dos fatores

### *Massa específica real*

Os gráficos *boxplots* e *violinplots* gerados a partir da análise dos resultados das massas específicas reais estão apresentados nas Figuras 4.28 e 4.29, respectivamente.

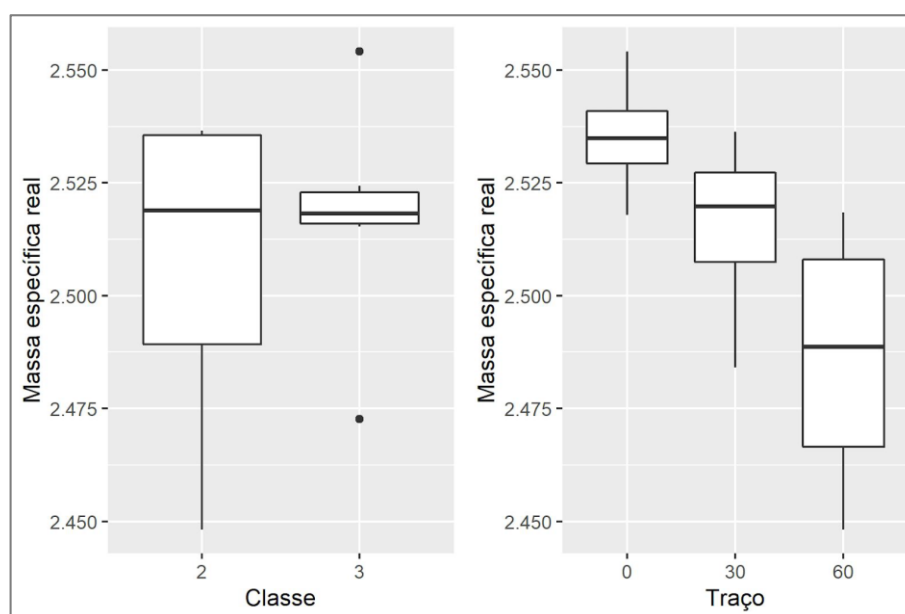


Figura 4.28 - *Boxplots* de massa específica real nos níveis dos fatores

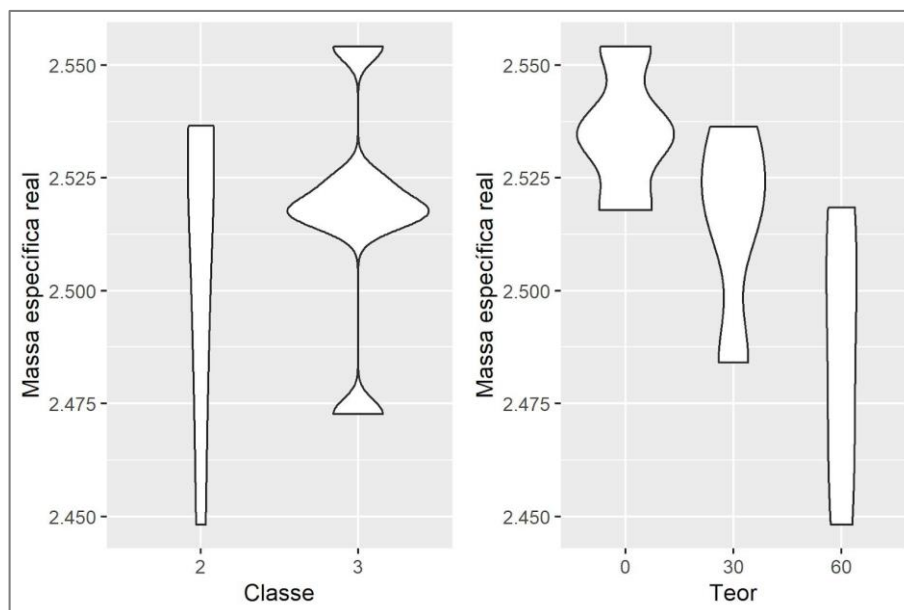


Figura 4.29 - Violinplots dos resultados de massa específica real nos níveis dos fatores

A Tabela 4.11 apresenta a análise de variância ANOVA para o modelo estatístico adotado para a verificação dos dados de massa específica real, a qual apontou que os dois fatores analisados, teor de escória e classe de qualidade, não são significativos a 5% de significância. Não foram consideradas interações entre os fatores e a normalidade dos resíduos não foi rejeitada para as condições estabelecidas.

Tabela 4.11 - Análise de variância do modelo estatístico aos resultados de massa específica real

Variável	Graus de liberdades	Soma dos quadrados	Soma dos quadrados médios	F	p-valor
Classe	1	< 0,001	< 0,001	0,493	0,503
Teor	2	0,005	0,002	4,061	0,061
Resíduos	8	0,005	0,001		

Posto que os fatores considerados não foram significativos (valor-p > 0,05) para análise desta variável resposta, não procedeu-se a realização das comparações múltiplas entre os níveis dos fatores, os quais tiveram seus efeitos tratados de maneira isolada, como exibem os gráficos *boxplots* apresentados nas Figuras 4.30 a 4.31.

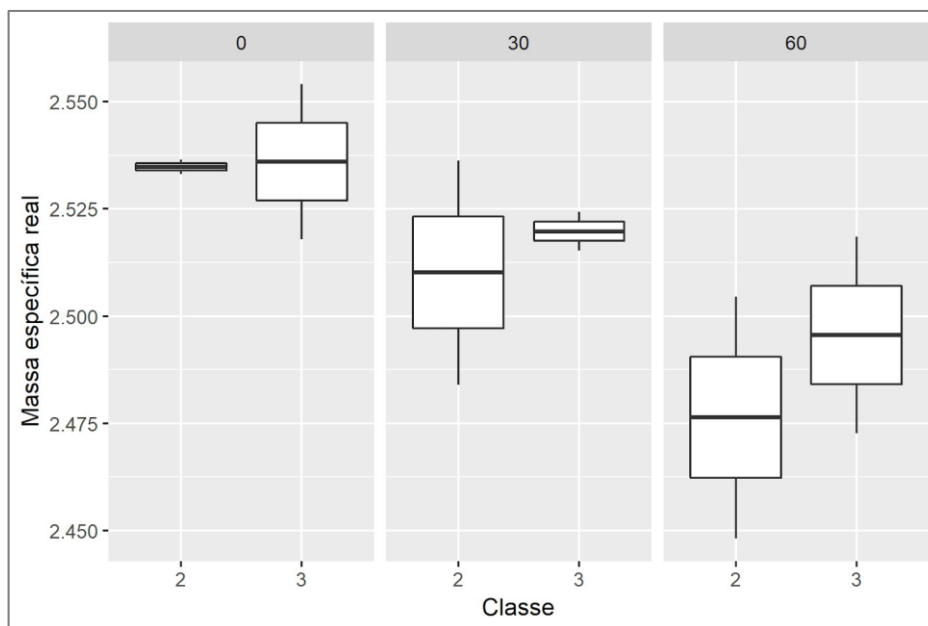


Figura 4.30 - *Boxplots* da classe de qualidade fixando-se os níveis de teor de escória

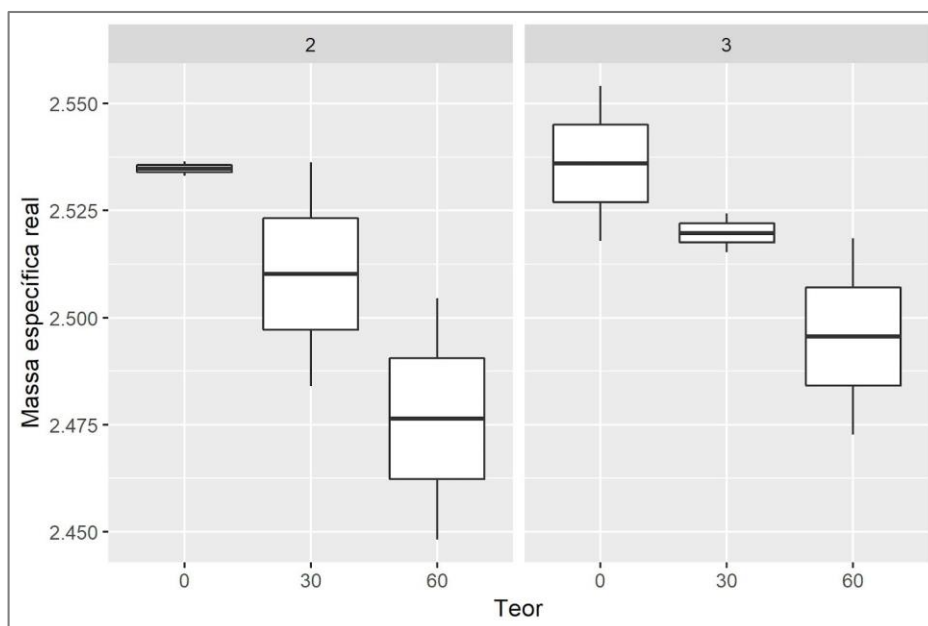


Figura 4.31 - *Boxplots* da classe de qualidade fixando-se os níveis de teor de escória

Tendo em vista as análises comparativas dos efeitos isolados dos fatores, verificou-se que os valores de massa específica real dos concretos reduziram-se com o aumento do teor de escória de alto forno utilizado e amplificaram-se, ainda que moderadamente, quando a classe de qualidade tornou-se mais restritiva, isto é, quando a relação água/cimento foi reduzida. Estas observações são ratificadas pela análise dos valores estatisticamente preditos para as massas específicas reais nos níveis dos fatores considerados, como expõe a Figura 4.32.

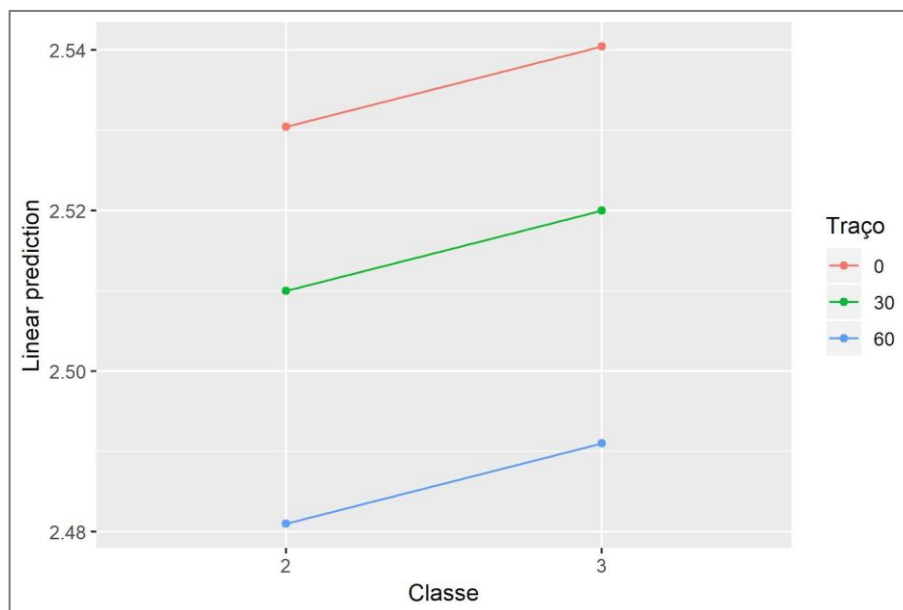


Figura 4.32 - Valores preditos de massa específica real nos níveis dos fatores

#### 4.6 Resistência à penetração de íons cloreto

As resistências dos concretos produzidos quanto à penetração de íons cloreto foram avaliadas, nas idades de 28, 56 e 91 dias, por meio da realização de ensaios acelerados de migração, em estado não estacionário, em conformidade com o procedimento descrito pela NT BUILD 492 (NORDTEST, 1999).

A Tabela 4.12 exhibe os valores parciais médios aferidos durante a realização dos ensaios, consoante com o procedimento descrito na seção 3.3.6, os quais embasam o cálculo dos coeficientes de migração e indicam, de modo indireto, a capacidade de resistência dos concretos à penetração de íons cloreto. Da mesma forma, as profundidades de penetração de íons cloreto, medidas sobre as seções transversais das amostras ensaiadas após estas serem submetidas à aspersão de solução indicadora de nitrato de prata, como mostra a Figura 4.33, constituem um parâmetro indireto de avaliação da resistência à penetração de cloretos, a qual deve considerar todo o conjunto de variáveis obtidas ao longo do ensaio de migração.

Assim sendo, de posse dos valores medidos para as diferentes grandezas no decorrer dos ensaios acelerados realizados, calculou-se os coeficientes de migração de cloretos, em estado não estacionário, por meio da fórmula empírica apresentada na Equação 3.10, sendo estes apresentados na Tabela 4.13 e na Figura 4.34.

Tabela 4.12 - Valores médios obtidos ao longo das etapas pertencentes aos ensaios de migração de íons cloreto

Traço	Relação a/c	Idade	Corrente inicial $I_{30}$ (mA)	Voltagem elétrica (V)	Profundidade de penetração (mm)
TE00C2		28 dias	$93 \pm 4$	20	$21,2 \pm 0,7$
		56 dias	$71 \pm 3$	25	$22,4 \pm 0,7$
		91 dias	$79 \pm 3$	25	$22,2 \pm 0,9$
TE30C2	0,60	28 dias	$39 \pm 1$	35	$20 \pm 2$
		56 dias	$20,3 \pm 0,5$	40	$13 \pm 1$
		91 dias	$19,4 \pm 0,8$	50	$13,0 \pm 0,7$
TE60C2		28 dias	$28 \pm 1$	40	$20 \pm 2$
		56 dias	$16,7 \pm 0,7$	50	$13,0 \pm 0,7$
		91 dias	$11,4 \pm 0,6$	60	$12 \pm 1$
TE00C3		28 dias	$89 \pm 2$	25	$22,5 \pm 0,9$
		56 dias	$74 \pm 3$	25	$20,2 \pm 0,4$
		91 dias	$68 \pm 3$	25	$20,4 \pm 0,8$
TE30C3	0,55	28 dias	$38 \pm 2$	35	$18 \pm 1$
		56 dias	$23,3 \pm 0,8$	40	$11,2 \pm 0,6$
		91 dias	$16,8 \pm 0,4$	50	$11 \pm 1$
TE60C3		28 dias	$25,1 \pm 0,5$	40	$17 \pm 1$
		56 dias	$14,4 \pm 0,5$	60	$13 \pm 2$
		91 dias	$9,4 \pm 0,2$	60	$16,4 \pm 0,6$

Tabela 4.13 - Resultados dos coeficientes de migração de íons cloreto em diferentes idades

Traço	Relação água/cimento	Coeficientes de Migração de Cloretos ( $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ )		
		28 dias	56 dias	91 dias
TE00C2		$15,1 \pm 0,6$	$12,6 \pm 0,5$	$12,5 \pm 0,6$
TE30C2	0,60	$8 \pm 1$	$4,4 \pm 0,4$	$3,6 \pm 0,2$
TE60C2		$7,0 \pm 0,7$	$3,5 \pm 0,2$	$2,8 \pm 0,2$
TE00C3		$12,8 \pm 0,5$	$11,3 \pm 0,2$	$11,4 \pm 0,4$
TE30C3	0,55	$6,9 \pm 0,4$	$3,7 \pm 0,2$	$2,9 \pm 0,3$
TE60C3		$5,8 \pm 0,4$	$2,9 \pm 0,5$	$1,87 \pm 0,06$

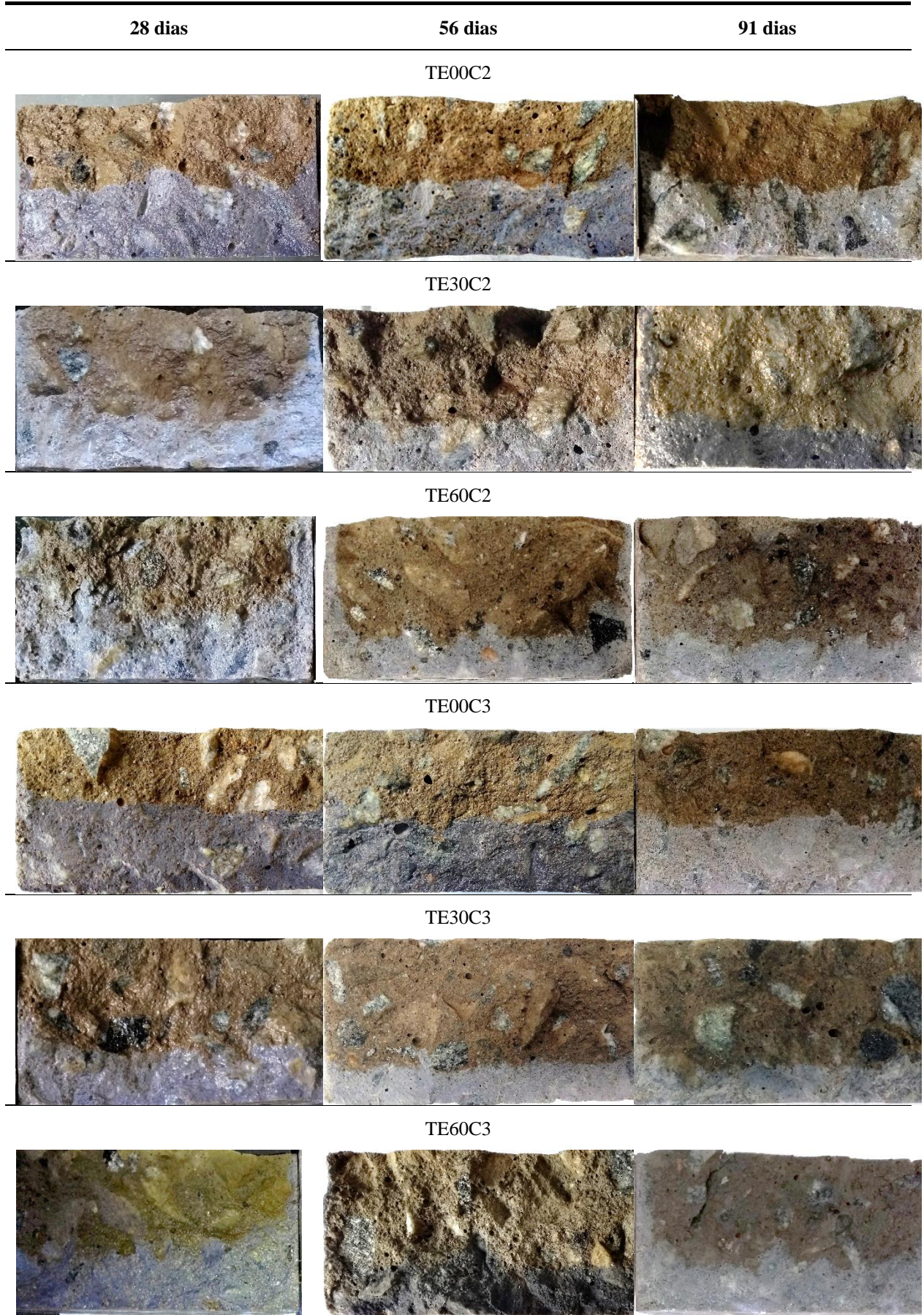


Figura 4.33 - Evidenciação das penetrações nas amostras de concreto ensaiadas em diferentes idades

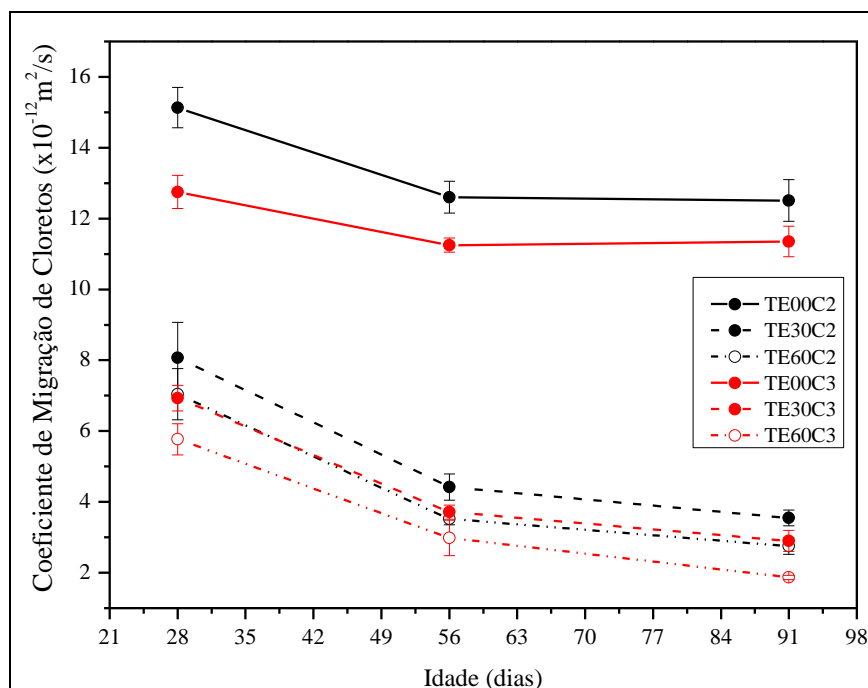


Figura 4.34 - Evolução no tempo dos coeficientes de migração de íons cloreto

Diante dos resultados ora apresentados, constatou-se que a substituição parcial do cimento Portland por escória de alto forno implicou na redução dos coeficientes de migração de íons cloreto em todas as idades e classes de qualidade de concreto analisadas.

Nos concretos ensaiados aos 28 dias, a utilização de 30% e 60% de escória de alto forno resultou em reduções de 46% e 54%, respectivamente, nos coeficientes de migração de íons cloreto em relação aos concretos de referência, para as duas classes de qualidade avaliadas (II e III). Na idade de 56 dias, tais reduções representaram cerca de 66% e 73%, respectivamente. Já aos 91 dias, os coeficientes de migração reduziram-se em cerca de 73% com a utilização de 30% de escória, para ambas as classes de qualidade avaliadas, e em cerca de 78% e 84% com a substituição por 60% de escória nos concretos pertencentes às classes de agressividade ambiental II e III, respectivamente.

No tocante à influência do fator idade, constatou-se uma relevante amplificação das reduções dos coeficientes de migração com o avanço desta, o que se deve, provavelmente, ao fato de que os concretos de referência, sem adição de escória (TE00), possuem hidratação acelerada e atingem os seus desempenhos finais ainda em idades precoces. Já os concretos com a adição (TE30 e TE60), apresentam hidratação mais lenta devido à menor reatividade proporcionada pela adição da escória de alto forno, o que tende a potencializar as resistências à penetração de

cloretos com o decorrer do tempo, dilatando as reduções em relação aos concretos de cimento puro nas idades mais avançadas.

Ademais, a redução da relação água/cimento proporcionou a melhoria da resistência à penetração de íons cloreto visto que os concretos produzidos de acordo com os requisitos estabelecidos para a classe de agressividade ambiental III ( $a/c = 0,55$ ) apresentaram coeficientes de migração menores do que os concretos da classe II ( $a/c = 0,60$ ) quando são comparados os concretos com o mesmo teor de escória e com uma mesma idade. De fato, consoante com os estudos apresentados na seção 2.3.4.3, a relação água/cimento está diretamente relacionada com a porosidade do concreto, sendo que a sua redução permite a formação de uma estrutura de poros mais refinada, isto é, menos porosa, o que dificulta o deslocamento de agentes agressivos, como os íons cloreto, através do concreto.

Em suma, os resultados mostraram que a resistência à penetração de cloretos dos concretos aumentou com a diminuição da relação água/cimento e com o aumento do teor de substituição de cimento por escória, identicamente como verificado por Otieno, Beushausen e Alexander (2014). Todavia a redução da relação água/cimento dos concretos analisados representaram, de uma maneira geral, uma diminuição dos coeficientes de migração da ordem de 17%. Assim sendo, verificou-se que as minorações nos valores dos coeficientes foram substancialmente mais expressivas quando advindas das substituições de cimento Portland por escória de alto forno do que quando estas foram provenientes da redução da relação água/cimento dos concretos.

A idade dos concretos ensaiados também apresentou-se como um relevante fator interveniente nas resistências à penetração de cloretos uma vez que propiciaram, por si só, significativas reduções nos coeficientes de migração. Entre as idades de 28 dias e 56 dias, estes reduziram-se em cerca de 15% para os concretos sem escória e 48% nos concretos com escória. Já entre 56 dias e 91 dias, verificaram-se reduções da ordem de 25% para os concretos com adição de escória de alto forno.

Segundo a classificação proposta por Nilsson *et al.* (1998 *apud* Gjrv, 2014), apresentada na Tabela 2.5, os concretos de referência (TE00) produzidos em atendimento às classes de agressividade ambiental II e III possuíam, aos 28 dias, baixa e moderada resistência à penetração de cloretos, respectivamente. A utilização da escória de alto forno em substituição

parcial ao cimento Portland comum, nos teores de 30% e 60%, proporcionou que estes concretos passassem a serem classificados como de alta resistência à penetração de cloretos.

*- Análise estatística dos resultados de resistência à penetração de íons cloreto*

As análises estatísticas dos resultados dos ensaios de resistência à penetração de cloretos consideraram a interveniência dos fatores teor de escória de alto forno (0%, 30% e 60%), classe de qualidade do concreto (II e III) e idade (28, 56 e 91 dias), constituindo um banco de dados composto por um total de 108 observações para esta variável resposta.

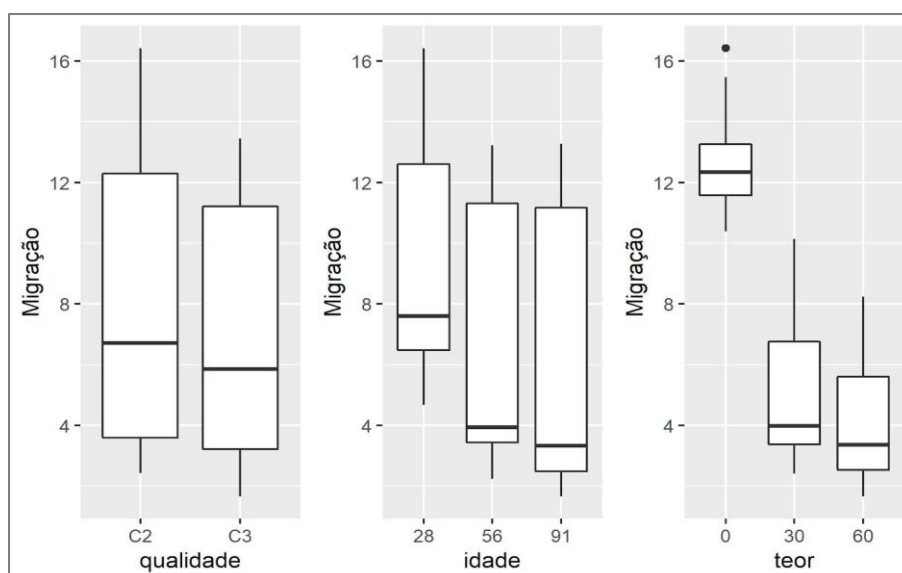


Figura 4.35 - *Boxplots*, nos níveis dos fatores, dos resultados de migração de cloretos

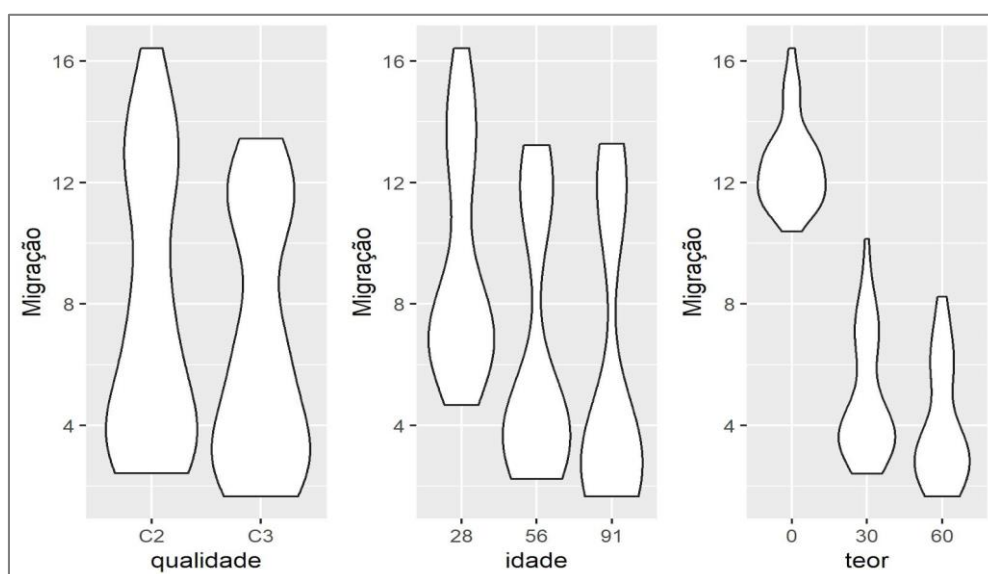


Figura 4.36 - *Violinplots* dos resultados de migração de íons cloreto nos níveis dos fatores

As Figuras 4.35 e 4.36 exibem, respectivamente, os gráficos *boxplots* e *violinplots* relativos às análises estatísticas preliminares dos resultados de resistência à penetração de íons cloreto nos níveis dos fatores considerados.

O modelo estatístico adotado para as análises foi considerado adequado após a realização de uma transformação da variável resposta para a escala logarítmica. A Tabela 4.14 apresenta a análise de variância ANOVA para o modelo, a qual apontou que os três fatores intervenientes considerados são significativos a 5% de significância. Além disso, foi considerada a existência de interações entre os fatores teor de escória e idade e entre o teor de escória e a classe de qualidade do concretos. Tais interações foram consideradas significativas a 5% de significância, o que indica que os fatores se interagem de alguma forma. O Método de Mínimos Quadrados Ponderados (MMQP) foi utilizado com o propósito de corrigir a heterocedasticidade dos dados. A normalidade dos resíduos foi não rejeitada para as condições propostas.

Tabela 4.14 - Análise de variância do modelo estatístico aos resultados de absorção de água por capilaridade

Variável	Graus de liberdades	Soma dos quadrados	Soma dos quadrados médios	F	p-valor
Teor	2	10114	5057	2523,479	< 0,001
Idade	2	873	436	217,761	< 0,001
Classe	1	203	203	101,312	< 0,001
Interação entre o teor e a idade	4	789	197	98,394	< 0,001
Interação entre o teor e a classe	2	22	11	5,532	0,005
Resíduo	96	192	2		

Assim sendo, as comparações múltiplas entre os níveis dos fatores foram realizadas fixando-se os níveis dos outros fatores do modelo por meio da implantação do teste de Tukey. Os resultados das comparações múltiplas realizadas estão apresentados detalhadamente no curso do Apêndice B, sendo os gráficos *boxplots* gerados a partir de tais comparações exibidos nas Figuras 4.37 e 4.39.

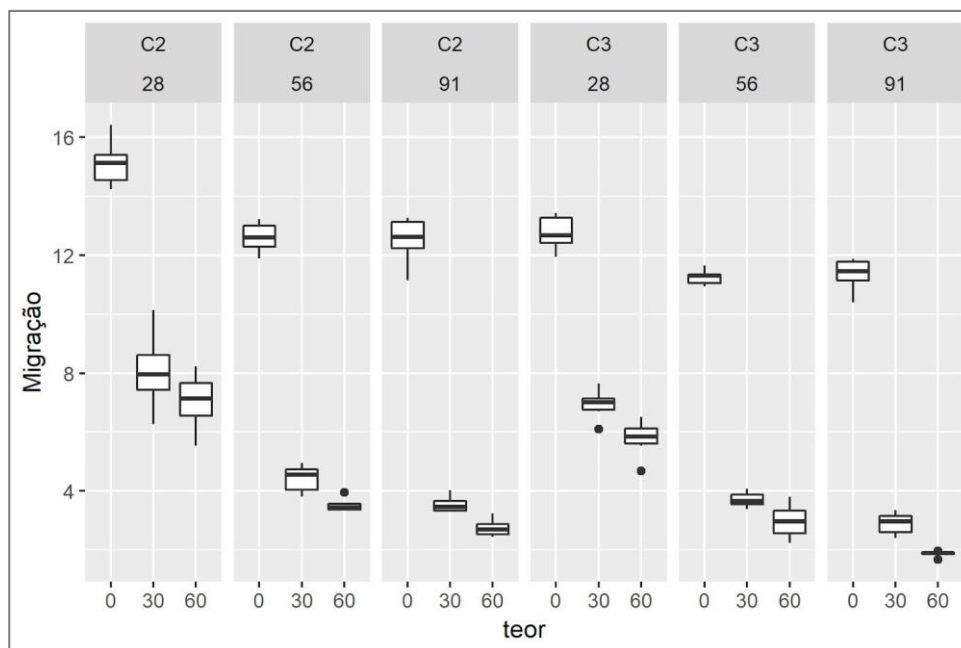


Figura 4.37 - *Boxplots* dos teores fixando-se os níveis dos outros fatores

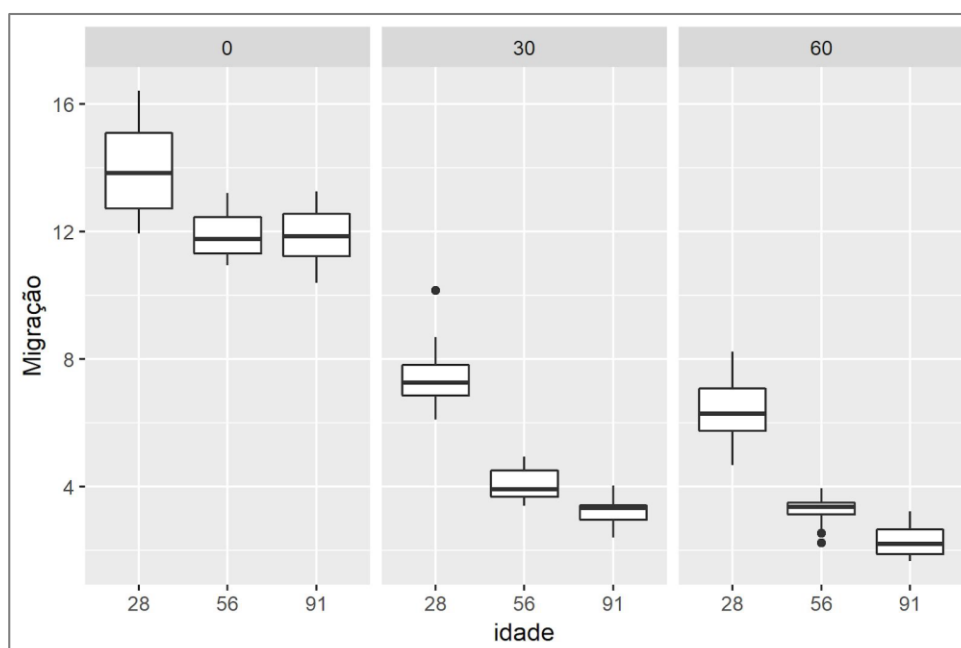


Figura 4.38 - *Boxplots* das idades fixando-se os níveis de teor de escória

Diante das análises comparativas entre os fatores, constatou-se, de modo geral, que os coeficientes de migração de cloretos diminuíram à medida em que os níveis dos fatores foram aumentados, ou seja, quando o teor de substituição parcial de cimento por escória de alto forno foi alteado e/ou a idade dos concretos foi estendida e/ou quando foi adotada uma classe de qualidade mais restritiva para os concretos analisados.

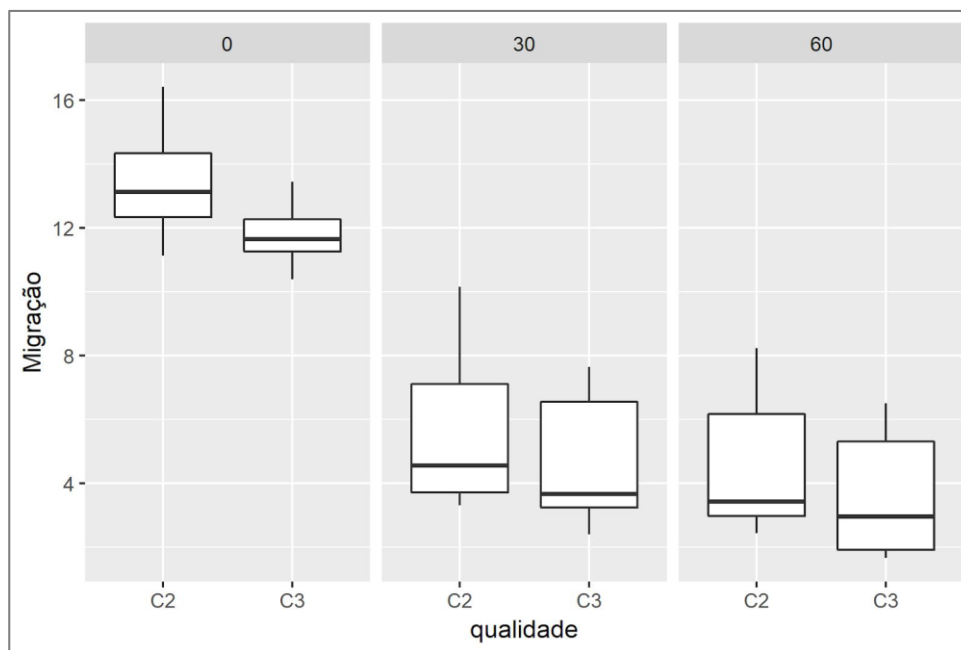


Figura 4.39 - *Boxplots* das classes fixando-se os níveis de teor de escória.

De fato, o aumento do teor de substituição de cimento Portland por escória de alto forno propiciou reduções dos valores dos coeficientes de migração, sendo estas mais expressivas quando o nível deste fator oscilou de 0% para 30% do que quando passou de 30% para 60%, em todos os concretos avaliados. Quando o teor de escória aumentou, constatou-se também que as diferenças observadas entre os coeficientes dos concretos pertencentes às classes II e III se amplificaram, bem como entre as idades de 28, 56 e 91 dias. Do mesmo modo, quando os níveis fatores classe de qualidade e idade foram mantidos constantes, verificou-se que, em geral, as diferenças dos valores de coeficientes observadas entre os níveis de teor de escória também se intensificaram.

O avanço dos níveis do fator idade implicou em diferenças mais significativas entre os valores de coeficientes de migração com o aumento do teor de escória de alto forno incorporada, o que corrobora com o fato de que os concretos com escória apresentam uma menor reatividade e demandam um maior tempo para atingimento dos desempenhos finais praticáveis.

Assim sendo, conclui-se que, para as condições analisadas, a resistência à penetração de íons cloreto foi maior à medida que o teor de substituição parcial de cimento por escória de alto forno aumentou e/ou que a idade dos concretos avançou e/ou que adotou-se uma classe de qualidade superior, conforme indicam os valores preditos dos níveis dos fatores intervenientes considerados, apresentados graficamente na Figura 4.40.

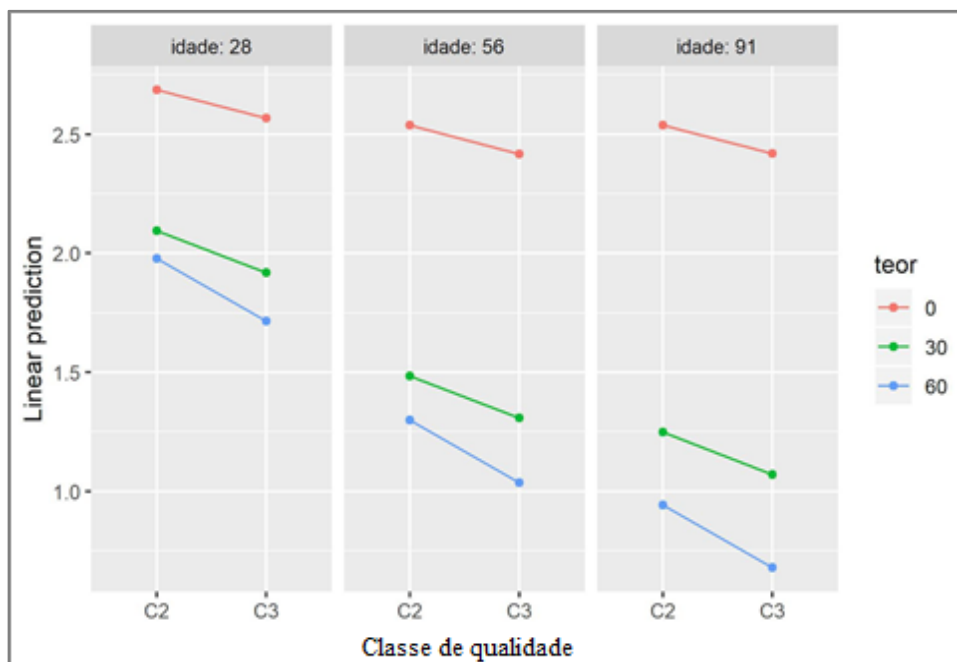


Figura 4.40 - Valores preditos de resistência à penetração de cloretos nos níveis dos fatores

#### 4.7 Resistividade elétrica dos concretos

As medições de resistividade elétrica superficial dos concretos foram realizadas, nas idades de 28, 56 e 91 dias, de acordo com o procedimento descrito pela norma T 358-17 (AASHTO, 2017). Os resultados médios obtidos são provindos de oito determinações para cada um dos três corpos de prova avaliados por traço/idade e estão expostos na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 - Resultados de resistividade elétrica dos concretos em diferentes idades

Traço	Relação água/cimento	Resistividade Elétrica (kΩ.cm)		
		28 dias	56 dias	91 dias
TE00C2		N/R	14,0 ± 0,2	14,1 ± 0,6
TE30C2	0,60	30 ± 1	49 ± 1	63 ± 3
TE60C2		49 ± 1	75 ± 3	101 ± 4,
TE00C3		12,6 ± 0,3	15,1 ± 0,1	16,3 ± 0,7
TE30C3	0,55	29,0 ± 0,2	51 ± 1	N/R
TE60C3		51 ± 1	80 ± 3	124 ± 4

N/R: não realizado

A evolução dos resultados de resistividade elétrica dos concretos de diferentes traços com o avanço da idade está apresentada na Figura 4.41.

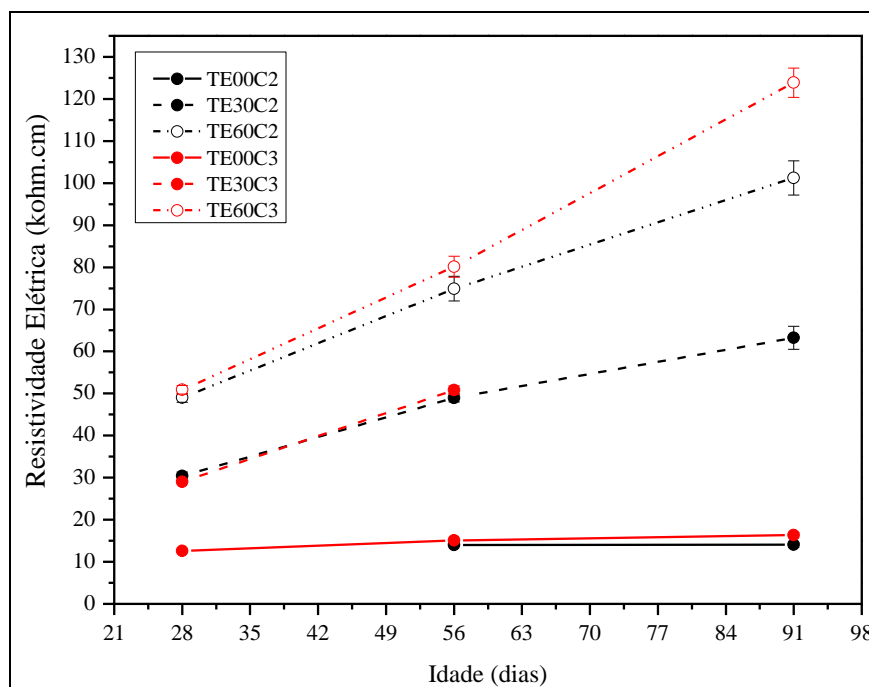


Figura 4.41 - Evolução no tempo das resistividades elétricas dos concretos

Observou-se que a substituição parcial de cimento Portland por escória de alto forno proporcionou, em todos os cenários analisados, expressivos aumentos dos valores de resistividade elétrica dos concretos. Outrossim, percebeu-se que as melhorias verificadas foram intensificadas com o aumento do teor de escória utilizado na concepção dos concretos visto que a adição de 30% de escória possibilitou a elevação dos valores de resistividade elétrica em até 4,5 vezes enquanto a incorporação de 60% de escória propiciou o incremento de até 7,5 vezes nestes valores, em relação aos concretos de referência sem adição de escória.

A redução da relação água/cimento dos concretos provocou, de modo geral, elevações menos expressivas nos valores de resistividade elétrica, quando comparados os concretos com o mesmo teor de escória e mesma idade, visto que verificou-se um aumento máximo da ordem de 22% entre os valores obtidos para os concretos produzidos de acordo com os critérios estabelecidos para a classe II ( $a/c = 0,60$ ) e os da classe III ( $a/c = 0,55$ ).

De outro modo, a idade dos concretos se mostrou um fator de abundante interveniência sobre os valores de resistividade elétrica, principalmente nos concretos com adição de escória de

alto forno (TE30 e TE60), nos quais verificou-se, por exemplo, aumentos de até 75% de tais valores entre as idades de 28 e 56 dias e de até 144% entre 28 e 91 dias.

Quando os valores de resistividade elétrica superficial dos concretos e dos coeficientes de migração de cloretos são correlacionados, é perceptível a existência de uma relação inversa entre estes dois importantes parâmetros de durabilidade, ou seja, a resistividade elétrica está diretamente ligada à resistência à penetração de íons cloreto. Isto posto, verificou-se que os concretos com os menores coeficientes de migração de íons cloreto apresentaram os maiores valores de resistividade elétrica, como pode ser observado na Figura 4.42. Vale ressaltar que, como exposto conceitualmente no capítulo 2, ambos os fenômenos ocorrem em meio saturado, situação na qual estes são potencializados e, dessa forma, para a correlação em questão este aspecto também deve ser sempre considerado.

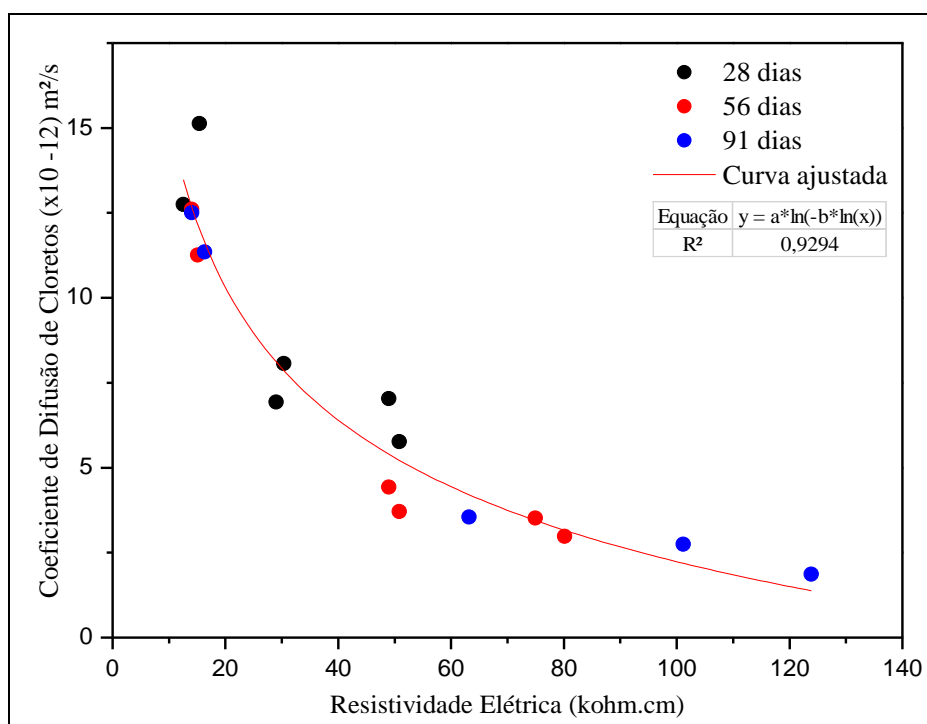


Figura 4.42 - Correlação entre os valores de coeficientes de migração de cloretos e os de resistividade elétrica dos concretos analisados

#### - Análise estatística dos resultados de resistividade elétrica

Considerou-se, durante a realização da análise estatística dos resultados de resistividade elétrica dos concretos, a interveniência de três fatores: teor de escória de alto forno (0%, 30%

e 60%), classe de qualidade do concreto (II e III) e idade (28, 56 e 91 dias), constituindo assim um banco de dados composto por um total de 432 observações. As Figuras 4.43 e 4.44 apresentam, respectivamente, os gráficos *boxplots* e *violinplots* gerados a partir dos resultados de resistividade elétrica nos níveis dos fatores considerados.

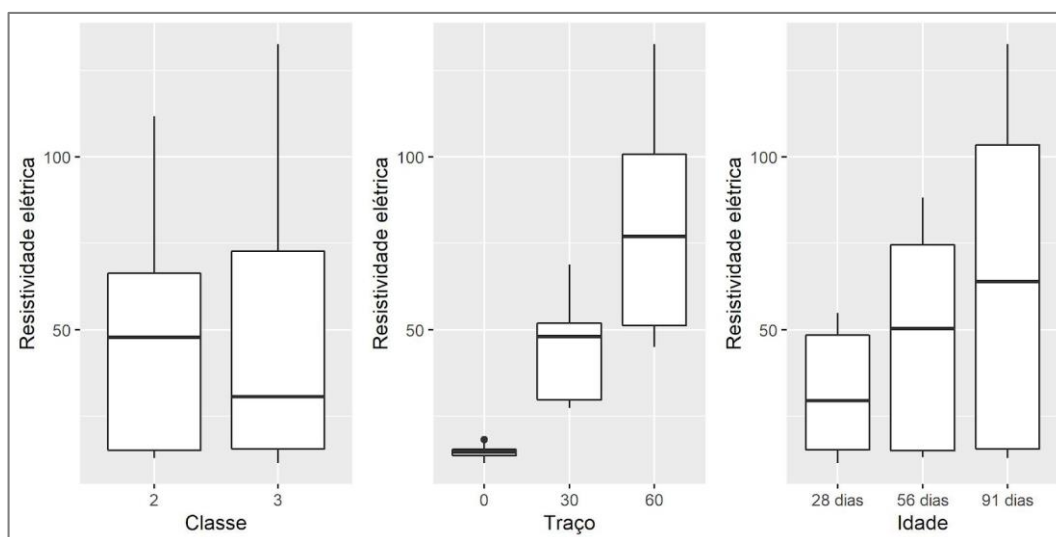


Figura 4.43 - *Boxplots* dos resultados de resistividade elétrica nos níveis dos fatores

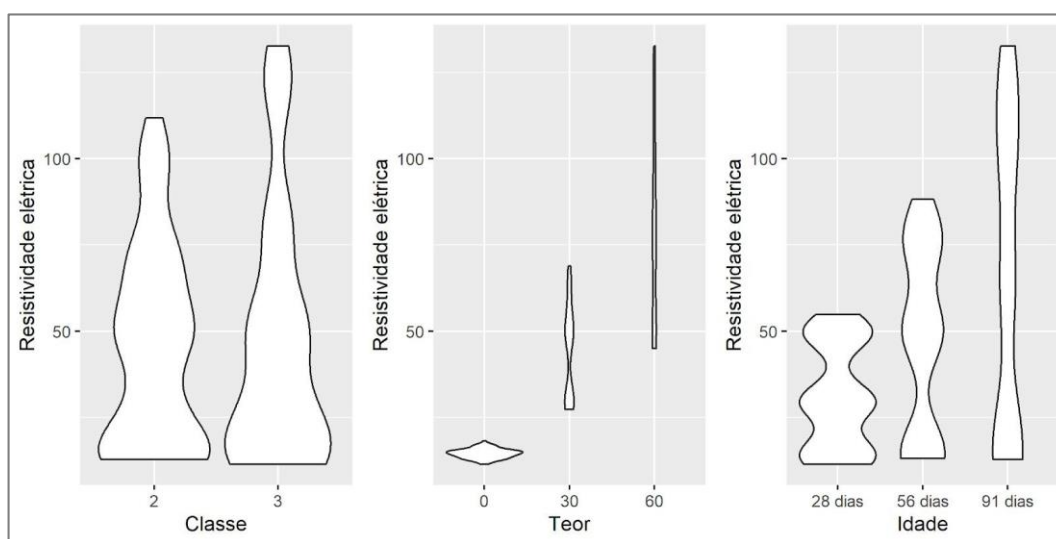


Figura 4.44 - *Violinplots* dos resultados de resistividade elétrica nos níveis dos fatores

As análises preliminares realizadas evidenciaram que a indisponibilidade de algumas observações do banco de dados constituído para esta variável resposta afetou, provavelmente, a análise dos efeitos combinados dos fatores envolvidos, ocasionando um desbalanceamento dos dados. Em virtude disso, a análise de variância ANOVA com três fatores foi preterida e a verificação das interações entre os fatores considerados foi realizada de maneira isolada com

o intuito de possibilitar uma observação mais acertada dos efeitos de cada um destes sobre os valores obtidos durante a realização das medições. Neste sentido, as Figuras 4.45 a 4.50 apresentam os gráficos *boxplots* gerados a partir dos valores de resistividade elétrica dos concretos estudados, os quais permitem a observação dos efeitos isolados de cada um dos fatores considerados por meio da fixação, em diferentes sequências, dos níveis dos demais fatores envolvidos.

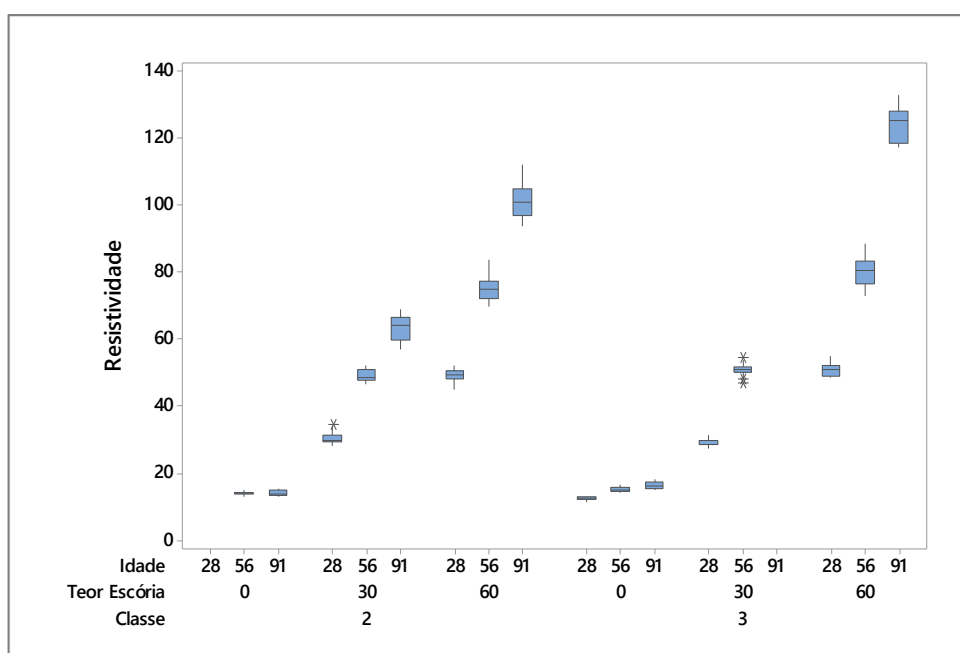


Figura 4.45 - *Boxplots* de resistividade fixando-se os níveis da classe e teor de escória

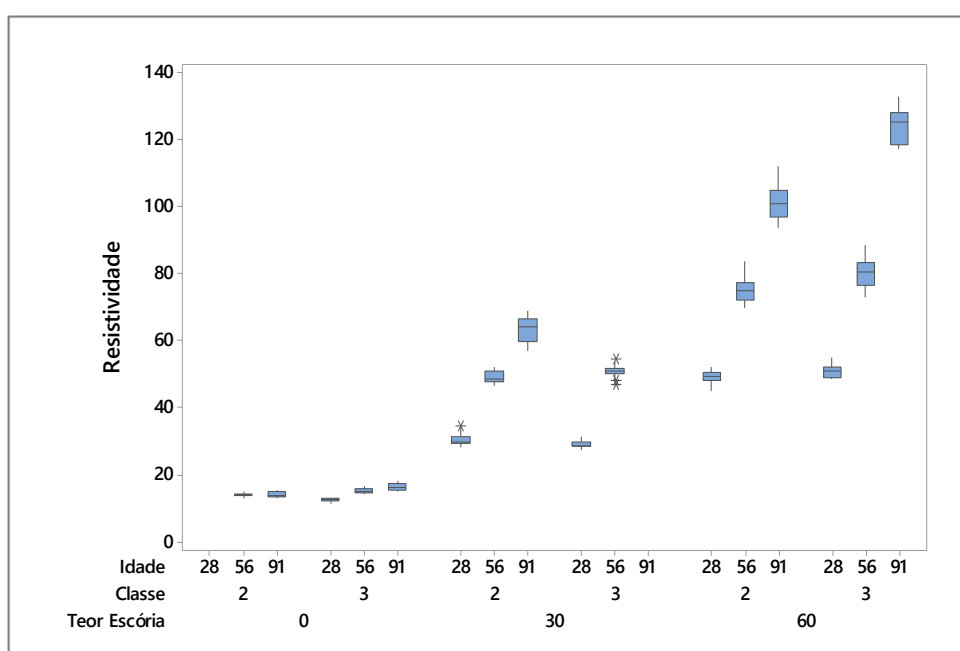


Figura 4.46 - *Boxplots* de resistividade fixando-se os níveis de teor de escória e classe

A análise isolada do fator idade indicou que, de modo geral, o avanço do tempo propiciou o aumento dos valores de resistividade elétrica dos concretos analisados, sendo a diferença destes valores entre idades potencializada com o incremento do teor de escória de alto forno incorporada aos concretos. De fato, a menor reatividade da escória em relação ao cimento Portland puro implica no atingimento dos desempenhos finais com uma idade mais avançada.

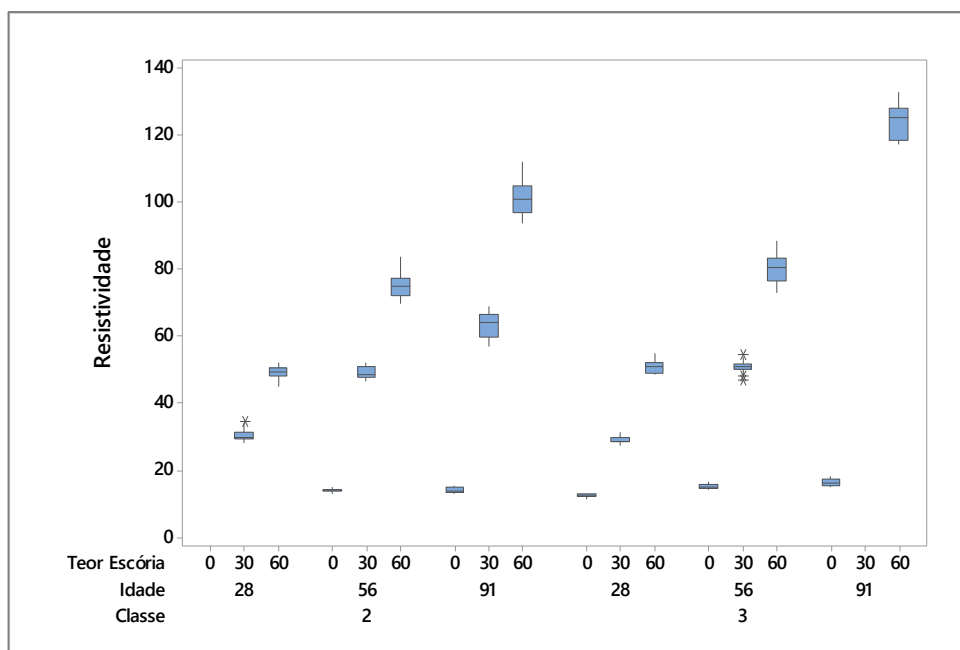


Figura 4.47 - *Boxplots* de resistividade fixando-se os níveis da classe de qualidade e idade

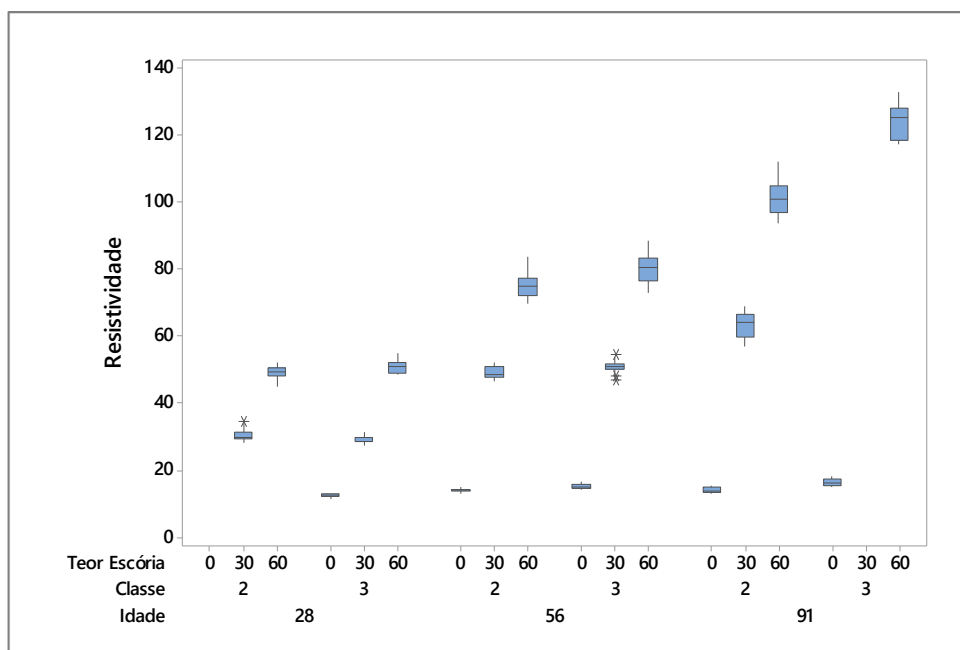


Figura 4.48 - *Boxplots* de resistividade fixando-se os níveis de idade e classe de qualidade

O aumento do teor de substituição parcial de cimento Portland por escória de alto forno implicou, notoriamente, na elevação dos valores de resistividade elétrica dos concretos, sendo as diferenças observadas, entre os concretos com distintos teores de escória, amplificadas com o aumento da idade destes. A alteração da classe de qualidade dos concretos influenciou diminutamente nos valores de resistividade quando variou-se o teor de escória incorporada.

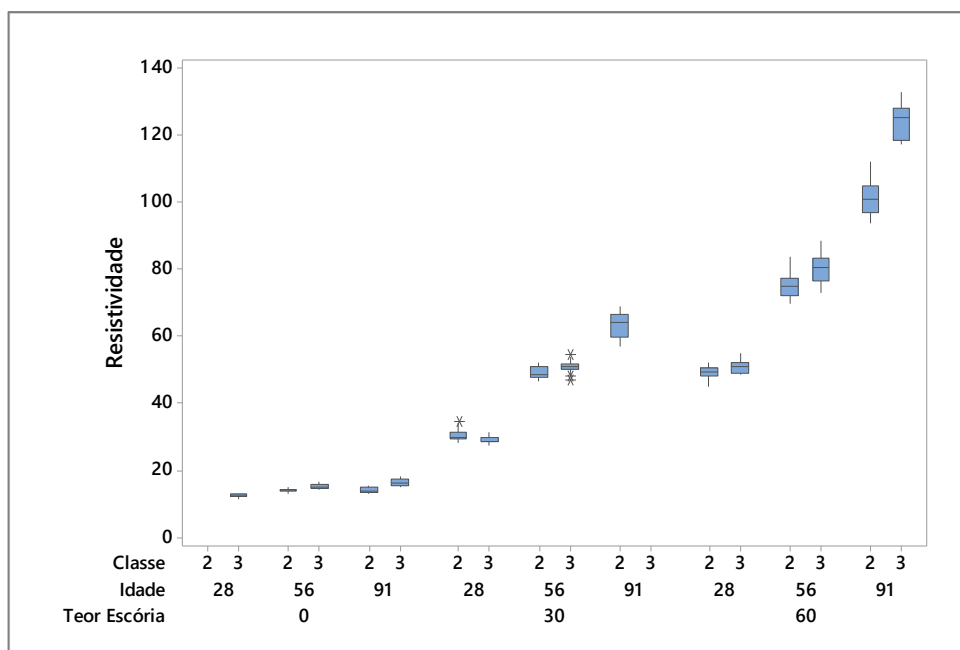


Figura 4.49 - *Boxplots* de resistividade fixando-se os níveis de teor de escória e idade

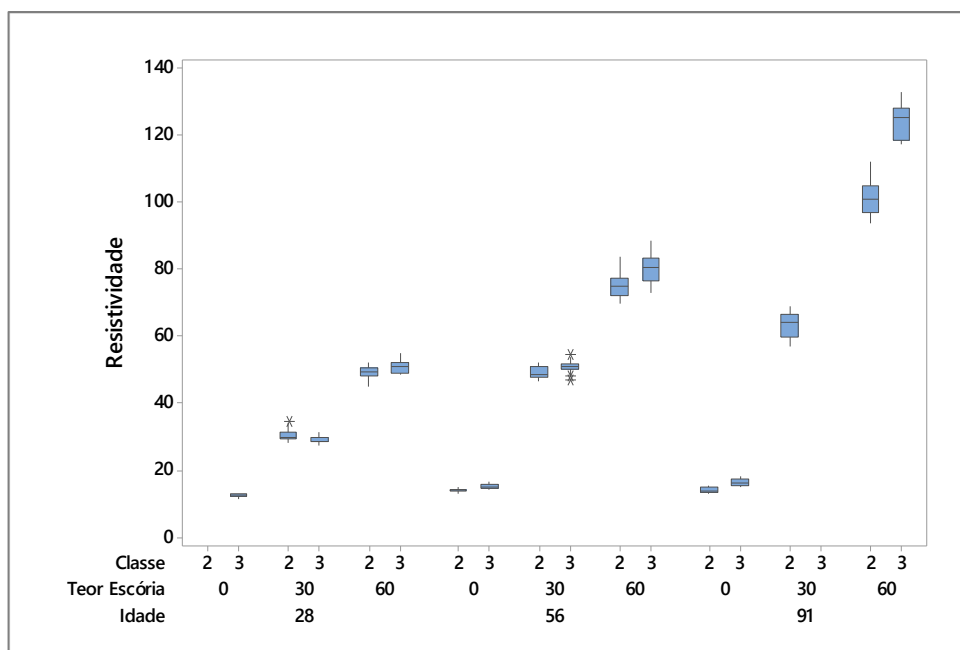


Figura 4.50 - *Boxplots* de resistividade fixando-se os níveis de idade e teor de escória

De modo geral, os concretos pertencentes à classe III apresentaram maiores valores de resistividade elétrica do que os concretos da classe II, quando os demais fatores foram mantidos constantes. Observou-se, nos concretos avaliados aos 28 dias, um comportamento disforme dos demais verificados, mas justificável pelo desenvolvimento ainda restrito dos desempenhos potenciais dos concretos nesta idade e pela equiparação dos valores dentro das incertezas admitidas. Todavia, as diferenças observadas nos valores de resistividade em função da alteração da classe de qualidade foram bastante acanhadas em relação aos demais fatores envolvidos considerados nas análises.

Em suma, as análises realizadas apontaram a existência de indícios de interação entre os fatores intervenientes considerados. Verificou-se que o fator teor de escória de alto forno foi o que produziu os maiores efeitos sobre a média dos valores de resistividade elétrica, seguido pelo fator idade e, por último, pelo fator classe de qualidade do concreto, como pode ser observado na análise dos efeitos isolados de cada fator, apresentada na Figura 4.51.

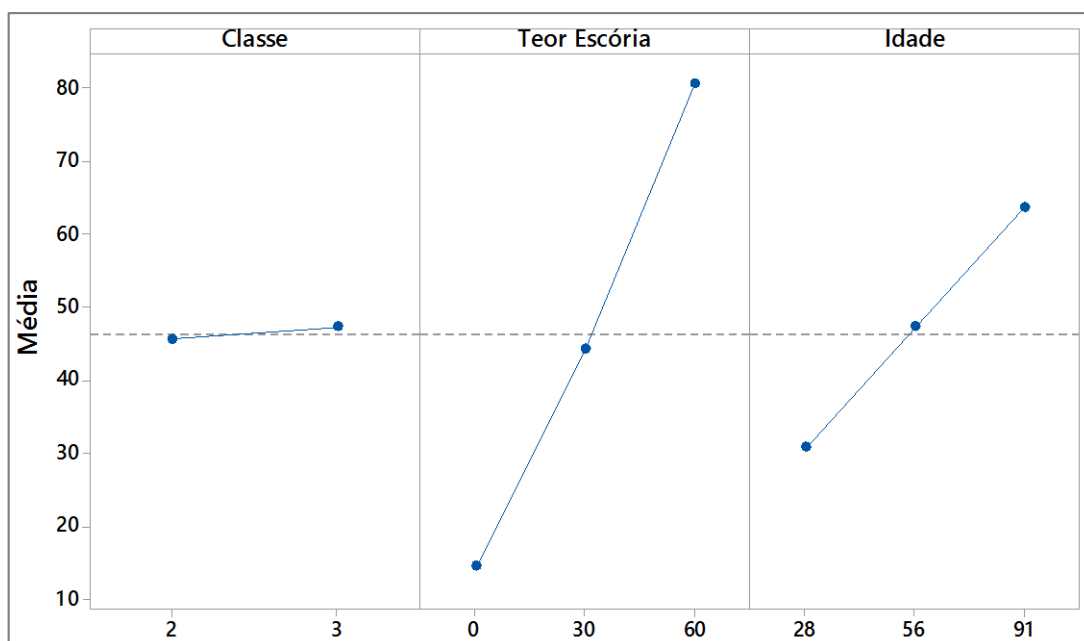


Figura 4.51 - Análise dos efeitos isolados de cada fator considerado sobre a média de resistividade

Além disso, constatou-se que o aumento dos valores de resistividade elétrica dos concretos se deram com o incremento do teor de escória de alto forno, na ordem 0%, 30% e 60%, com o avanço da idade e/ou com a adoção de uma classe de qualidade de concreto mais restritiva, como a classe III em relação à classe II, ainda que os efeitos advindos da variação deste último fator tenham sido modestos.

#### 4.8 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As análises microestruturais foram realizadas em amostras de concreto criteriosamente extraídas dos corpos de prova submetidos ao ensaio acelerado de migração de cloretos na idade de 28 dias de modo com que estas contivessem tanto regiões penetradas quanto regiões não penetradas por íons cloreto, conforme a evidenciação colorimétrica obtida durante a etapa final do referido ensaio.

As fotomicrografias, obtidas por meio de microscópio eletrônico de varredura modelo Quanta FEG 3D FEI, foram geradas com vistas à observação de aspectos da microestrutura dos concretos, tais como acerca da morfologia dos produtos de hidratação, da distribuição da rede de poros e evidenciação de elementos químicos presentes por meio de análise química qualitativa via EDS (Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios X).

Para a realização das análises foram convenientemente escolhidas regiões próximas às bordas superiores (não penetradas por íons cloreto) e às bordas inferiores (penetradas por íons cloreto) das amostras, sendo utilizadas, em cada uma delas, ampliações de imagem que variaram de 35 a 50.000 vezes, possibilitando a investigação da microestrutura dos concretos sob diferentes perspectivas e escalas.

Dessa forma, as Figuras 4.52 e 4.53 apresentam um conjunto de fotomicrografias obtidas por MEV, com utilização de detector de feixe de elétrons secundários, em regiões próximas às bordas superiores e inferiores das amostras de concreto pertencentes aos traços TE00C2, TE30C2 e TE60C2 e nas ampliações de 3.500x, 5.000x, 10.000x e 20.000x.

Observou-se, na maioria das imagens obtidas, a ocorrência de grânulos de silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) com a morfologia de aglomerados de pequenos grãos equiaxiais formando flocos. Outras estruturas de forma acicular foram identificadas, as quais sugerem ser sulfoaluminatos de cálcio (etringita), como pode ser visto na Figura 4.55.

Observou-se, em algumas das imagens, a presença de algumas microfissuras, as quais podem ter sido eventualmente geradas durante o processo de seccionamento diametral das amostras no decorrer do ensaio acelerado de migração de cloretos.

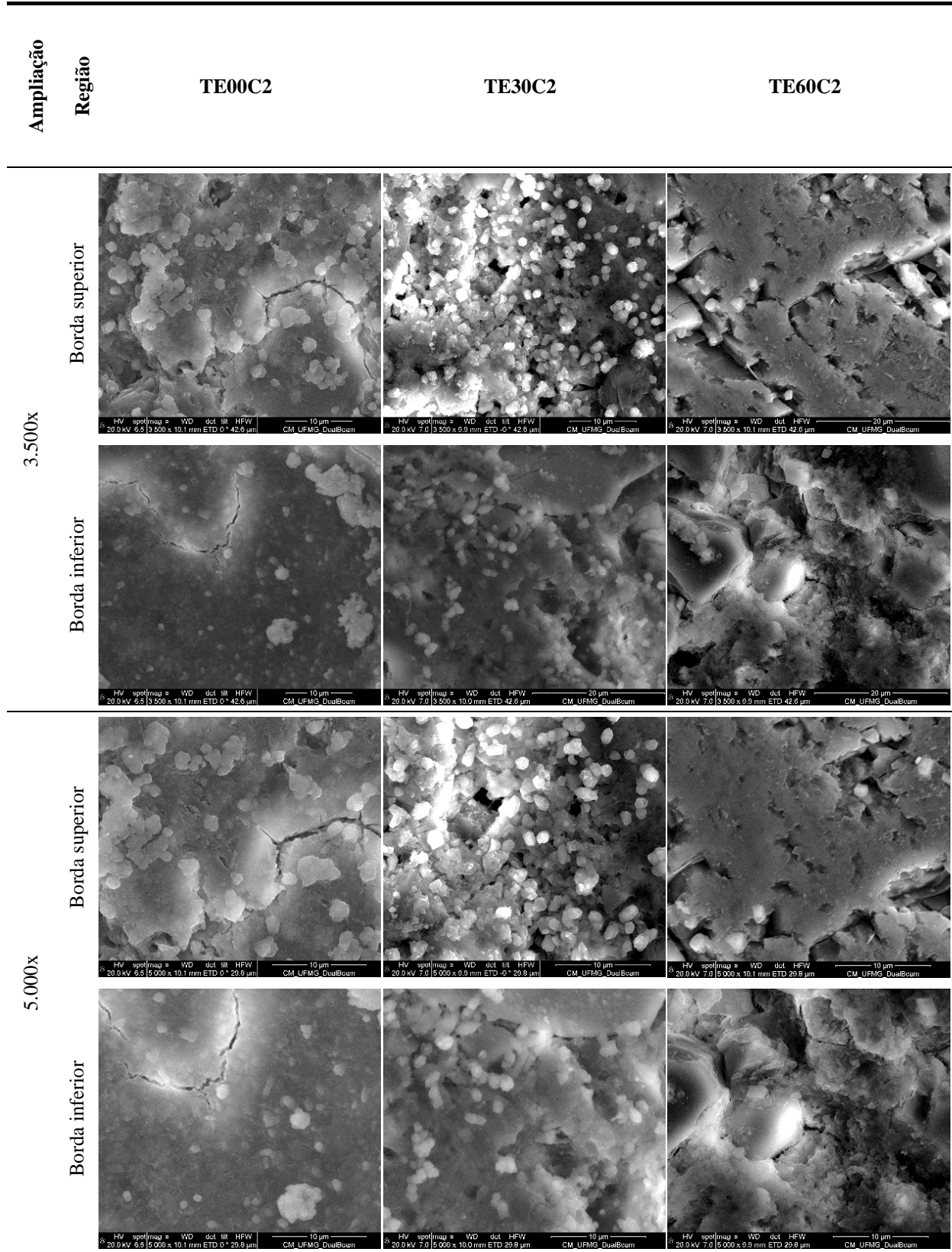


Figura 4.52 - Fotomicrografias obtidas por MEV, via feixe de elétrons secundários, em regiões próximas às bordas superiores (não penetradas por íons cloreto) e inferiores (penetradas por íons cloreto) das amostras de concreto pertencentes aos traços TE00C2, TE30C2 e TE60C2 nas ampliações de 3.500x e 5.000x

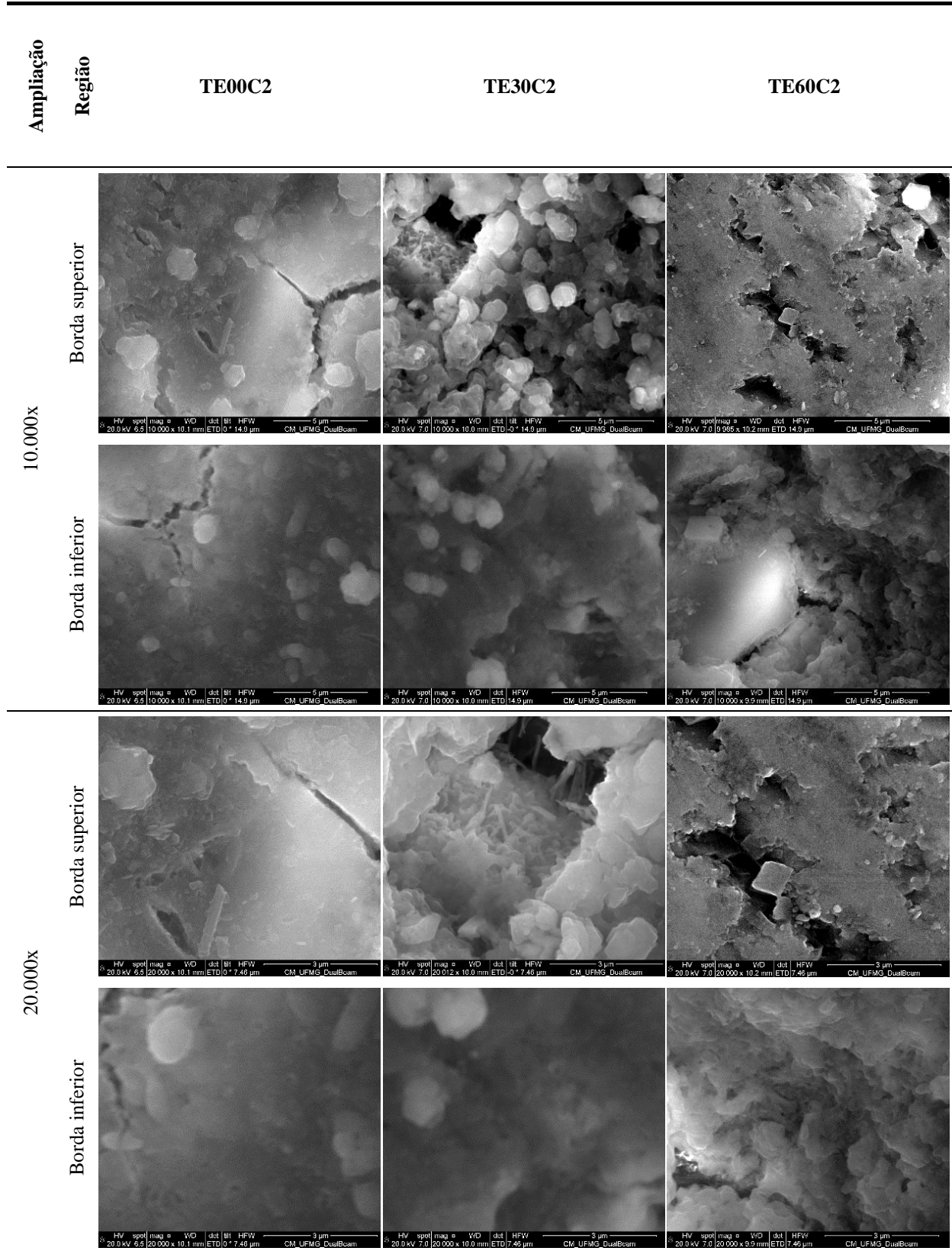


Figura 4.53 - Fotomicrografias obtidas por MEV, via feixe de elétrons secundários, em regiões próximas às bordas superiores (não penetradas por íons cloreto) e inferiores (penetradas por íons cloreto) das amostras de concreto pertencentes aos traços TE00C2, TE30C2 e TE60C2 nas ampliações de 10.000x e 20.000x.

Constatou-se, ao se comparar duas imagens da mesma amostra e com mesma ampliação provenientes de regiões distintas, a existência de uma maior quantidade de produtos de hidratação e de uma matriz cimentícia mais compacta nas regiões próximas às bordas superiores das amostras (não penetradas por íons cloreto) em comparação às regiões próximas às bordas inferiores (penetradas por íons cloreto), o que sugere a ocorrência de uma possível objeção da formação de tais produtos e/ou transformação destes em outros compostos nos casos em que os íons cloreto estiveram presentes nas amostras.

Além disso, a comparação de imagens obtidas com uma mesma ampliação e numa mesma região de análise indicaram a existência de uma matriz cimentícia mais fechada à medida que uma maior quantidade de escória de alto forno foi incorporada aos concretos produzidos, isto é,  $TE60C2 > TE30C2 > TE00C2$ . Notou-se, nos concretos com adição de escória, um considerável incremento da presença de produtos de hidratação e a formação de uma microestrutura mais refinada e compacta, corroborando com as observações presentes nas literaturas consultadas.

Estas constatações são ratificadas pelas Figuras 4.54 e 4.55, as quais exibem imagens obtidas nas regiões próximas às bordas superiores (não penetradas por íons cloreto) de amostras de diferentes traços para as ampliações de 1.000x e 50.000x, respectivamente. De fato, verifica-se nas imagens a ocorrência de alteração da morfologia das estruturas presentes e a formação de uma matriz mais coesa e, conseqüentemente, mais impermeável nos concretos com adição de escória.

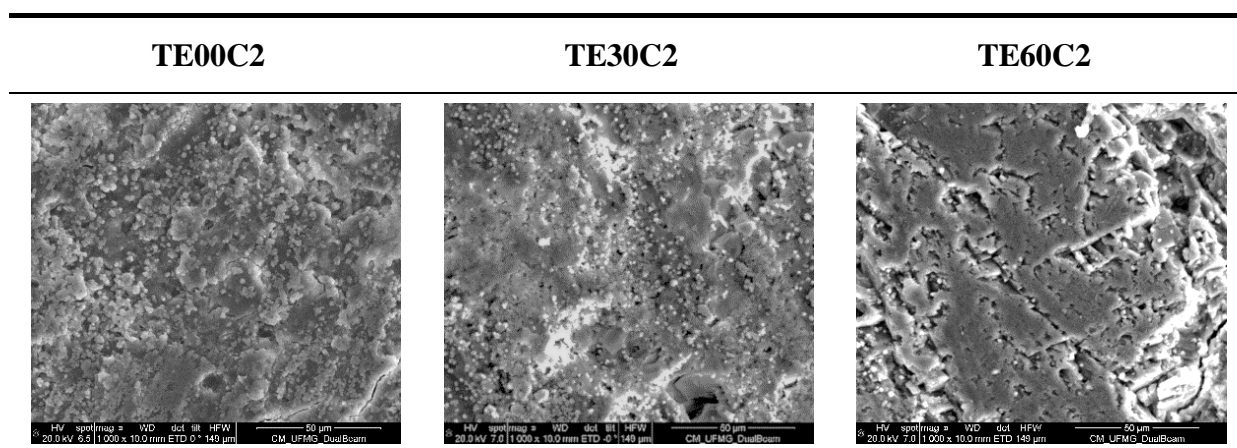


Figura 4.54 - Fotomicrografias obtidas por MEV, via detector de elétrons secundários, em regiões próximas às bordas superiores (não penetradas por íons cloreto) com ampliação de 1.000x

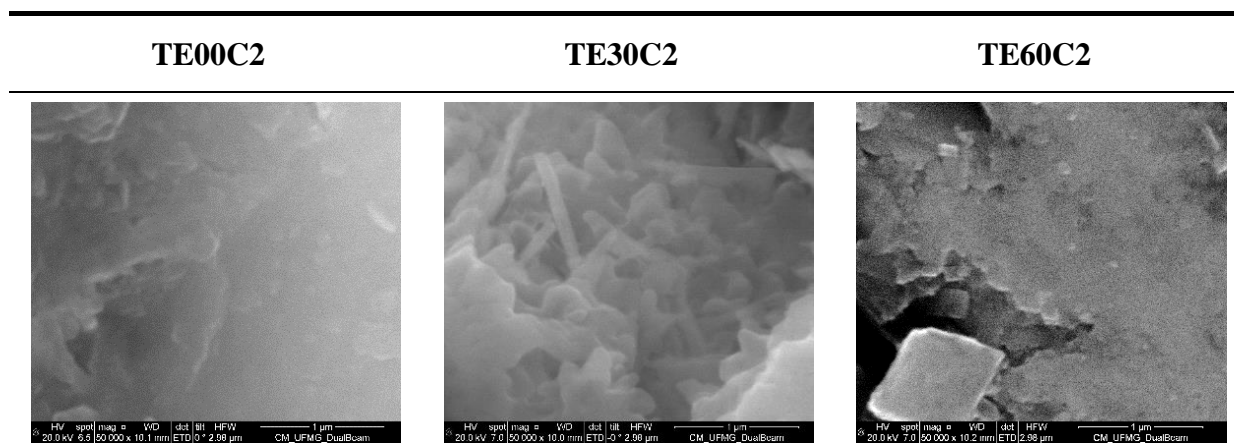


Figura 4.55 - Fotomicrografias obtidas por MEV, via detector de elétrons secundários, em regiões próximas às bordas superiores (não penetradas por íons cloreto) com ampliação de 50.000x

Ademais, procederam-se análises químicas qualitativas, com utilização da técnica de EDS (espectroscopia por dispersão de energia de raios-X), em regiões centrais e próximas às bordas superiores e inferiores das amostras com o propósito de se investigar a composição de cada uma das fases observadas nas imagens obtidas por MEV, bem como de se evidenciar a presença do elemento cloro nas porções penetradas das amostras. Os mapas de análise química foram gerados a partir de fotomicrografias captadas por detector de elétrons secundários, as quais abrangeram áreas de aproximadamente 2 x 2 mm em ampliações da ordem de 65x.

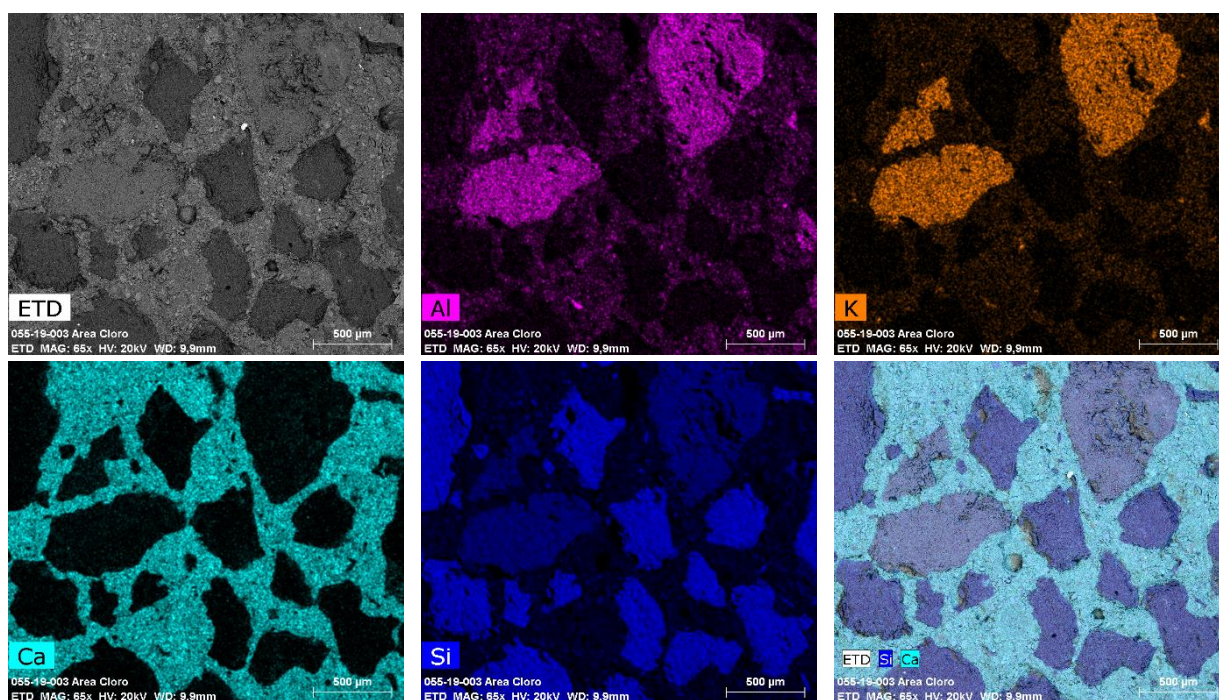


Figura 4.56 - Mapa de identificação dos elementos químicos presentes nas fases da imagem em análise realizada em região próxima à borda inferior da amostra do traço TE60C2

A Figura 4.56 apresenta, exemplificadamente, a distribuição de alguns dos principais elementos químicos identificados nas fases presentes nas amostras analisadas. Salienta-se a preponderância do elemento cálcio na fase referente à matriz cimentícia e do silício na fase relativa aos agregados do concreto.

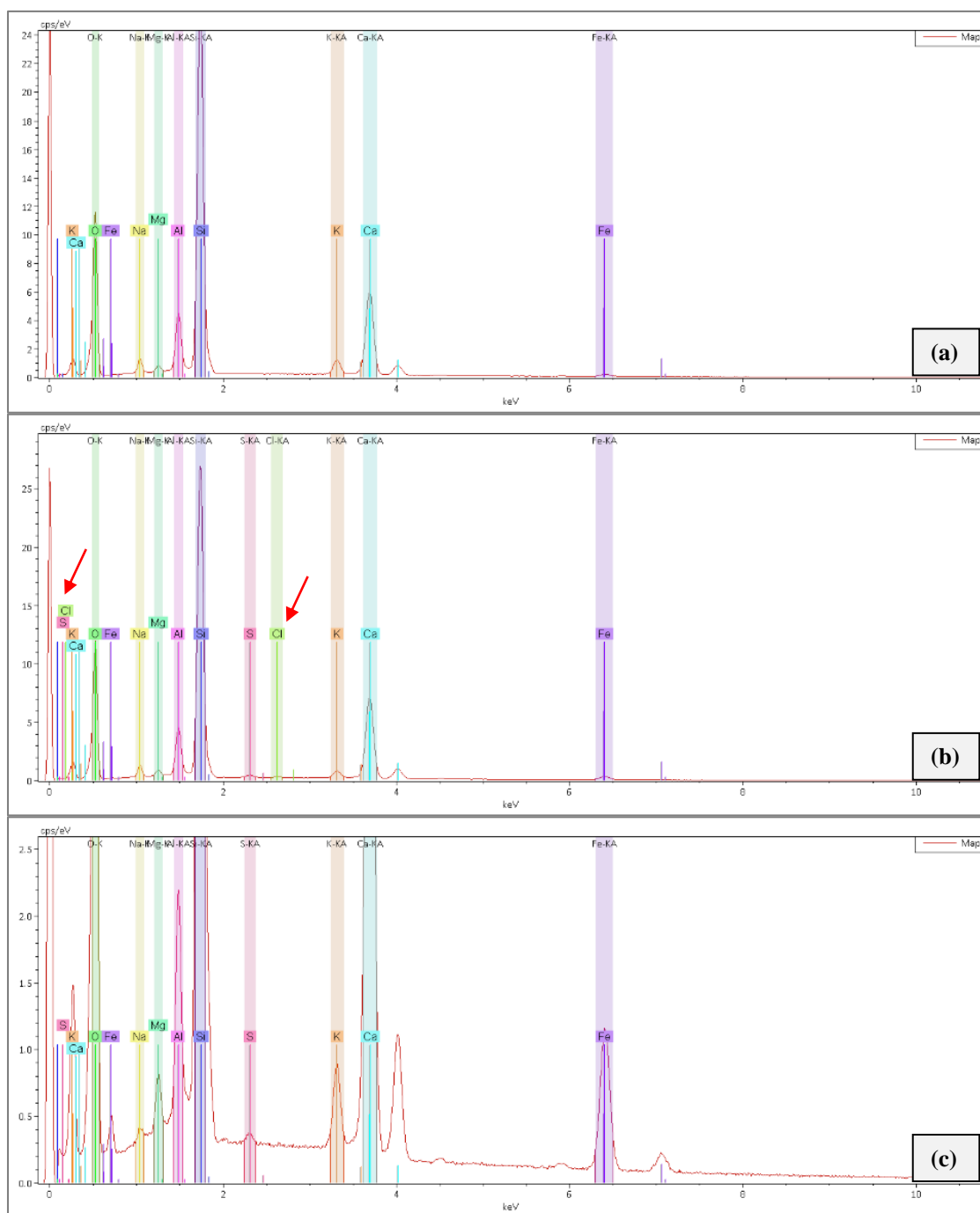


Figura 4.57 - Espectrogramas gerados a partir da análise química por EDS de uma amostra de concreto pertencente ao traço TE30C2, sendo estas relativas a:  
 (a) região próxima à borda superior;  
 (b) região próxima à borda inferior;  
 (c) região central da amostra.

A Figura 4.57 apresenta, à título de exemplo, alguns espectrogramas gerados a partir das análises químicas realizadas em diferentes regiões das amostras de concreto estudadas.

Averiguou-se, por meio espectroscopia por energia dispersiva (EDS), que os principais elementos presentes nas amostras eram cálcio, oxigênio, carbono, ferro, silício e alumínio, como esperado. Outros, tais como potássio, magnésio e sódio também foram identificados, apresentando-se como elementos-traço e distribuindo-se de forma bastante dispersa nas amostras analisadas.

Em todos os casos analisados (TE00C2, TE30C2 e TE60C2), as análises qualitativas apontaram a presença do elemento cloro nas regiões próximas às bordas inferiores (penetradas durante o ensaio de migração) das amostras e a ausência deste nas regiões centrais e próximas às bordas superiores (não penetradas durante o ensaio de migração), como observado na Figura 4.57, o que ratifica a evidenciação colorimétrica por aspersão de solução de nitrato de prata realizada no curso do ensaio de migração de cloretos.

Por sua vez, a Figura 4.58 apresenta o mapa de concentração do elemento cloro em uma região próxima à borda inferior (penetrada por íons cloreto). Percebe-se que há uma dispersão do elemento em praticamente toda a área analisada, entretanto, as maiores concentrações deste elemento estão presentes nas porções relativas à matriz cimentícia do concreto uma vez que estes por ela penetraram durante o processo de migração.

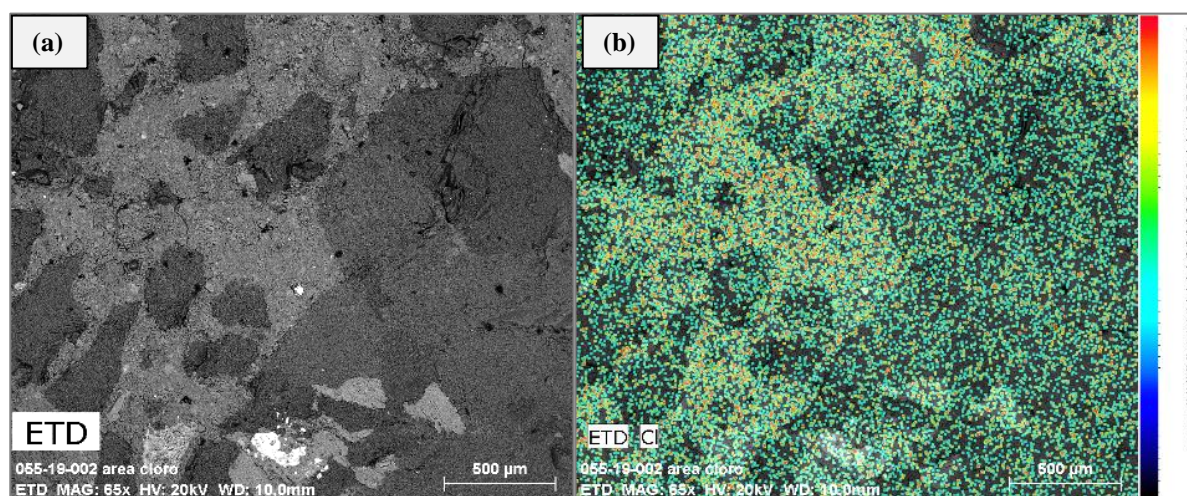


Figura 4.58 - Distribuição do elemento cloro em região de análise próxima à borda inferior da amostra de concreto pertencente ao traço TE30C2, sendo:  
(a) imagem MEV por elétrons secundários com ampliação de 65x;  
(b) mapa de concentração do elemento cloro na respectiva área de análise.

# 5

## CONCLUSÕES

São apresentados neste capítulo as conclusões finais obtidas pela realização da presente pesquisa e as recomendações consideradas oportunas para os futuros trabalhos acadêmicos relacionados ao tema.

### 5.1 Conclusões da pesquisa

A utilização de escória de alto forno em substituição parcial ao cimento Portland comum apresentou efeitos, maiores ou menores, em todas as propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade analisadas. De modo geral, constatou-se que a introdução das variáveis experimentais propostas acarretou efeitos congêneres nas propriedades dos concretos produzidos com diferentes teores de substituição de cimento Portland por escória de alto forno, independentemente da classe de agressividade ambiental adotada e/ou da idade investigada, o que sugere uma satisfatória reprodutibilidade dos resultados obtidos.

No tocante às consistências dos concretos no estado fresco, verificou-se que todos eles apresentaram valores de abatimento do tronco de cone dentro dos intervalos pré-estabelecidos para o presente trabalho. Em virtude da não utilização de aditivos plastificantes, os concretos pertencentes à classe de agressividade ambiental II ( $a/c = 0,60$ ), apresentaram abatimentos maiores que os da classe de agressividade ambiental III ( $a/c = 0,55$ ). Ademais, constatou-se que os concretos com adição de escória apresentaram índices de consistência similares ou maiores aos dos concretos de referência, sem adições, para uma mesma relação água/cimento, indicando que a incorporação da escória de alto forno não acarretou redução da trabalhabilidade dos concretos analisados.

Como era esperado, os concretos fabricados com cimento Portland puro, com hidratação rápida, obtiveram resistências iniciais mais elevadas e pequeno incremento desta com o

avanço do tempo. De modo contrário, os demais concretos analisados, produzidos com adição de escória de alto forno, apresentaram resistências iniciais reduzidas em virtude da menor reatividade deste material em relação ao cimento Portland puro, apresentando, entretanto, ganhos de resistência mais expressivos em idades mais avançadas e demonstrando ainda, em vista da evolução dos resultados observados, uma capacidade de ganho de resistência na última idade analisada. Além disso, a menor reatividade dos cimentos com escória também pode ser oriunda da menor finura destes cimentos em relação ao cimento puro, sendo decorrente do processo industrial de fabricação. Por sua vez, a utilização de uma classe de qualidade de concreto mais restritiva com a redução da relação água/cimento foi efetiva na melhoria das propriedades mecânicas em todos os cenários analisados quando estes são comparados aos concretos de outra classe, mas com um mesmo teor de escória de alto forno e ensaiados na mesma idade.

A substituição parcial de cimento Portland por escória de alto forno provocou a redução das absorções de água por capilaridade em comparação com os concretos de referência, sendo estas reduções potencializadas com o aumento do teor de escória utilizado. A redução da relação água/cimento dos concretos também acarretou em diminuições das absorções de água, no entanto, estas foram menos expressivas do que as oriundas da utilização de escória. Do mesmo modo, menores índices de vazios foram obtidos quando mais escória foi utilizada e/ou quando a relação água/cimento decresceu, sendo decorrentes, em ambos os casos, da obtenção de uma menor porosidade e do refinamento da microestrutura.

No tocante às resistências à penetração de íons cloreto, a adição de escória de alto forno acarretou na diminuição dos coeficientes de migração, sendo tais reduções amplificadas com o aumento do teor de substituição. Além disso, a redução da relação água/cimento acarretou também a diminuição destes coeficientes quando mantidos o teor de escória e a idade dos concretos, a qual por sua vez, mostrou-se um fator interveniente relevante. Tais reduções foram mais expressivas quando advindas das substituições por escória de alto forno do que quando provenientes da redução da relação água/cimento. Verificou-se que, no que concerne às melhorias obtidas pela incorporação da escória de alto forno, além do aspecto físico de refinamento da estrutura de poros dos concretos, evidenciado nos demais ensaios realizados, a composição química dos cimentos mostrou-se um importante fator de potencialização das reduções de coeficiente de migração de cloretos uma vez que a escória de alto forno propiciou

a melhoria da capacidade de fixação de cloretos na matriz cimentícia, implicando em melhorias ainda mais significativas na propriedade de resistência à penetração de cloretos.

A utilização da escória de alto forno em substituição ao cimento Portland comum permitiu, com base na classificação apresentada no Quadro 2.3, que concretos com baixa e moderada resistência à penetração de cloretos, aos 28 dias, passassem a uma condição de alta resistência à penetração de cloretos, para os dois teores de adição adotados, 30% e 60%.

Os resultados obtidos indicam que a substituição parcial de cimento Portland por escória de alto forno propiciou, em todos os cenários analisados, expressivos aumentos nos valores de resistividade elétrica dos concretos. As resistividades elétricas obtidas pela adição de 30% de escória apresentaram valores até 4,5 maiores, enquanto ao se incorporar 60% de escória foram logrados incrementos de até 7,5 vezes nestes valores. Observou-se ainda a existência de uma efetiva correlação, em sentido inverso de grandeza, entre os valores de resistividade elétrica superficial e os coeficientes de migração de cloretos.

As análises microestruturais realizadas por MEV apontaram que a substituição parcial de clínquer por escória de alto forno acarretou em uma matriz cimentícia mais refinada. Verificou-se a presença de uma maior quantidade de produtos de hidratação e a formação de uma microestrutura mais compacta à medida que o teor de escória incorporada se elevou. Da mesma forma, constatou-se que as regiões não penetradas por íons cloreto das amostras analisadas apresentaram matriz cimentícia mais apurada do que as regiões penetradas durante o ensaio de migração de cloretos. Além disso, as análises químicas qualitativas, realizadas por EDS, confirmaram a existência de cloro nas regiões anteriormente evidenciadas por meio de indicador colorimétrico.

É oportuno destacar que a correlação dos resultados obtidos nos diferentes ensaios realizados evidenciou que a resistência à compressão não representa, por si só, um parâmetro de qualidade do concreto uma vez que a adição de escória de alto forno aos concretos, por exemplo, implicou concomitantemente em redução da resistência à compressão e em melhoria de propriedades relacionadas à durabilidade (coeficiente de migração de cloretos, resistividade elétrica, absorção de água, etc), ressaltando a necessidade de especificação dos concretos não apenas pela sua resistência mecânica, mas também por meio dos parâmetros de durabilidade, tais como relação água/cimento e composição dos materiais cimentícios.

As análises estatísticas dos valores experimentais, obtidos pela realização dos ensaios propostos, permitiram concluir sobre a efetiva significância dos resultados observados, propiciando condições seguras para as inferências aqui apresentadas, tanto ratificando as deduções preliminares, como na maioria dos casos analisados, quanto as contrapondo, conforme verificado na análise da influência da adição de escória para os resultados de resistência à tração por compressão diametral.

## **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Diante das conclusões finais oriundas da presente pesquisa, entende-se que esta contuiu com a revisão de conceitos e com a ampliação da discussão sobre o tema, entretanto, algumas recomendações são oportunas para serem assimiladas para os futuros trabalhos relacionados com o tema, as quais destacam-se:

- A disponibilidade de maior quantidade de cimentos especiais com diferentes teores de escória de alto forno viabilizaria a realização de outros ensaios de caracterização dos concretos produzidos, bem como a realização dos ensaios propostos neste trabalho em idades adicionais, principalmente, em idades avançadas, as quais mostraram-se importantes de serem melhor estudadas tendo em vista que os concretos com escória possuem hidratação lenta e a observação de seus comportamentos nas referidas idades torna-se demasiadamente relevante;
- Os teores de substituição parcial de cimento por escória de alto forno estudados (0 %, 30 % e 60 %) mostraram-se bastante representativos no sentido de observação da influência desta variação nos comportamentos dos concretos produzidos, entretanto, sugere-se que os próximos trabalhos considerem a adoção de outros teores intermediários ou ainda maiores para melhor conhecimento da evolução dos efeitos produzidos por estas substituições;
- Quanto ao plano experimental da pesquisa, as análises estatísticas mostraram ser prudente o aumento do espaço amostral dos ensaios para uma melhor validação estatística dos resultados obtidos. Sendo assim, recomenda-se um número não menor que 3 (três) amostras por ensaio/idade.

# 6

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO - AMERICAN ASSOCIATION OF STATE AND HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS. T 358-17: *Standard method of test for surface resistivity indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration*. Washington, DC. American Association of State and Highway Transportation Officials, 2017. 10p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5733: *Cimento Portland de alta resistência inicial*. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1991. 5p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5735: *Cimento Portland de alto-forno*. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1991. 5p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: *Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015. 13p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: *Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018. 9p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: *Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014. 238p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: *Agregado para concreto - Especificação*. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009. 11p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: *Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão*. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1996. 8p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: *Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2011. 14p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8953: *Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência*. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015. 2p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: *Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005. 8p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9779: *Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade*. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012. 2p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655: *Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento*. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015. 29p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15900-1: *Água para amassamento do concreto*. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009. 11p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: *Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente*. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009. 6p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 53: *Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009. 8p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 67: *Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1998. 8p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: *Agregados - Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003. 6p.

ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 201: *Guide to Durable Concrete (ACI 201.2R-01)*. Farmington Hills. American Concrete Institute, 2001. 41p.

ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 222: *Protection of Metals in Concrete Against Corrosion*. Farmington Hills. American Concrete Institute, 2002.

ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 233: *Ground granulated blast-furnace slag as a cementitious constituent in concrete (ACI 233R-95)*. Farmington Hills. American Concrete Institute, 1995.

ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 318: *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08)*. Farmington Hills. American Concrete Institute, 2008.

ALHOZAIMY, A.; HUSSAIN, R.; AL-NEGHEIMISH, A.; AL-ZAID, R.; SINGH, D. *Effect of simulated concrete pore solution chemistry, chloride ions, and temperature on passive layer formed on steel reinforcement*. ACI Materials Journal. American Concrete Institute. v. 111, n. 4, p. 411-421, ago. 2014.

AL-KHAJA, Waheeb A. *Influence of temperature, cement type and level of concrete consolidation on chloride ingress in conventional and high-strength concretes*. Construction and Building Materials, v. 11, n. 1, p. 9-13, fev. 1997.

ALMENAR, G V. *Chloride ingress into concrete: analyse methods, non-destructive detection and transport modelling under a limited first approach*. Tese de Doutorado. Alicante University. Alicante, Espanha, 2000.

ALONSO, C.; ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M.; CASTRO, P. *Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar*. Cement and Concrete Research, v. 30, p. 1047-1055, 2000.

ALONSO, C.; ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M.; CASTRO, P. *Valores criticos de cloruros para depassivar aceros de refuerzo embebidos en un mortero estandarizado de cemento Portland*. In: Anais do Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções, ed. 4, 1997. Porto Alegre: UFRGS, p.555-562, 1997.

ANDRADE, C. *Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras*. São Paulo: PINI, 1992. 104p.

ANDRADE, C. Quantification of durability of reinforcing steel - Methods and calculation procedures. In: *Design for durability: the Great Belt Link*. RILEM. London: Taylor & Francis, p. 157-172, 1995.

ÅRSKOG, V.; FERREIRA, M.; LIU, G.; GJØRV, O.E. Effect of cement type on the resistance of concrete against chloride penetration. In: *Proceedings, fifth international conference on concrete under severe conditions – Environment and loading*, vol. 1, Paris, p. 367-374, 2007.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C 618. *Standard specifications for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as mineral admixture in Portland cement concrete*. West Conshohocken, USA. ASTM International, 2000.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C 1152 - 03: *Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete*. West Conshohocken, USA. ASTM International, 2012. 3p.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C 1202 - 19: *Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration*. West Conshohocken, USA. ASTM International, 2019. 8p.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C 1411: *Standard test methods for water-soluble chlorides present as admixtures in graded aggregate road mixes*. West Conshohocken, USA. ASTM International, 2014.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C 1556. *Standard test method for determining the apparent chloride diffusion coefficient of cementitious mixtures by bulk diffusion*. West Conshohocken, USA. ASTM International, 2016.

ATKINSON, A.; NICKERSON, A. K. *The diffusion of ions through water-saturated cement*. Journal of Materials Science, n. 19, p. 3068-3078, 1984.

BAKKER, R. Initiation period. In: SCHIESSL, P. (Ed.) *Corrosion of steel in concrete*. New York: Chapman and Hall, p. 22-55, 1988.

BAROGHEL-BOUNY, Véronique; CAPRA, Bruno. LAURENS, Stéphane. A durabilidade das armaduras e do concreto de cobrimento. In: OLLIVIER, Jean-Pierre; VICHOT, Angélique (Ed.). *Durabilidade do Concreto: Bases científicas para formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente*. Ed. Tradução: CASCUDO, Oswaldo; CARASEK, Helena. São Paulo: IBRACON, p. 255-326, 2014.

BASHEER, P. M. A. *Monitoring electrical resistance of concretes containing alternative cementitious materials to assess their resistance to chloride penetration*. Cement and Concrete Composites. USA : Elsevier Science, n. 24, p. 4371-4449, 2002.

BERNDT, M. L. *Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate*. Construction and Building Materials. v. 23, n. 7, p. 2606-2613, jul. 2009.

BIJEN, J. *Blast furnace slag for durable marine structures*. Hertogenbosch, Holanda. VNC/BetonPrisma: 1998.

BSI - BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS 8110-1: *Structural use of concrete. Part 1: Code of practice for design and construction*. Londres, British Standards Institution, 1997. 160p.

BYFORS, K. *Chloride - initiated reinforcement corrosion: chloride binding*. Stockholm: CBI, 1990. 121 p.

CASCUDO, O. *O controle da corrosão de armaduras em concreto: Inspeção e Técnicas Eletroquímicas*. São Paulo: Ed. PINI, 1997.

CASSGNABERE, F.; MOURET, M.; ESCADEILLAS, G. *Early hydration of clinker-slag-metakaolin combination in steam curing conditions, relation with mechanical properties*. Cement and Concrete Research, v. 39, n. 1, pp. 1164-1173. 2009.

CHANG, Honglei. *Chloride binding capacity of pastes influenced by carbonation under three conditions*. Cement and Concrete Composites, [s.l.], v. 84, p.1-9, nov. 2017.

CHOI, Young Cheol; KIM, Jiyong; CHOI, Seongcheol. *Mercury intrusion porosimetry characterization of micropore structures of high-strength cement pastes incorporating high volume ground granulated blast-furnace slag*. Construction and Building Materials, v. 137, p.96-103, abr. 2017.

CIGNA, R. *et al. Corrosion of steel in reinforced concrete structures*. In: COST Action 521 – Final Report. Luxembourg: European Community, 2003.

COLLEPARDI, M.; MARCIALIS, A.; TURRIZIANI, R. *The kinetics of chloride ions penetration in concrete*. II Cemento. v. 67, p. 157-164, 1970.

CPH - COMISIÓN PERMANENTE DEL HORMIGÓN. EHE 08: *Instrucción de hormigón estructural*. Madrid. Centro de Publicaciones del Ministerio de Fomento de España, 2011. 804p.

CUNHA, A.C.Q.; HELENE, P.R.L. *Despassivação das armaduras de concreto por ação da carbonatação*. São Paulo: EPUSP, 2001. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, 2001. 13p.

DHIR, R. K.; EL-MOHR, M. A. K.; DYER, T. D. *Chloride binding in GGBS concrete*. Cement and Concrete Research, vol. 26, n. 12, p. 1767–1773. 1996.

DOUSTI, A.; RASHETNIA, R.; AHMADI, B.; SHEKARCHI, M. *Influence of exposure temperature on chloride diffusion in concretes incorporating silica fume or natural zeolite*. Construction and Building Materials, [s.l.], v. 49, p. 393-399, dez. 2013.

DYER, T. *Concrete Durability*. Boca Raton: CRC Press, 2014.

ECS - EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 206-1: *Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity*. Bruxelas. European Committee for Standardization, 2000. 70p.

ELFMARKOVA, V.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. *Determination of the chloride diffusion coefficient in blended cement mortars*. Cement and Concrete Research, [s.l.], v. 78, p. 190-199, dez. 2015.

FATTUHI, N. I. *Concrete carbonation as influenced by curing regime*. Cement and Concrete Research, v. 18, p. 426-430, 1988.

FERREIRA, A. A. *Concreto de alto desempenho com adição de cinza de casca de arroz: avaliação de propriedades relacionadas com a durabilidade*. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1999. 132p.

FIB - FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. Bulletin n° 3: *Structural Concrete – The textbook on behaviour, design and performance*. Lausana, Suíça. International Federation for Structural Concrete, dez 1999. 286p.

FIB - FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. Bulletin n° 34: *Model code for Service Life Design*. Lausana, Suíça. International Federation for Structural Concrete, 2006. 116p.

FIGUEIREDO, Enio Pazini; MEIRA, Gibson Rocha. *Corrosão das armaduras das estruturas de concreto*. Mérida, México: ALCONPAT Internacional, v. 6, mar 2013. 30p.

FIGUEIREDO, Enio Pazini. Efeitos da Carbonatação e de Cloretos no Concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. Vol. 2. Cap. 27. São Paulo: IBRACON, p. 829-855, 2005.

GENTIL, V. *Corrosão*. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

GJØRV, Odd E. *Durability design of concrete structures in severe environments*. 2ª ed. Boca Raton: CRC Press, 2014. 254 p.

GJØRV, O.E.; TAN, K.; KHANG, M. H. *Diffusivity of chlorides from seawater into high-strength lightweight concrete*. ACI Materials Journal, v. 89, n. 1, p. 3-12, 1994.

GJORV, O. E.; VENNESLAND, O. *Diffusion of chlorides ions from seawater into concrete*. Cement and Concrete Research, v. 91, p. 229-238, 1979.

GLASS, G. K.; BUENFELD, N. R. *The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete*. Corrosion Science: Great Britain, v. 39, n. 5, p. 1001-1013, 1997.

GONI, S.; ANDRADE, C. *Synthetic concrete pore solution chemistry and rebar corrosion rate in the presence of chlorides*. Cement and Concrete Research: Nova York, vol. 20, nº 14, jul 1990.

GUIMARÃES, E. A. *Avaliação da capacidade protetora da resina de óleo de mamona contra a penetração de agentes agressivos no concreto*. 150p. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Brasília, 1997.

HANSSON, C. M.; STRUNGE, H.; MARKUSSEN, J. B.; FROLUND, T. *The effect of cement type on the diffusion of chloride*. Nordic Concrete Research, v. 4, p. 70-80, 1985.

HAUSMANN, D. A. *Steel corrosion in concrete: how does it occur?* Materials Protection, p. 19-23, 1967.

HELENE, P. R. L. *Corrosão em estruturas de concreto armado: Teoria, controle e métodos de análise*. 1ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

HELENE, P. R. L. *Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado*. 248 p. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HKBD - HONG KONG BUILDING DEPARTMENT. *Code of practice for precast concrete construction*. Hong Kong. Buildings Department, 2016. 85p.

IPAVEC, A.; VUK, T.; GABROVA EK, R.; KAUAIA, V. *Chloride binding into hydrated blended cements: The influence of limestone and alkalinity*. Cement and Concrete Research, v. 48, p. 74-85, jun. 2013.

ISAIA, G. C. *Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura*. 280p. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. 1920-11: *Testing of concrete - Part 11: Determination of the chloride resistance of concrete, unidirectional diffusion*. 1 ed. Suíça, 2013. 28 p.

JAEGERMANN, C. *Effect of water-cement ratio and curing on chloride penetration into concrete exposed to Mediterranean sea climate*. ACI Materials Journal, v. 87, n. 4, p. 333-339, 1990.

JSCE - JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. *Guidelines n° 15: Standard specifications for concrete structures – Design*. Tóquio. Japan Society Of Civil Engineers, 2010. 503p.

JUSTNES, H.; KIM, M.O.; NG, S.; QIAN, X. *Methodology of calculating required chloride diffusion coefficient for intended service life as function of concrete cover in reinforced marine structures*. Cement and Concrete Composites, v. 73, p. 316-323, out. 2016.

KIM, Myung-yu; YANG, Eun-ik; YI, Seong-Tae. *Application of the colorimetric method to chloride diffusion evaluation in concrete structures*. Construction and Building Materials, v. 41, p. 239-245, abr. 2013.

KIM, Yail J.; BUMADIAN, Ibrahim. *Chemicoelectrical response of concrete bonded with carbon fiber-reinforced polymer sheets in a corrosive environment*. ACI Materials Journal, v. 114, n. 4, p. 549-558, ago. 2017.

KONG, Lijuan; GE, Yong. *Mechanism Study of Effect of Coarse Aggregate Size on Permeability of Concrete*. ACI Materials Journal, v. 112, n. 6, p. 767-774, dez. 2015.

KROPP, J. Chlorides in Concrete. In: KROPP, J.; HILSDORF, H. K. *Performance criteria for concrete durability*. London: CRC Press, p. 138-164, 2014.

LAMBERT, P.; PAGE, C. L.; VASSIE, P. R. W. *Investigations of reinforcement corrosion - electrochemical monitoring of steel in chloride contaminated concrete*. Materials and Structures, v. 24, p. 351-358, 1991.

LEA, F. M. *The chemistry of cement and concrete*. Nova York: 1971. 414p.

LEE, Han-Seung; WANG, Xiao-Yong; ZHANG, Li-Na; KOH, Kyung-Taek. *Analysis of the optimum usage of slag for the compressive strength of concrete materials*. MDPI Materials, v. 8, n. 3, p. 1213-1229, mar. 2015.

LEE, N. K.; LEE, H. K. *Influence of the slag content on the chloride and sulfuric acid resistances of alkali-activated fly ash/slag paste*. Cement and Concrete Composites, v. 72, p. 168-179, set. 2016.

LIAM, K. C.; ROY, S. K.; NORTHWOOD, D. O. *Chloride ingress measurements and corrosion potential mapping study of a 24-year-old reinforced concrete jetty structure in a tropical marine environment*. Magazine of Concrete Research, v. 44, n. 160, p. 205-215, set. 1992.

LIM, Tze Yang Darren; TENG, Susanto; BAHADOR, Sabet Divsholi; GJORV, Odd E. *Durability of very-high-strength concrete with supplementary cementitious materials for marine environments*. ACI Materials Journal, v. 113, n. 1, p. 95-103, fev. 2016.

LIU, Jun; QIU, Qiwen; CHEN, Xiaochi; XING, Feng; HAN, Ningxu; HE, Yijian; MA, Yueshan. *Understanding the interacted mechanism between carbonation and chloride*

*aerosol attack in ordinary Portland cement concrete*. Cement and Concrete Research, v. 95, p. 217-225, mai 2017.

LIU, Yanbo; PRESUEL-MORENO, Francisco; PAREDES, Mario. *Determination of chloride diffusion coefficients in concrete by electrical resistivity method*. ACI Materials Journal, v. 112, n. 5, p. 631-640, out. 2015.

LNEC - LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL. E 463: *Betões. Determination of diffusion coefficient of chlorides from non-steady-state migration test*. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2004. 8p.

MADRID, J. A. Cabrera; GARCÍA, J. I. Escalante; BORGES, P. Castro. *Resistência à compressão de concreto com escória de alto forno. Revisão do estado da arte*. Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción – Alconpat. Mérida, v. 6, n. 1, p. 64-83, abr. 2016.

MAGALHÃES, A. G. *Caracterização e análise macro e microestrutural de concretos fabricados com cimentos contendo escórias de alto forno*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007. 268 p.

MANGAT, P. K.; MOLLOY, B. T. *Factors, influencing chloride-included corrosion of reinforcement in concrete*. Materials and Structures, v. 25, p. 404-411, 1992.

MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de; ANDRADE, Jairo José de Oliveira; HELENE, Paulo. *Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto*. In: ISAIA, Geraldo Cechella (ed.). *Concreto: Ciência e Tecnologia*. v. I. Cap. 22. São Paulo: IBRACON, p. 773-808, 2011.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. 2ª ed. São Paulo: IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto, 2014. 782 p.

MEHTA, P. K.; SCHIESSL, P.; RAUPACH, M. *Performance and durability of concrete systems*. In: *International Congress on the Chemistry of Cement*, n. 9. New Delhi: nov. 1992.

MEIRA, Gibson Rocha. *Corrosão de armaduras em estruturas de concreto: Fundamentos, diagnóstico e prevenção*. João Pessoa: Editora IFPB, 2017. 127 p.

MEIRA, Gibson Rocha. *Agressividade por cloretos em zona de atmosfera marinha frente ao problema da corrosão em estruturas de concreto armado*. 369 p. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.

MONTEIRO, E. C. B.; PEREIRA, V. C. O. *Study of the protective capacity of cements regarding corrosion of reinforcements under joint action of CO<sub>2</sub> and chloride ions*. Journal of Civil Engineering and Architecture, v. 9, p. 1017-1024, 2015.

MOTA, J. M. F.; BARBOSA, F. R.; COSTA e SILVA, A. J.; FRANCO, A. P. G.; CARVALHO, J. R. *Corrosão de armadura em estruturas de concreto armado devido ao ataque de íons cloreto*. In: Anais do CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, n. 54. Maceió: IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto, 2012. 16 p.

NEPOMUCENO, Antônio Alberto. Mecanismos de transporte de fluidos no concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella (ed.). *Concreto: Ensino, pesquisa e realizações*. v. 2. Cap. 26. São Paulo: IBRACON, p. 793-827, 2005.

NEVILLE, Adam Matthew. *Propriedades do concreto*. 5ª ed. São Paulo: PINI, 2015. 912 p.

NEVILLE, A. M. *Properties of concrete*. Harlow: Pearson Education, 2011.

NIELSEN, E. P., GEIKER, M. R. *Chloride diffusion in partially saturated cementitious material*. Cement and Concrete Research, n. 33, p. 133-138, 2003.

NILSSON, L.; NGO, M. H.; GJØRV, O. E. High-performance repair materials for concrete structures in the port of Gothenburg. In: GJØRV, O. E. *et al. Proceedings: Second International Conference on concrete under severe conditions - Environment and loading*. vol. 2, London, p. 1193-1198, 1998.

NONAT, André. A hidratação dos cimentos. In: OLLIVIER, Jean-Pierre; VICHOT, Angélique (ed.). *Durabilidade do concreto: Bases científicas para formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente*. Ed. Tradução: CASCUDO, Oswaldo; CARASEK, Helena. Cap. 2. São Paulo: IBRACON, p. 17-39, 2014.

NORDTEST. NT BUILD 443: *Concrete hardened: accelerated chloride penetration*. Espoo, Nordtest, 1995. 5p.

NORDTEST. NT BUILD 492: *Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coeficiente from non-steady-state migration experiments*. Espoo, Nordtest, 1999. 8p.

NZS - NEW ZEALAND STANDARDS. NZS 3101: *Concrete structures standard– part 1. The design of concrete structures*. Wellington, New Zealand Standard. 2006. 309p.

OGIRIGBO, Okiemute Roland; BLACK, Leon. *Chloride binding and diffusion in slag blends: Influence of slag composition and temperature*. Construction and Building Materials, v. 149, p. 816-825, set. 2017.

OLIVEIRA, Carla Dabian de. *Estudo da penetração de cloretos em compósitos cimentícios produzidos com aditivos redutores de permeabilidade por cristalização capilar*. 80 p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2018.

OLLIVIER, Jean-Pierre; TORRENTI, Jean-Michel. A estrutura porosa dos concretos e as propriedades de transporte. In: OLLIVIER, Jean-Pierre; VICHOT, Angélique (ed.). *Durabilidade do concreto: Bases científicas para formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente*. Ed. Tradução: CASCUDO, Oswaldo; CARASEK, Helena. Cap. 3. São Paulo: IBRACON, p. 41-112, 2014.

OLLIVIER J. P.; MASSAT, M.; PARROT, L. *Parameters influencing transport characteristics*. RILEM: Technical Committee 116 - Performance Criteria for Concrete Durability. Bagnaux, França, p. 33-96, 1995.

ONER, A.; AKYUZ, S. *An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete*. Cement and Concrete Composites, n. 29, p. 505-514, 2007.

OTIENO, M.; BEUSHAUSEN, H.; ALEXANDER, M. *Chloride-induced corrosion of steel in cracked concrete – Part I: Experimental studies under accelerated and natural marine environments*. Cement and Concrete Research, v. 79, p. 373-385, jan. 2016.

OTIENO, Mike; BEUSHAUSEN, Hans; ALEXANDER, Mark. *Effect of chemical composition of slag on chloride penetration resistance of concrete*. Cement and Concrete Composites, v. 46, p. 56-64, fev. 2014.

OTSUKI, N.; NAGATAKI, S.; NAKASHITA, K. *Evaluation of AgNO<sub>3</sub> solution spray method for measurement of chloride penetration into hardener cementitious matrix materials*. ACI Materials Journal, v. 89, n. 6, 1992.

PAGE, C. L.; SHORT, N. R.; HOLDEN, W. R.. *The influence of different cement on chloride-induced corrosion of reinforcing steel*. Cement and Concrete Research, v. 16, p. 79-86, 1986.

PAGE, C. L.; SHORT, N. R.; EL TARRAS, A. *Difusion of chloride ions in hardened cement paste*. Cement and Concrete Research, n. 11, p. 395-406, 1981.

PEREIRA, V. G. A. *Avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos: Influência do tipo de cimento, da relação a/c, da temperatura e do tempo de cura*. 138p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

PEREIRA, Victor Correia de Oliveira; MONTEIRO, Eliana Cristina Barreto; ALMEIDA, Kalline da Silva. *Influence of cement type in reinforcement corrosion of mortars under action of chlorides*. Construction and Building Materials, v. 40, p. 710-718, mar. 2013.

POULSEN, Ervin; MEJLBRO, Leif. *Diffusion of chloride in concrete: theory and application*. Londres e Nova York: Taylor & Francis, 2006. 442 p.

POURBAIX, M. *Lecciones de corrosión electroquímica*. 3ª ed. Bruselas: CEBELCOR, 1987. 387 p.

PROCEQ. Portifólio comercial de produtos do Resipod - Ano 2018. Proceq Group. Disponível em: <<https://www.proceq.com/compare/corrosion-potential-concrete-resistivity-and-permeability/>>. Acesso em: 18 set. 2018.

PROSKE, Tilo; REZVANI, Moien; PALM, Sebastian; MÜLLER, Christoph; GRAUBNER, Carl-Alexander. *Concretes made of efficient multi-composite cements with slag and limestone*. Cement and Concrete Composites, v. 89, p.107-119, 2018.

RASHEEDUZZAFAR, S.S.; AL-SAADOUN, A.S.; AL-GAHTANI, F.H.; DAKHIL, F.H. *Effect of tricalcium aluminate content of cement on corrosion of reinforcing steel in concrete*. Cement and Concrete Research, v. 20, p. 723-738, 1990.

REAL, Sofia; BOGAS, J. Alexandre; PONTES, Jorge. *Chloride migration in structural lightweight aggregate concrete produced with different binders*. Construction and Building Materials, v. 98, p. 425-436, nov. 2015.

REIS, Lília Silveira Nogueira. *Sobre a recuperação e reforço de estruturas de concreto armado*. 114 p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2001.

SANTOS, Aleílson Vilas-bôas dos. *Corrosão de armadura em estruturas de concreto armado devido a carbonatação*. Revista Especialize IPOG, v. 01/15, n. 10. Goiânia: IPOG, dez. 2015.

SCHNEIDER, Jonas André. *Penetração de cloretos em concretos com escória de alto forno e ativador químico submetidos a diferentes períodos de cura*. 155 p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2005.

SCOTT, A.; ALEXANDER, M. G. *Effect of supplementary cementitious materials (binder type) on the pore solution chemistry and the corrosion of steel in alkaline environments*. Cement and Concrete Research, v. 89, p. 45-55, nov. 2016.

SENGUL, Ö.; GJØRV, O. E. *Effect of blast furnace slag for increased concrete sustainability*. In: *Proceedings, International Symposium on Sustainability in the cement and concrete industry*. Norwegian Concrete Association. Oslo, Norway: p. 248-256, 2007.

SHA, W.; PEREIRA, G. B. *Differential scanning calorimetry study of hydrated ground granulated blast-furnace slag*. Cement and Concrete Research, v. 31, n. 2, p. 327-329, fev. 2001.

SHETTY, M. S. *Concrete technology - Theory and practice*. Nova Delhi, Índia: S. CHAND, 2013. 201p.

SIDDIQUE, R.; BENNACER, R. *Use of iron and steel industry by-product (GGBS) in cement paste and mortar*. Resources, Conservation and Recycling, n. 69, p. 29-34, 2012.

SILVA, Turibio José da. *Mecanismo de transporte de massa no concreto*. In: ISAIA, Geraldo Cechella (ed.). *Concreto: Ciência e Tecnologia*. v. I. Cap. 23. São Paulo: IBRACON, p. 809-847, 2011.

SONG, Zijian; JIANG, Linhua; LIU, Jianzhong; LIU, Jiaping. *Influence of cation type on diffusion behavior of chloride ions in concrete*. Construction and Building Materials, v. 99, p. 150-158, nov. 2015.

SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. *The apparent and effective chloride migration coefficients obtained in migration tests*. Cement and Concrete Research, v. 48, p. 116-127, jun. 2013.

STREICHER, P. E.; ALEXANDER, M. G. *A chloride conduction test for concrete*. Cement and Concrete Research, v. 25, n. 6, p. 1284-1294, ago. 1995.

SUN, Y.; LIANG, M; CHANG, T. *Time/depth dependent diffusion and chemical reaction model of chloride transportation in concrete*. Applied Mathematical Modelling, n. 36, p. 1114-1122, 2012.

TANG, L.; NILSSON, L. O. *Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field*. ACI Materials Journal, v. 89, p. 49-53, 1992.

TENG, Susanto; LIM, Tze Yang Darren; DIVSHOLI, Bahador Sabet. *Durability and mechanical properties of high strength concrete incorporating ultra fine ground granulated blast-furnace slag*. Construction and Building Materials, v. 40, p. 875-881, mar. 2013.

THOMAS, M. D. A.; BREMNER, T.; SCOTT, A. C. N. *Actual and modeled performance in a tidal zone*. Concrete International, p. 23-28, nov. 2011.

TOUIL, B; GHOMARI, F; BEZZAR, A; KHELIDJ, A; BONNET, S. *Effect of temperature on chloride diffusion in saturated concrete*. ACI Materials Journal, v. 114, n. 5, p. 713-721, out. 2017.

TREADAWAY, K. Corrosion period. In: SCHIESSL, P. (ed.). *Corrosion of steel in concrete*. New York: Chapman and Hall, p. 56-69, 1988.

TUUTTI, K. *Corrosion of steel in concrete*. Swedish Cement and Concrete Research Institute. N1 F04. Estocolmo, Suécia: 1982. 469 p

VAGHETTI, M. A. O.; SARKIS, P. J.; SARKIS, J. M. Ação dos cloretos incorporados: um estudo de caso. In: *Anais do Congresso Brasileiro do Concreto*, n. 44, Brasília: IBRACON, 2002.

WANG, Hai-Long; DAI, Jian-Guo; SUN, Xiao-Yan; ZHANG, Xiao-Long. *Characteristics of concrete cracks and their influence on chloride penetration*. Construction and Building Materials, v. 107, p. 216-225, mar. 2016.

WANG, Y.; NANUKUTTAN, S.; BAI, Y.; BASHE, P. A. M. *Influence of combined carbonation and chloride ingress regimes on rate of ingress and redistribution of chlorides in concretes*. Construction and Building Materials, v. 140, p. 173-183, 2017.

WEERDT, K.; COLOMBO, A.; COPPOLA, L.; JUSTNES, H.; GEIKER, M.R. *Impact of the associated cation on chloride binding of Portland cement paste*. Cement and Concrete Research, v. 68, p. 196-202, fev. 2015.

WU, Lingjie; LI, Wei; YU, Xiaoniu. *Time-dependent chloride penetration in concrete in marine environments*. Construction and Building Materials, v. 152, p. 406-413, out. 2017.

Xu, Jinxia; SONG, Yingbin; JIANG, Linhua; FENG, Wei; CAO, Yalong; JI, Weiwei. *Influence of elevated temperature on release of bound chlorides from chloride-admixed plain and blended cement pastes*. Construction and Building Materials, v. 104, p. 9-15, fev. 2016.

YILDIRIM, Hasan; ILICA, Tolga; SENGUL, Ozkan. *Effect of cement type on the resistance of concrete against chloride penetration*. Construction and Building Materials, v. 25, p. 1282-1288, 2011.

ZAJAC, Maciej; SKOCEK, Jan; ADU-AMANKWAH, Samuel; BLACK, Leon; BEN HAHA, Mohsen. *Impact of microstructure on the performance of composite cements: Why higher total porosity can result in higher strength*. Cement and Concrete Composites, v. 90, p.178-192, jul. 2018.

ZHU, X.; ZI, G.; CAO, Z.; CHENG, X. *Combined effect of carbonation and chloride ingress in concrete*. Construction and Building Materials, v. 110, p. 369-380, 2016.

# APÊNDICE A

As Figuras A.1 a A.7 apresentam as análises dos resíduos dos dados para cada um dos modelos estatísticos adotados, os quais encontram-se apresentados no capítulo 4.

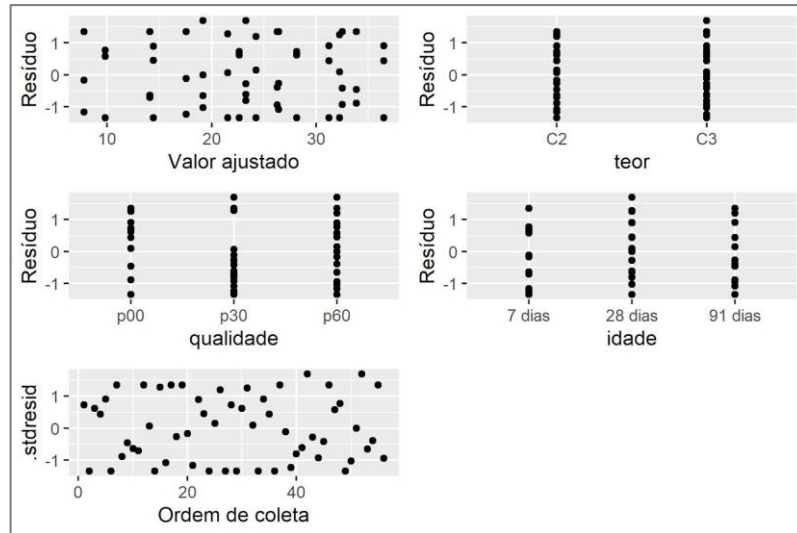


Figura A.1 - Análise de resíduos do modelo estatístico dos resultados de resistência à compressão

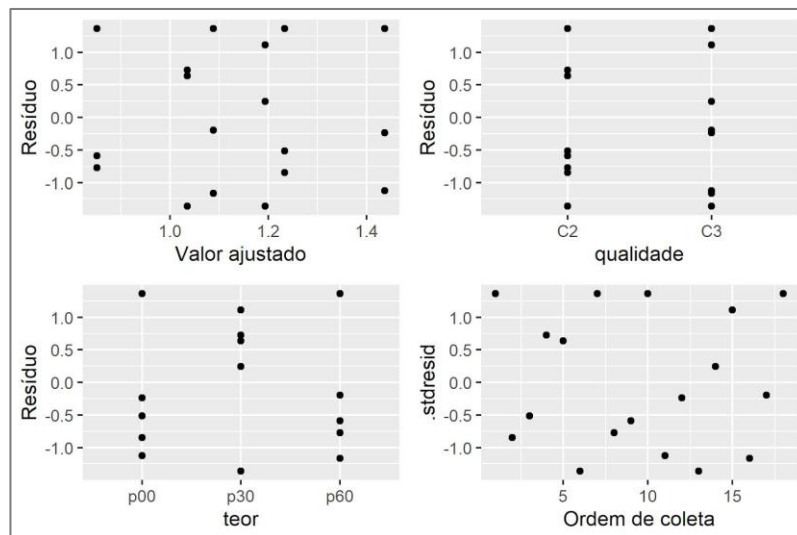


Figura A.2 - Análise de resíduos do modelo estatístico dos resultados de resistência à tração

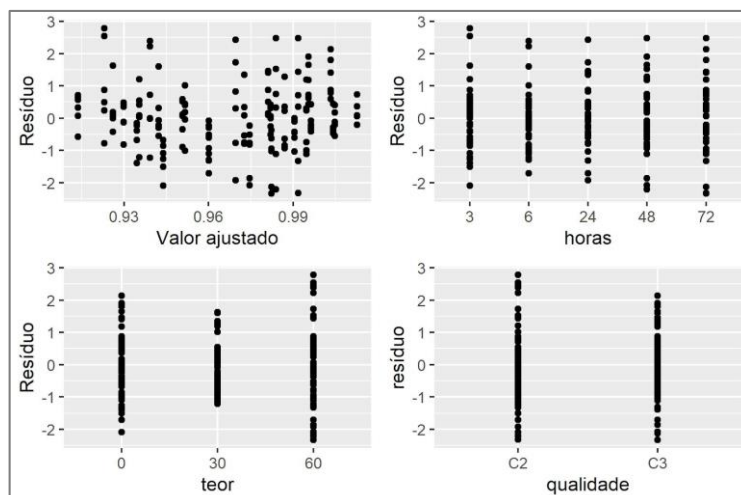


Figura A.3 - Análise de resíduos do modelo estatístico dos resultados de absorção de água por capilaridade

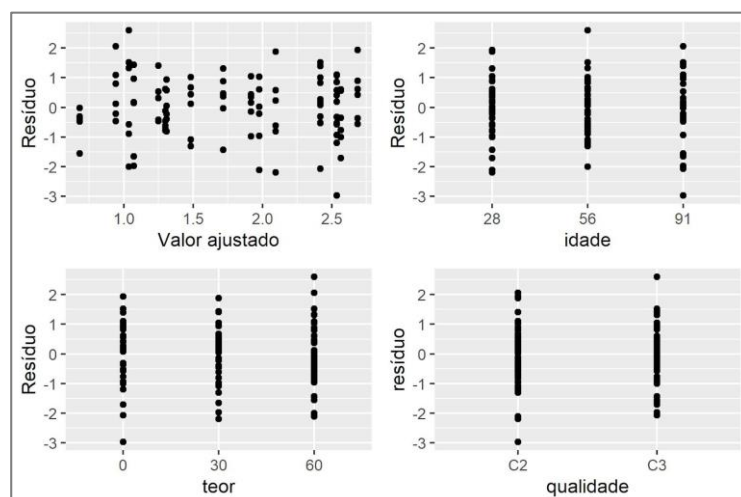


Figura A.4 - Análise de resíduos do modelo estatístico dos resultados de migração de cloretos

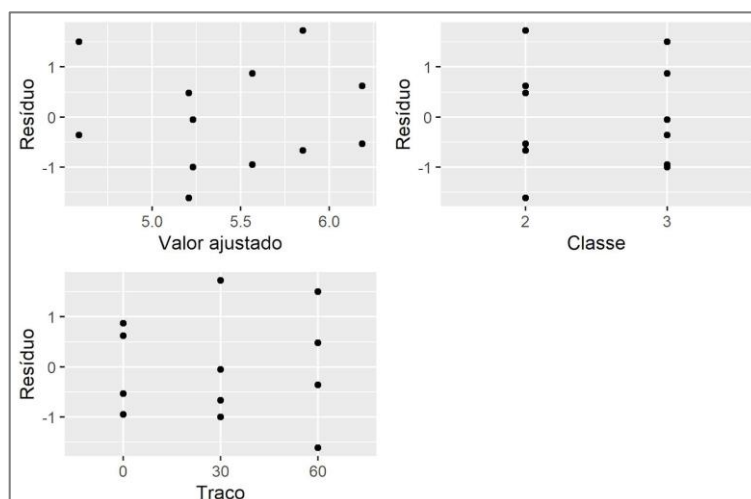


Figura A.5 - Análise de resíduos do modelo estatístico dos resultados de absorção de água por imersão

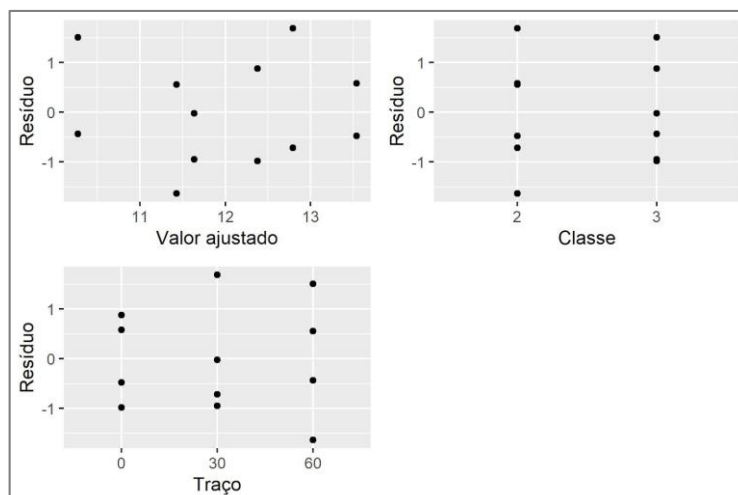


Figura A.6 - Análise de resíduos do modelo estatístico dos resultados de índice de vazios

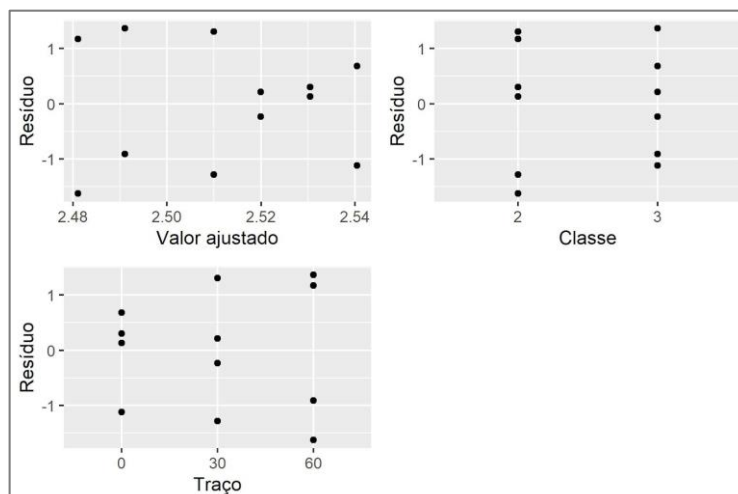


Figura A.7 - Análise de resíduos do modelo estatístico dos resultados de massa específica real

## APÊNDICE B

As Tabelas A.1 a A.11 apresentam as comparações múltiplas realizadas, utilizando-se a correção de Tukey, entre os fatores adotados nas análises estatísticas das diversas variáveis respostas, as quais foram analisadas a partir dos bancos de dados gerados pela realização dos ensaios laboratoriais propostos na presente pesquisa.

Tabela A.1 - Resistência à compressão - Comparações entre os teores fixando-se os níveis dos outros fatores

<b>Comparação</b>	<b>Nível</b>	<b>Diferença</b>	<b>p-valor</b>
0% - 30%		8,573	< 0,001
0% - 60%	C2 e 7 dias	14,886	< 0,001
30% - 60%		6,313	< 0,001
0% - 30%		9,450	< 0,001
0% - 60%	C2 e 28 dias	16,800	< 0,001
30% - 60%		7,110	< 0,001
0% - 30%		7,450	< 0,001
0% - 60%	C2 e 91 dias	9,606	< 0,001
30% - 60%		2,156	0,1353
0% - 30%		10,560	< 0,001
0% - 60%	C3 e 7 dias	18,323	< 0,001
30% - 60%		7,763	< 0,001
0% - 30%		8,573	< 0,001
0% - 60%	C3 e 28 dias	13,060	< 0,001
30% - 60%		4,092	0,0107
0% - 30%		3,963	< 0,001
0% - 60%	C3 e 91 dias	14,886	< 0,001
30% - 60%		6,313	< 0,001

Tabela A.2 - Resistência à compressão - Comparações entre as idades fixando-se os níveis dos outros fatores

<b>Comparação</b>	<b>Nível</b>	<b>Diferença</b>	<b>p-valor</b>
7 dias - 28 dias		-8,576	< 0,001
7 dias - 91 dias	C2 e 0%	-11,216	< 0,001
28 dias - 91 dias		-2,640	0,259
7 dias - 28 dias		-7,460	< 0,001
7 dias - 91 dias	C2 e 30%	-12,340	< 0,001
28 dias - 91 dias		-4,880	< 0,001
7 dias - 28 dias		-6,663	< 0,001
7 dias - 91 dias	C2 e 60%	-16,496	< 0,001
28 dias - 91 dias		-9,833	< 0,01
7 dias - 28 dias		-4,090	0,1586
7 dias - 91 dias	C3 e 0%	-8,333	< 0,001
28 dias - 91 dias		-4,243	0,1394
7 dias - 28 dias		-5,681	< 0,001
7 dias - 91 dias	C3 e 30%	-14,930	< 0,001
28 dias - 91 dias		-9,248	< 0,001
7 dias - 28 dias		-9,353	< 0,001
7 dias - 91 dias	C3 e 60%	-16,450	< 0,001
28 dias - 91 dias		-5,715	< 0,001

Tabela A.3 - Resistência à compressão - Comparações entre as classes fixando-se os níveis dos outros fatores

<b>Comparação</b>	<b>Nível</b>	<b>Diferença</b>	<b>p-valor</b>
C2 - C3	0% e 7 dias	-5,486	< 0,001
	0% e 28 dias	-1,000	0,685
	0% e 91 dias	-2,603	0,037
C2 - C3	30% e 7 dias	-3,500	< 0,001
	30% e 28 dias	-1,721	0,043
	30% e 91 dias	-6,090	< 0,001
C2 - C3	60% e 7 dias	-2,050	0,009
	60% e 28 dias	-4,739	< 0,001
	60% e 91 dias	-2,003	< 0,001

Tabela A.4 - Resistência à tração - Comparações entre as classes de qualidade

<b>Comparação</b>	<b>Diferença</b>	<b>p-valor</b>
C3 - C2	0,158	0,019

Tabela A.5 - Resistência à tração - Comparações entre os teores de escória

<b>Comparação</b>	<b>Diferença</b>	<b>p-valor</b>
30% - 0%	-0,262	0,008
60% - 0%	-0,379	< 0,001
60% - 30%	-0,117	0,272

Tabela A.6 - Absorção por capilaridade - Comparações entre as classes de qualidade

<b>Comparação</b>	<b>Diferença</b>	<b>p-valor</b>
C2 - C3	0,009	< 0,001

Tabela A.7 - Absorção por capilaridade - Comparações entre os teores de escória

<b>Comparação</b>	<b>Diferença</b>	<b>p-valor</b>
0% - 30%	0,008	< 0,001
0% - 60%	0,020	< 0,001
30% - 60%	0,012	< 0,001

Tabela A.8 - Absorção por capilaridade - Comparações entre os tempos de exposição

<b>Comparação</b>	<b>Diferença</b>	<b>p-valor</b>
3 - 6	-0,016	< 0,001
3 - 24	-0,046	< 0,001
3 - 48	-0,060	< 0,001
3 - 72	-0,068	< 0,001
6 - 24	-0,030	< 0,001
6 - 48	-0,044	< 0,001
6 - 72	-0,052	< 0,001
24 - 48	-0,014	< 0,001
24 - 72	-0,022	< 0,001
48 - 72	-0,007	< 0,001

Tabela A.9 - Migração de cloretos - Comparações entre as classes fixando-se os níveis de teor de escória

<b>Comparação</b>	<b>Nível</b>	<b>Diferença</b>	<b>p-valor</b>
C2 - C3	0%	0,119	< 0,001
C2 - C3	30%	0,177	< 0,001
C2 - C3	60%	0,261	< 0,001

Tabela A.10 - Migração de cloretos - Comparações entre os teores fixando-se os níveis dos outros fatores

<b>Comparação</b>	<b>Nível</b>	<b>Diferença</b>	<b>p-valor</b>
0% - 30%		0,592	< 0,001
0% - 60%	C2 e 28	0,709	< 0,001
30% - 60%		0,117	0,123
0% - 30%		1,052	< 0,001
0% - 60%	C2 e 56	1,238	< 0,001
30% - 60%		0,186	0,004
0% - 30%		1,290	< 0,001
0% - 60%	C2 e 91	1,596	< 0,001
30% - 60%		0,306	< 0,001
0% - 30%		0,650	< 0,001
0% - 60%	C3 e 28	0,851	< 0,001
30% - 60%		0,201	0,002
0% - 30%		1,110	< 0,001
0% - 60%	C3 e 56	1,381	< 0,001
30% - 60%		0,270	< 0,001
0% - 30%		1,347	< 0,001
0% - 60%	C3 e 91	1,738	< 0,001
30% - 60%		0,390	< 0,001

Tabela A.11 - Migração de cloretos - Comparações entre as idades fixando-se os níveis do teor de escória

<b>Comparação</b>	<b>Nível</b>	<b>Diferença</b>	<b>p-valor</b>
28 - 56		0,150	< 0,001
28 - 91	0%	0,149	< 0,001
56 - 91		-0,000	0,999
28 - 56		0,610	< 0,001
28 - 91	30%	0,846	< 0,001
56 - 91		0,236	< 0,001
28 - 56		0,679	< 0,001
28 - 91	60%	1,035	< 0,001
56 - 91		0,356	< 0,001