

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

**AVALIAÇÃO DA PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO EM  
CONCRETOS PRODUZIDOS COM ESCÓRIA DE ALTO FORNO E  
AGREGADOS MIÚDOS RECICLADOS DE RESÍDUO DE CONCRETO  
FRESCO**

Priscylla Botelho Athayde

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG  
Novembro/2020

**PRISCYLLA BOTELHO ATHAYDE**

**AVALIAÇÃO DA PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO EM  
CONCRETOS PRODUZIDOS COM ESCÓRIA DE ALTO FORNO E  
AGREGADOS MIÚDOS RECICLADOS DE RESÍDUO DE CONCRETO  
FRESCO**

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  
2020

A865a	<p>Athayde, Priscylla Botelho.  Avaliação da penetração de íons cloreto em concretos produzidos com escória de alto forno e agregados miúdos reciclados de resíduos de concreto fresco [recurso eletrônico] / Priscylla Botelho Athayde. – 2020. 1 recurso online (xxvii, 166 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. 137-166.</p> <p>Inclui bibliografia.  Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Construção civil - Teses. 2. Materiais de construção - Teses. 3. Agregados (Materiais de construção) - Teses. 4. Durabilidade (Engenharia) - Teses. 5. Escória - 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>
-------	--



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PPG MATERIAIS E CONSTRUÇÃO CIVIL - CURSO DE MESTRADO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

### ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO / TESE

Às nove horas e trinta minutos do dia nove de dezembro de dois mil e vinte, por meio de sistema de interação de áudio e vídeo em tempo real (plataforma Microsoft Teams), realizou-se a sessão pública para a defesa da Dissertação de **Priscylla Botelho Athayde**. A presidência da sessão coube ao orientador da aluna, Prof. Aldo Giuntini de Magalhães. Inicialmente, o presidente fez a apresentação da Comissão Examinadora assim constituída: Professor Gibson Rocha Meira (IFPB), Professora Adriana Guerra Gumieri (UFMG) e Professor Aldo Giuntini de Magalhães (Orientador/UFMG). Em seguida, a candidata fez a apresentação do trabalho que constitui sua Dissertação de Mestrado, intitulada: "**Avaliação da penetração de íons cloreto em concretos produzidos com escória de alto forno e agregados miúdos reciclados de resíduo de concreto fresco**". Seguiu-se a arguição pelos examinadores e logo após, a Comissão reuniu-se, sem a presença da candidata e do público e decidiu considerar **aprovada** a Dissertação de Mestrado. O resultado final foi comunicado publicamente à candidata pelo presidente da Comissão. Nada mais havendo a tratar, o presidente encerrou a sessão e lavrou a presente ata que, depois de lida, se aprovada, será assinada pela Comissão Examinadora.

Belo Horizonte, 23 de fevereiro de 2022.

Assinatura dos membros da banca examinadora:



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Chahud, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 02/03/2022, às 16:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Adriana Guerra Gumieri, Professora do Magistério Superior**, em 03/03/2022, às 10:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Aldo Giuntini de Magalhaes, Professor do Magistério Superior**, em 03/03/2022, às 14:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gibson Rocha Meira, Usuário Externo**, em 04/04/2022, às 12:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1274636** e o código CRC **149C4EDB**.

Dedico este trabalho aos meus pais, Jeronymo e Liliana (in memoriam), que sempre apoiaram o meu crescimento profissional.

## AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me proporcionado esta oportunidade e ter iluminado todo o caminho que percorri durante a realização desta pesquisa.

A minha mãe, Líliliana, pelos ensinamentos que nunca serão esquecidos.

Ao meu pai, Jeronymo e ao meu irmão, Thiago, pelo apoio e incentivo constantes.

Ao meu estimado orientador, professor Dr. Aldo Giuntini de Magalhães, pelos ensinamentos transmitidos e orientações sempre amistosas, e pela oportunidade ímpar de fazer parte do seu grupo de trabalho.

Aos membros do grupo de pesquisa do Laboratório de Materiais Cimentícios (LabMac), em especial, aos meus queridos amigos Msc. Thiago Abdala Magalhães, Eng. Renata Leal Henriques e Msc. Carla Dabian de Oliveira pelos conhecimentos compartilhados e apoio inestimável.

A CAPES e a FAPEMIG pelo apoio financeiro recebido.

A BetonMix e a Mineração Santiago, em especial ao Eng. Marcelo Santiago, pelo apoio técnico, disponibilização e beneficiamento do resíduo de concreto fresco utilizado como agregado reciclado nesta pesquisa.

A LafargeHolcim pelo fornecimento do cimento Portland e da escória granulada de alto forno utilizados, em especial, ao Eng. Luciano dos Reis Bento pela atenção despendida ao longo de todo o desenvolvimento desta pesquisa e pelo apoio técnico nas etapas de caracterização dos materiais, concepção dos corpos de prova e realização de ensaios de Resistência à compressão axial e Módulo de elasticidade.

A MC-Bauchemie e a Martins Lanna pelo fornecimento do aditivo superplastificante e do agregado graúdo utilizados na produção dos concretos desta pesquisa.

Ao Laboratório de Materiais Cimentícios da Escola de Engenharia da UFMG (LabMac) pelo

fornecimento da infraestrutura necessária para realização dos ensaios de propriedades físicas e de durabilidade.

Ao Laboratórios de Análise Experimental de Estruturas (LAEES), por propiciar a infraestrutura para a realização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Ao Laboratório de Materiais de Construção da Universidade FUMEC, pela parceria na etapa de caracterização dos materiais.

Aos professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, em especial a Professora Dra. Adriana Guerra Gumieri pela atenção, e aos amigos, Eng. Juliana Vieira Martins, Eng. Patrícia Vasconcelos de Oliveira e Eng. Rodolfo Rabelo Neves.

Aos funcionários do Departamento de Materiais e Construção Civil da Escola de Engenharia da UFMG, em especial aos técnicos Ederson Rafael Correa e Ricardo Antônio Barbosa, pela disponibilidade de assistência sempre amistosa durante a rotina do laboratório.

A Universidade Federal de Minas Gerais pela acolhida e viabilização da obtenção do grau de mestre em Construção Civil, e, por ter preenchido os meus dias com alegria, entusiasmo e aprendizado.

## RESUMO

Os agregados reciclados, provenientes de resíduos de construção e demolição (RCD), apresentam grande diversidade e heterogeneidade em sua composição. Estas são, indubitavelmente, as principais dificuldades enfrentadas para se incluir no sistema normativo, critérios para a produção e uso de concretos com finalidade estrutural obtidos a partir da incorporação de tais materiais. Apesar dos desafios enfrentados, diversos estudos vêm sendo realizados visando investigar o potencial de aproveitamento dos RCDs. Dentro deste contexto, resultados divergentes de desempenho mecânico são relatados em pesquisas realizadas com concretos produzidos com materiais obtidos a partir de resíduos de concreto usinado, em particular, o resíduo de concreto fresco por lavagem, proveniente do material residual da deposição conjunta de concreto retornado e do material obtido por meio da lavagem dos elementos das usinas. Deve-se observar também que, para se ter garantias do desempenho do material ao longo da vida útil dos elementos estruturais, faz-se necessário investigar não apenas as suas características mecânicas, mas, também, dentre outros aspectos, a sua durabilidade em função da interação com os agentes agressivos do meio ao qual estará exposto. Sendo a penetração de íons cloreto um dos principais fatores responsáveis pela redução da vida útil das estruturas de concreto armado, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de concretos produzidos com a substituição parcial de agregados miúdos naturais por agregados miúdos reciclados provenientes do processamento de resíduos de concretos frescos obtidos por lavagem, frente à penetração de tais íons. Para tal, foram produzidos dois traços de referência, utilizando-se cimentos Portland contendo 0% e 60% de escória granulada de alto forno, os quais foram dosados com uma relação  $a/c \leq 0,55$  para uma resistência à compressão  $\geq 30$  MPa, de forma a atender aos requisitos de desempenho estabelecidos para concreto armado com a classe de agressividade ambiental III da NBR 6118 (ABNT, 2014). Para cada um dos traços de referência, foram dosados dois outros traços, fazendo-se a substituição parcial de 30% e 50%, em massa, dos agregados miúdos naturais por agregados miúdos reciclados. Os corpos de prova foram confeccionados de acordo com o procedimento definido pela NBR 5738 (ABNT, 2015) e mantidos em condição de cura saturada até a data dos ensaios. A resistência dos concretos à penetração de íons cloretos foi avaliada nas idades de 28, 63, 91, 126 e 182 dias por meio de amostras obtidas de corpos de prova cilíndricos, e ensaiadas conforme procedimento estabelecido pela norma finlandesa NT BUILD 492 (NORDTEST, 1999). Ademais, foram realizados 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. Os resultados obtidos demonstraram, primeiramente, que a substituição parcial de 60% de cimento Portland por escória granulada de alto forno trouxe relevantes melhorias em todas as propriedades investigadas. Observou-se que, nas idades mais avançadas, a substituição parcial de agregados miúdos naturais por agregados reciclados e, de cimento Portland por escória de alto forno, implicaram simultaneamente no aumento da resistência mecânica e na melhoria das propriedades físicas e de durabilidade dos concretos. Deste modo, com base nos resultados obtidos neste estudo, verificou-se que os concretos produzidos apresentaram desempenho satisfatório, tanto nos aspectos mecânicos, quanto nos quesitos de durabilidade avaliados, para serem utilizados com finalidade estrutural.

*Palavra-Chave: agregados reciclados; resíduo de construção e demolição; resíduo de concreto fresco por lavagem; escória de alto forno; durabilidade; migração de íons cloreto.*

## ABSTRACT

The recycled aggregates from construction and demolition waste (CDW) have great diversity and heterogeneity in their composition. These are, undoubtedly, the main difficulties faced to include in the normative system, criteria for the production and use of concretes with structural purpose obtained from the incorporation of such materials. Despite the challenges faced, several studies have been carrying out in order to investigate the potential for using CDWs. Within this context, divergent results of mechanical strength was reported in researches carried out with concretes produced with materials obtained from ready-mixed concrete plants waste, in particular, the fresh concrete waste, residual material from returned concrete and wastes obtained by ready-mixed plant elements washing operations. It should also be noted that, in order to guarantee the material performance over the useful life of the structural elements, it is necessary to investigate not only its mechanical characteristics, but also, among other aspects, its durability due to the interaction with aggressive agents of the environment to which it will be exposed. Since the penetration of chloride ions is one of the main factors responsible for reducing the useful life of reinforced concrete structures, the present work aims to evaluate the performance of concretes produced with the partial replacement of natural fine aggregates for recycled fine aggregates from the processing of fresh concrete waste due to the penetration of such ions. For this purpose, two reference concretes were produced using Portland cements containing 0% and 60% contents of granulated blast furnace slag, which were dosed with an water/cement ratio  $\leq 0.55$  for a compressive strength  $\geq 30$  MPa, in order to comply the performance requirements for reinforced concrete established for the environmental aggressiveness class III of NBR 6118 (ABNT, 2014). For each of the reference concretes, two other concretes mixes were dosed with the partial replacement of 30% and 50%, by weight, of natural fine aggregates by recycled fine aggregates. The specimens were produced according to the procedure defined by NBR 5738 (ABNT, 2015) and maintained in a condition of saturated cure until the date of the tests. The resistance of concretes to the penetration of chloride ions was evaluated at the ages of 28, 63, 91, 126 and 182 days, using samples obtained from cylindrical specimens, and tested according to the procedure established at the Finnish NT standard BUILD 492 (NORDTEST, 1999). Furthermore, complementary tests were carried out to determine the water absorption by capillarity and by immersion, the voids index and specific masses, as well as mechanical strength tests. The results obtained demonstrated, firstly, that the partial replacement of 60% of Portland cement by granulated blast furnace slag brought relevant improvements in all the investigated properties. It was observed that, in the most advanced ages, the partial substitution of natural fine aggregates for recycled fine aggregates and Portland cement for blast furnace slag, implied, simultaneously, in an increase in mechanical strength and an improvement in the physical properties and durability of the concretes. Thus, based on the results obtained in this study, it was found that the concretes produced presented satisfactory performance, both in the mechanical aspects as well as in the evaluated durability requirements to be used for structural purposes.

*Keyword: recycled aggregates; construction and demolition waste; fresh concrete waste; blast furnace slag; durability; migration of chloride ions.*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Gestão de processamento de resíduo nas usinas de concreto .....	10
Figura 2.2 - Obtenção de subprodutos reutilizáveis ou de tratamento do resíduo para posterior descarte em aterros controlados.....	11
Figura 2.3 - Seção transversal de um sistema de caixas de decantação usual.....	13
(a) caixa de recepção	
(b) caixa de contenção	
(c) caixa de segurança	
(d) caixa contendo água recuperada pronta para ser utilizada	
Figura 2.4 - Sistema de recuperação de resíduo de concreto fresco usinado.....	14
Figura 2.5 - Equipamento utilizado para reciclagem de concreto fresco usinado.....	15
(a) resíduos de concreto fresco sendo depositados no funil alimentador	
(b) saída da água de lavagem com os finos em suspensão	
(c) processo de lavagem sendo executado no tambor	
(d) saída dos agregados na calha de descarga	
Figura 2.6 - Recicladora do tipo peneira rotativa.....	16
Figura 2.7 - Conceituação de vida útil da estrutura.....	19
Figura 2.8 - Esquema de formação dos produtos de corrosão.....	23
Figura 2.9 - Mecanismo de corrosão eletroquímica em presença de cloretos.....	24
Figura 2.10 - Relação quantitativa entre teor crítico de cloretos, condições de umidade ambiental e qualidade do concreto.....	27
Figura 2.11 - Formas de penetração de íons cloreto na estrutura de concreto.....	29
Figura 2.12 - Efeito da relação a/c na porosidade do concreto baseado em cimento Portland puro.....	37
Figura 2.13 - Efeito do tipo de cimento na resistência ao ingresso de íons cloreto baseado em uma relação a/c de 0,45.....	38
Figura 2.14 - Efeito da adição de escória de alto forno na resistência ao ingresso de íons cloreto.....	40
Figura 3.1 - Aspecto dos materiais empregados como aglomerante.....	47
(a) escória granulada de alto forno	
(b) cimento Portland (CPV ARI)	
Figura 3.2 - Conjunto de caixas de decantação de resíduos úmidos da usina de concreto.....	49
Figura 3.3 - Carga, transporte e descarga do RCFL.....	49
Figura 3.4 - Conjunto de britagem e peneiramento utilizado para o beneficiamento do RCFL.....	50
Figura 3.5 - Caracterização química do agregado miúdo reciclado realizada por meio de DRX.....	52
Figura 3.6 - Curva granulométrica do agregado miúdo natural.....	55

Figura 3.7 - Curva granulométrica do agregado de RCFL.....	56
Figura 3.8 - Curva granulométrica das composições de agregados miúdos de RCFL em teores de 30% e 50%.....	58
Figura 3.9 - Aspecto dos materiais empregados como agregados miúdos.....	60
(a) areia de origem natural lavada de granulação média	
(b) agregado miúdo de RCFL	
(c) composição de agregados com 30% de RCFL	
(d) composição de agregados com 50% de RCFL	
Figura 3.10 - Curva granulométrica do agregado graúdo utilizado.....	62
Figura 3.11 - Moldagem, identificação e cura dos corpos de prova.....	67
(a) materiais adicionados na betoneira para produção dos concretos	
(b) corpos de prova moldados	
(c) corpos de prova desmoldados e devidamente identificados	
(d) corpos de prova em cura submersa	
Figura 3.12 - Realização do <i>Slump Test</i> .....	67
Figura 3.13 - Ensaio de absorção por capilaridade.....	71
(a) fita adesiva na superfície superior à área de contato com a água	
(b) corpos de prova em contato com a lâmina d'água	
(c) corpo de prova posicionado sobre pinos metálicos	
Figura 3.14 - Medição da altura de ascensão capilar após o rompimento por compressão diametral.....	72
Figura 3.15 - Ensaio de absorção, índice de vazios e massa específica.....	73
(a) corpos de prova em recipiente com água em fervura	
(b) pesagem hidrostática	
(c) pesagem em balança convencional	
Figura 3.16 - Esquema para corte das amostras para o ensaio de migração de íons cloreto.....	75
Figura 3.17 - Corte dos corpos de prova e identificação das amostras obtidas.....	76
(a) corpos de prova marcados para corte	
(b) amostras obtidas e identificadas	
Figura 3.18 - Conjunto: câmara de vácuo, <i>ColdTrap</i> e bomba.....	76
Figura 3.19 - Processo de vácuo das amostras.....	77
(a) amostras em vácuo seco	
(b) amostras em vácuo com solução de $\text{Ca(OH)}_2$	
Figura 3.20 - Preparo das amostras para o início do ensaio de migração.....	78
(a) posicionamento e fixação das amostras em camisas de silicone	
(b) teste de estanqueidade dos conjuntos	
Figura 3.21 - Arranjo esquemático do aparato recomendado pela NT BUILD 492...	78
Figura 3.22 - Conjunto de migração conectado à fonte de alimentação.....	79
Figura 3.23 - Equipamentos utilizados para medição das correntes elétricas, voltagens aplicadas e temperaturas das amostras.....	80
(a) amperímetro da marca FLUKE 289 TRUE RMS	
(b) voltímetro da marca FLUKE 117 TRUE RMS	
(c) termômetro digital modelo TESTO 735	

Figura 3.24 - Seccionamento das amostras para medição da frente de penetração.....	81
(a) amostras íntegras após o término do processo de migração	
(b) aplicação da carga para rompimento diametral das amostras	
(c) amostra seccionada diametralmente	
Figura 3.25 - Aspecto das amostras após aspersão de nitrato de prata.....	82
(a) amostras com profundidade de penetração evidenciada pela aspersão	
(b) marcação das posições de mensuração das alturas de penetração	
Figura 3.26 - Área de medição da frente de penetração de cloretos.....	82
Figura 4.1 - Progresso das resistências à compressão de acordo com a ascensão das idades.....	89
Figura 4.2 - <i>Boxplots</i> representando os resultados de resistência à compressão ao relacionar os três fatores.....	92
Figura 4.3 - Gráfico representativo da resposta média de resistência à compressão axial.....	94
Figura 4.4 - Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	95
Figura 4.5 - <i>Boxplots</i> representando os resultados de resistência à tração ao relacionar os fatores teor de escória e teor de RCFL.....	96
Figura 4.6 - Gráfico da resposta média de resistência à tração.....	97
Figura 4.7 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade.....	98
Figura 4.8 - <i>Boxplots</i> representando os resultados de módulo de elasticidade ao relacionar os fatores teor de escória e teor de RCFL.....	99
Figura 4.9 - Gráfico representativo da resposta média do módulo de elasticidade...	100
Figura 4.10 - Resultado gráfico do ensaio de absorção de água por capilaridade.....	102
Figura 4.11 - <i>Boxplots</i> representando os resultados de absorção de água por capilaridade ao relacionar os três fatores de interesse.....	104
Figura 4.12 - Gráfico representativo da resposta média da absorção de água por capilaridade.....	105
Figura 4.13 - Gráfico que expõe os resultados das absorções de água por imersão...	106
Figura 4.14 - Gráfico que expõe os resultados dos índices de vazios.....	107
Figura 4.15 - Resultados das massas específicas secas, saturada e real.....	108
Figura 4.16 - <i>Boxplots</i> representando os resultados de absorção de água por imersão ao relacionar os fatores teor de escória e teor de RCFL.....	109
Figura 4.17 - Gráfico da resposta média de absorção de água por imersão.....	110
Figura 4.18 - <i>Boxplots</i> representando os resultados de índice de vazios ao relacionar os fatores teor de escória e teor de RCFL.....	111
Figura 4.19 - Gráfico da resposta média de índice de vazios.....	112

Figura 4.20 - <i>Boxplots</i> representando os resultados de massa específica real ao relacionar os fatores teor de escória e teor de RCFL.....	113
Figura 4.21 - Gráfico representativo da resposta média da massa específica real.....	114
Figura 4.22 - Evolução dos coeficientes de migração de íons cloreto nos concretos em função do tempo.....	118
Figura 4.23 - <i>Boxplots</i> representando os resultados de migração de íons cloreto relacionar os três fatores.....	121
Figura 4.24 - Gráfico da resposta média dos resultados de migração de íons cloreto.....	122
Figura A.1 - <i>Boxplots</i> , nos níveis dos fatores dos resultados de resistência à compressão axial.....	135
Figura A.2 - <i>Violinplots</i> , nos níveis dos fatores dos resultados de resistência à compressão axial.....	135
Figura A.3 - <i>Boxplot</i> representando os resultados de resistência à compressão ao relacionar os fatores teor de escória e teor de RCFL.....	136
Figura A.4 - Análise de resíduos do modelo estatístico dos resultados de resistência à compressão.....	137
Figura B.1 - <i>Boxplots</i> , nos níveis dos fatores teor de escória e de RCFL dos resultados de resistência à tração por compressão diametral.....	141
Figura B.2 - <i>Violinplots</i> , nos níveis dos fatores teor de escória e de RCFL dos resultados de resistência à tração por compressão diametral.....	141
Figura B.3 - Análise de resíduos do modelo estatístico dos resultados de resistência à tração.....	142
Figura C.1 - <i>Boxplots</i> , nos níveis dos fatores teor de escória e teor de RCFL dos resultados de módulo de elasticidade.....	144
Figura C.2 - <i>Violinplots</i> , nos níveis dos fatores teor de escória e teor de RCFL dos resultados de módulo de elasticidade.....	144
Figura C.3 - Análise de resíduos do modelo estatístico dos resultados de módulo de elasticidade.....	145
Figura D.1 - <i>Boxplots</i> , nos níveis dos fatores dos resultados de absorção de água por capilaridade.....	146
Figura D.2 - <i>Violinplots</i> , nos níveis dos fatores dos resultados de absorção de água por capilaridade.....	146
Figura D.3 - <i>Boxplots</i> representando os resultados de absorção de água por capilaridade ao relacionar os fatores teor de escória e teor de RCFL...	147
Figura D.4 - Análise de resíduos do modelo estatístico dos resultados de absorção de água por capilaridade.....	148
Figura E.1 - <i>Boxplots</i> , nos níveis dos fatores dos resultados de absorção de água por imersão.....	150
Figura E.2 - <i>Violinplots</i> , nos níveis dos fatores dos resultados de absorção de água por imersão.....	150

Figura E.3 - Análise de resíduos do modelo estatístico dos resultados de absorção de água por imersão.....	151
Figura F.1 - <i>Boxplots</i> , nos níveis dos fatores dos resultados de índice de vazios.....	153
Figura F.2 - <i>Violinplots</i> , nos níveis dos fatores dos resultados de índice de vazios.....	153
Figura F.3 - Análise de resíduos do modelo estatístico dos resultados de índice de vazios.....	154
Figura G.1 - <i>Boxplots</i> , nos níveis dos fatores dos resultados de massa específica real.....	155
Figura G.2 - <i>Violinplots</i> , nos níveis dos fatores dos resultados de massa específica real.....	155
Figura G.3 - Análise de resíduos do modelo estatístico dos resultados de massa específica real.....	156
Figura H.1 - <i>Boxplots</i> , nos níveis dos fatores dos resultados de migração de íons cloretos.....	158
Figura H.2 - <i>Violinplots</i> , nos níveis dos fatores dos resultados de migração de íons cloreto.....	158
Figura H.3 - <i>Boxplots</i> representando os resultados de migração de íons cloreto ao relacionar os fatores teor de escória e teor de RCFL.....	159
Figura H.4 - Análise de resíduos do modelo estatístico dos resultados de migração de íons cloreto.....	160
Quadro 2.1 - Obtenção de subprodutos reutilizáveis a partir de resíduo de concreto usado.....	12
Quadro 2.2 - Classes de agressividade ao concreto de acordo com o meio ambiente.....	20
Quadro 3.1 - Quantitativo de corpos de prova por traço executados para a realização dos ensaios.....	66
Quadro 4.1 - Aspecto das penetrações nas amostras dos traços produzidos com cimento CP00 por idade.....	116
Quadro 4.2 - Aspecto das penetrações nas amostras dos traços produzidos com cimento CP60 por idade.....	117

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto.....	20
Tabela 2.2 - Limites de normas para o teor total de cloretos em relação à massa de cimento.....	26
Tabela 2.3 - Valores de referência para classificar os concretos submetidos ao ensaio prescrito pela NT BUILD 492.....	42
Tabela 3.1 - Nomenclaturas adotadas para os cimentos Portland.....	46
Tabela 3.2 - Propriedades químicas dos cimentos Portland utilizados e da escória de alto forno.....	46
Tabela 3.3 - Propriedades físicas dos cimentos Portland utilizados e da escória de alto forno.....	47
Tabela 3.4 - Propriedades químicas do agregado miúdo de RCFL.....	51
Tabela 3.5 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo natural.....	54
Tabela 3.6 - Distribuição granulométrica do agregado de RCFL.....	56
Tabela 3.7 - Distribuição granulométrica da composição de agregados com teor de 30% de RCFL.....	57
Tabela 3.8 - Distribuição granulométrica da composição de agregados com teor de 50% de RCFL.....	57
Tabela 3.9 - Características físicas dos agregados miúdos naturais e reciclados.....	59
Tabela 3.10 - Propriedades físicas do agregado graúdo utilizado.....	61
Tabela 3.11 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo.....	61
Tabela 3.12 - Propriedades do aditivo MC-PowerFlow 1180.....	62
Tabela 3.13 - Traços de concreto propostos para a presente pesquisa.....	65
Tabela 3.14 - Composição dos traços de concreto adotada conforme dosagem.....	65
Tabela 3.15 - Idade e tolerância de atraso para rompimento.....	68
Tabela 3.16 - Parâmetros de ensaio para determinação do módulo de elasticidade...	70
Tabela 3.17 - Diferença de potencial e duração do ensaio de migração de uma amostra de concreto.....	80
Tabela 4.1 - Resultados dos ensaios de consistência dos concretos.....	88
Tabela 4.2 - Resultados do ensaio de resistência à compressão.....	89
Tabela 4.3 - Aumento da resistência à compressão axial em relação aos traços de referência CR-00 e CR-60.....	90
Tabela 4.4 - Resultados do ensaio de resistência à compressão ANOVA.....	92
Tabela 4.5 - Resultados do ensaio de resistência à tração.....	94

Tabela 4.6 - Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão axial ANOVA.....	97
Tabela 4.7 - Resultados médios do módulo de elasticidade.....	98
Tabela 4.8 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade ANOVA.....	100
Tabela 4.9 - Média dos resultados apurados no ensaio de absorção de água por capilaridade.....	101
Tabela 4.10 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade ANOVA.....	104
Tabela 4.11 - Resultados da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica.....	106
Tabela 4.12 - Resultados do ensaio de absorção de água por imersão ANOVA.....	110
Tabela 4.13 - Resultados do ensaio de índice de vazios ANOVA.....	111
Tabela 4.14 - Resultados do ensaio de absorção de massa específica real ANOVA..	113
Tabela 4.15 - Valores médios obtidos com a realização do ensaio de penetração de íons cloreto (CP00).....	115
Tabela 4.16 - Valores médios obtidos com a realização do ensaio de penetração de íons cloreto (CP60).....	116
Tabela 4.17 - Resultados dos coeficientes de migração de íons cloretos.....	117
Tabela 4.18 - Variação dos coeficientes médios de difusão em relação aos traços de referência.....	118
Tabela 4.19 - Redução dos coeficientes médios de difusão dos concretos produzidos com CP60 em relação aos respectivos traços produzidos com CP00.....	119
Tabela 4.20 - Resultados do ensaio de resistência à penetração de íons cloreto ANOVA.....	121
Tabela A.1 - Resistência à compressão - Comparações entre as idades fixando-se os níveis do teor de escória em 0%.....	138
Tabela A.2 - Resistência à compressão - Comparações entre as idades fixando-se os níveis do teor de escória em 60%.....	139
Tabela A.3 - Resistência à compressão - Comparações entre os teores de RCFL fixando-se os níveis do teor de escória.....	140
Tabela B.1 - Resistência à tração - Comparações entre os teores de RCFL fixando-se níveis do teor de escória.....	143
Tabela B.2 - Resistência à tração - Comparações entre os teores de escória fixando-se níveis do teor de RCFL.....	143
Tabela D.1 - Absorção de água por capilaridade - Comparações entre os teores de escória.....	148
Tabela D.2 - Absorção de água por capilaridade - Comparações entre os teores de RCFL.....	149
Tabela D.3 - Absorção de água por capilaridade - Comparações entre o tempo (horas).....	149

Tabela E.1 - Absorção de água por imersão - Comparações entre os teores de escória.....	152
Tabela F.1 - Índice de vazios - Comparações entre os teores de escória.....	154
Tabela G. 1- Massa específica real - Comparações entre os teores de escória.....	157
Tabela G.2 - Massa específica real - Comparações entre os teores de RCFL.....	157
Tabela H.1 - Migração de cloretos - Comparações entre os teores de RCFL fixando-se os níveis dos fatores teor de escória e a idade.....	161
Tabela H.2 - Migração de cloretos - Comparações entre os teores de escória fixando-se os níveis dos fatores teor de RCFL e idade.....	162
Tabela H.3 - Migração de cloretos - Comparações entre as idades fixando-se os níveis dos fatores teor de RCFL e teor de escória em 0%.....	163
Tabela H.4 - Migração de cloretos - Comparações entre as idades fixando-se os níveis dos fatores teor de RCFL e teor de escória em 60%.....	164

**LISTA DE UNIDADES**

A	ampère
cm	centímetro
cm <sup>2</sup>	centímetro cuadrado
cm <sup>2</sup> /g	centímetro cuadrado por grama
cm <sup>3</sup> /g	centímetro cúbico por grama
g	grama
g/cm <sup>2</sup>	grama por centímetro cuadrado
g/cm <sup>3</sup>	grama por centímetro cúbico
GPa	gigapascal
h	hora
J	joule
K	Kelvin
kg/m	quilograma por metro
kg/m <sup>3</sup>	quilograma por metro cúbico
kN	quilonewton
kPa	quilopascal
m	metro
m <sup>2</sup>	metro cuadrado
m <sup>2</sup> /s	metro cuadrado por segundo
m <sup>3</sup>	metro cúbico
m <sup>3</sup> /s	metro cúbico por segundo
mA	miliampère
mbar	milibar
min	minuto
mm	milímetro
mm <sup>2</sup>	milímetro cuadrado
MPa	megapascal
MPa/s	megapascal por segundo

N	Newton
°C	graus Celsius
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
BC	cimento de baixo calor de hidratação
CA	concreto armado
CAR-00-30	traço de concreto com 0% de escória e 30% de RCFL
CAR-00-50	traço de concreto com 0% de escória e 50% de RCFL
CAR-60-30	traço de concreto com 60% de escória e 30% de RCFL
CAR-60-50	traço de concreto com 60% de escória e 50% de RCFL
CC	corrente continua
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
CP	concreto protendido
CP I	cimento Portland comum
CP III	cimento Portland de alto forno
CP IV	cimento Portland pozolânico
CP V ARI	cimento Portland de alta resistência inicial
CP00	cimento Portland com 0 % de escória granulada de alto forno
CP60	cimento Portland com 60 % de escória granulada de alto forno
CPB	cimento Portland branco
CPH	Comisión Permanente Del Hormigón
CPs	corpos de prova
CR-00	traço de concreto com 0% de escória e 0% de RCFL
CR-60	traço de concreto com 60% de escória e 0% de RCFL

DRX	Difração de raios-X
ECS	European Committee For Standardization
FIB	Fédération Internationale Du Béton
FRX	Fluorescência de Raios-X
GGBS1	Concreto com substituição parcial de 34% de cimento Portland por escória granulada de alto forno
GGBS2	Concreto com substituição parcial de 70% de cimento Portland por escória granulada de alto forno
HKBD	Hong Kong Building Department
HPC	Concreto com cimento Portland puro
ICDD	International Center for Diffraction Data
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
MF	modulo de finura
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
NT	Nordtest
NZS	New Zealand Standards
OPC	Concreto com cimento Portland puro
PFA	Concreto com substituição parcial de 18% de cimento Portland por cinza volante
pH	potencial hidrogeniônico
RCFL	resíduo de concreto fresco por lavagem
RS	cimento resistente a sulfatos

**LISTA DE SÍMBOLOS**

%	Porcentagem
<	Menor
>	Maior
$\leq$	menor ou igual
$\geq$	maior ou igual
a/c	relação água/cimento
AgNO <sub>3</sub>	nitrate de prata
Al	Alumínio
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	óxido de alumínio
C <sub>3</sub> A	aluminato tricálcico
C <sub>4</sub> AF	ferroaluminato tetracálcico
Ca	Cálcio
Ca(OH) <sub>2</sub>	hidróxido de cálcio
CaCl <sub>2</sub>	cloreto de cálcio
CaCO <sub>3</sub>	carbonato de cálcio
CaO	óxido de cálcio
Cl	Cloro
CO <sub>2</sub>	dióxido de carbono
C-S-H	silicato de cálcio hidratado
d/D	relação entre as dimensões do agregado
e <sup>-</sup>	Elétron
F	estatística de teste
Fe	Ferro
Fe(OH) <sub>2</sub>	hidróxido ferroso
Fe(OH) <sub>3</sub>	hidróxido férrico

$\text{Fe}_2\text{O}_3$	óxido férrico
$\text{Fe}_3\text{O}_4$	magnetita
$\text{FeCl}_2$	cloreto ferroso
$\text{FeCl}_3$	cloreto férrico
$\text{FeO(OH)}$	goetita
$\text{H}_2\text{O}$	óxido de hidrogênio ou água
$\text{HCl}$	cloreto de hidrogênio ou ácido clorídrico
$\text{K}$	Potássio
$\text{K}_2\text{O}$	óxido de potássio
$\text{M}$	Mol
$\text{MgO}$	óxido de magnésio
$\text{Mg}$	Magnésio
$\text{MnO}$	óxido de manganês
$\text{N}$	concentração normal
$\text{Na}$	Sódio
$\text{Na}_2\text{O}$	óxido de sódio
$\text{NaCl}$	cloreto de sódio
$\text{NaOH}$	hidróxido de sódio
$\text{O}_2$	Oxigênio
$\text{OH}$	Hidroxila
$\text{S}$	Enxofre
$\text{Si}$	Silício
$\text{SiO}_2$	dióxido de silício
$\text{SO}_3$	óxido sulfúrico ou trióxido de enxofre
$\text{T}$	temperatura

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	vi
<b>ABSTRACT</b> .....	vii
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> .....	viii
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xiii
<b>LISTA DE UNIDADES</b> .....	xvi
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b> .....	xviii
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	xx
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 Objetivo geral .....	5
1.2 Objetivos específicos .....	5
1.3 Estrutura do trabalho .....	5
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	7
2.1 Agregados.....	7
2.2 Resíduo de concreto usinado.....	9
2.3 Sistemas usuais de recuperação de resíduo de concreto usinado.....	11
2.3.1 Sistema de tratamento por decantação.....	12
2.3.2 Sistema mecânico de separação por lavagem de agregados.....	14
2.3.3 Sistema de recuperação de água.....	16
2.4 Durabilidade das estruturas de concreto armado.....	18
2.5 Corrosão das armaduras.....	21
2.6 Corrosão das armaduras pela ação de íons cloreto.....	23
2.6.1 Formas de apresentação dos íons cloreto no concreto.....	25
2.6.2 Teores críticos de cloretos.....	25
2.6.3 Mecanismos de transporte.....	28

2.6.3.1	Absorção capilar.....	29
2.6.3.2	Difusão.....	30
2.6.3.3	Migração.....	33
2.6.3.4	Permeabilidade.....	33
2.7	Cimento Portland e sua influência na corrosão das armaduras.....	34
2.7.1	Cimento Portland e adições minerais.....	35
2.7.2	Cimento Portland de alto forno frente ao ingresso de íons cloreto.....	37
2.8	Normas que avaliam a resistência de compósitos cimentícios à penetração de cloretos.....	40
2.8.1	AASHTO T 259.....	41
2.8.2	NT BUILD 443.....	41
2.8.3	NT BUILD 492.....	42
2.8.4	ASTM C 1556.....	43
2.8.5	AASHTO T 277 e ASTM C 1202.....	44
<b>3.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>45</b>
3.1	Materiais.....	45
3.1.1	Aglomerante.....	45
3.1.2	Agregados miúdos.....	47
3.1.2.1	Obtenção dos agregados miúdos reciclados.....	48
3.1.2.2	Caracterização química dos agregados miúdos de RCFL.....	51
a)	Caracterização química por Fluorescência de raios-X.....	51
b)	Caracterização química por Difração de raios-X.....	52
3.1.2.3	Caracterização granulométrica dos agregados miúdos.....	54
3.1.2.3	Caracterização física dos agregados miúdos.....	58
3.1.3	Agregado graúdo.....	60
3.1.4	Aditivo.....	62
3.1.5	Água de amassamento.....	63

3.2 Plano experimental.....	63
3.2.1 Dosagem experimental e ajustes dos traços de concreto.....	64
3.2.2 Produção dos concretos, moldagem e cura dos corpos de prova.....	66
3.3 Métodos dos Ensaios.....	68
3.3.1 Resistência à compressão.....	68
3.3.2 Resistência à tração por compressão diametral.....	69
3.3.3 Módulo de elasticidade.....	70
3.3.4 Absorção de água por capilaridade.....	70
3.3.5 Absorção, índice de vazios e massa específica.....	72
3.3.6 Migração de cloretos.....	75
3.3.6.1 Obtenção das amostras.....	75
3.3.6.2 Preparo das amostras.....	76
3.3.6.3 Migração de íons cloretos.....	77
3.3.6.4 Medição da frente de penetração de cloretos.....	81
3.4 Análise estatística dos resultados.....	83
3.5 Apresentação das medidas e das suas incertezas.....	85
<b>4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>87</b>
4.1 Determinação da consistência dos concretos no estado fresco.....	88
4.2 Resistência à compressão axial.....	88
4.3 Resistência à tração por compressão diametral.....	94
4.4 Módulo de elasticidade.....	98
4.5 Absorção de água por capilaridade.....	101
4.6 Absorção, índice de vazios e massa específica.....	105
4.7 Migração de íons cloreto.....	114
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>123</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>127</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>135</b>

<b>APÊNDICE B</b> .....	141
<b>APÊNDICE C</b> .....	144
<b>APÊNDICE D</b> .....	146
<b>APÊNDICE E</b> .....	150
<b>APÊNDICE F</b> .....	153
<b>APÊNDICE G</b> .....	155
<b>APÊNDICE H</b> .....	158

# 1

## INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas tem sido crescente a preocupação mundial com a extração de recursos naturais não renováveis, com o alto consumo de energia e com a alta geração de resíduos envolvidos nos processos relacionados à indústria da construção civil. Apesar de ser inquestionável os danos causados por este setor de atividades ao meio ambiente, nota-se, por outro lado, um empenho cada vez maior em se buscar o aperfeiçoamento das técnicas construtivas e a adoção de "tecnologias limpas" que sejam capazes de contribuir para a minimização destes impactos.

No tocante a extração de recursos naturais, convive-se constantemente com uma alta demanda de agregados para a produção de concreto, material que, depois da água, é o mais consumido no planeta, com uma produção mundial *per capita*/ano de aproximadamente 3,8 toneladas (XUAN *et al.*, 2018). Os processos envolvidos na cadeia de produção do concreto além de demandarem bastante energia, são responsáveis por uma alta geração de resíduos. Em uma perspectiva global, estima-se que, anualmente, mais de 125 milhões de toneladas de concreto fresco retornam às usinas como resíduo (KAZAZ *et al.*, 2015). Em face de quantidades tão expressivas, o desperdício de concreto fresco e a destinação do resíduo proveniente das usinas desperta preocupações ambientais. Neste sentido, vem-se implantando processos de recuperação de resíduos e de reutilização da água de lavagem proveniente de usinas de concreto, reduzindo os impactos negativos desta atividade (VIEIRA e FIGUEIREDO, 2016).

Os sistemas de recuperação de resíduos possibilitam o aproveitamento de diferentes subprodutos reutilizáveis que podem ser novamente aplicados na produção de concretos, como, por exemplo, os agregados reciclados de resíduo de concreto fresco por lavagem (RCFL). A utilização de agregados reciclados minimiza os impactos da alta demanda de exploração de

recursos naturais e reduz os custos relacionados ao tratamento do resíduo para o descarte e a disposição em aterros controlados (CORREIA *et al.*, 2009; POLESELLO *et al.*, 2010).

Os resultados apresentados em pesquisas envolvendo a utilização de agregados provenientes do RCFL apresentam, algumas vezes, resultados divergentes. Enquanto Correia *et al.* (2009), não identificaram influência da substituição parcial de agregados miúdos naturais por agregados miúdos reciclados provenientes do processamento de RCFL por meio de simples coleta, secagem, desaglomeração manual e peneiramento, nas propriedades mecânicas dos concretos produzidos, Kou *et al.* (2012b) ao realizarem um estudo com a utilização de agregados miúdos naturais por agregados miúdos reciclados na produção de concretos, mais especificamente o RCFL, beneficiado por meio de um sistema mecânico de separação por lavagem de agregados, onde o material residual obtido desta lavagem era submetido à desidratação por um filtro de pressão sendo, posteriormente, seco ao ar, triturado e peneirado, concluíram que quanto maiores os teores de substituição, maiores eram as taxas de absorção de água e de porosidade dos concretos produzidos quando comparados ao concreto de referência. No estudo realizado por Sérifou *et al.* (2013) o RCFL substituiu parcialmente os agregados miúdos naturais na produção dos concretos após o beneficiamento por meio de simples secagem e trituração. Os resultados obtidos indicaram redução no desempenho das propriedades mecânicas com o aumento dos percentuais de substituição.

Demais estudos verificados na literatura, tais como os conduzidos por Rughooputh *et al.* (2015) e Vieira e Figueiredo (2016), optaram pela substituição parcial ou completa da porção de agregados miúdos e graúdos na produção dos concretos adequando-se às recomendações normativas por meio do ajuste da curva granulométrica. De modo semelhante à Correia *et al.* (2009), o beneficiamento do RCFL para aplicação como agregados no estudo realizado por Rughooputh *et al.* (2015) se deu por meio da simples coleta, secagem, desaglomeração manual e peneiramento. Já Vieira e Figueiredo (2016) fizeram uso de um sistema de tratamento por decantação em conjunto com um sistema mecânico de separação por lavagem de agregados. Ambos os estudos mencionados concluíram que os concretos produzidos apresentaram desempenho inferior aos concretos de referência.

Diante do cenário observado na literatura disponível acerca do tema proposto, sabe-se que há grande variedade nas estratégias de aplicação do RCFL como agregado reciclado além de

diferentes processos de beneficiamento adotados devido às particularidades locais de cada usina de concreto. Deste modo, tal variabilidade culminou em diferentes conclusões e recomendações de aplicabilidade por parte dos pesquisadores. Rughooputh *et al.* (2015) esclarecem que a utilização do resíduo como agregado pode ser aplicável para concretos sem finalidade estrutural, como na construção de pavimentos. Vieira e Figueiredo (2016) afirmam que, de acordo com os resultados de suas pesquisas, os concretos produzidos com agregados reciclados de RCFL podem ser seguramente utilizados com finalidades que demandem resistência à compressão inferior a 25 MPa. Kou *et al.* (2012) sugerem que os agregados reciclados de RCFL possam originar concretos com resistência à compressão de até 40 MPa para substituições parciais de até 30%, podendo ser seguramente utilizados em concretos estruturais. Com a diversidade de pontos de vista exposta pelos pesquisadores, evidencia-se a necessidade de desenvolvimento de novas pesquisas para o estabelecimento de critérios e padrões visando assegurar o uso deste material.

Um ponto importante a ser considerado na utilização de agregados miúdos reciclados é a necessidade de operações de cominuição adequadas no beneficiamento dos resíduos garantindo materiais com propriedades adequadas às aplicações. Deste modo, o uso de britadores de mandíbulas ou de impacto mostra-se como uma alternativa eficiente que promove a desagregação apropriada das fases minerais constituintes, principalmente, do agregado natural original e da pasta de cimento residual, atribuindo qualidade aos agregados reciclados. Figueiredo *et al.* (2020) realizaram um estudo comparativo tendo como foco as propriedades de agregados reciclados de concreto obtidos com a utilização de britadores de impacto e de mandíbula. Por meio da caracterização dos agregados reciclados obtidos nos dois sistemas de cominuição constatou-se similaridade na composição química e mineralógica, no aspecto e na qualidade de liberação da pasta de cimento residual, sendo este e aquele adequados na obtenção de agregados reciclados de qualidade que propiciassem a produção de concretos com propriedades mecânicas e de durabilidade satisfatórias.

Deste modo, com o intuito de contribuir com a investigação dos efeitos da substituição parcial de agregados miúdos naturais por agregados miúdos reciclados, provenientes do processamento de RCFL, na produção de novos concretos, pretende-se, neste estudo, verificar não apenas as possíveis alterações das características mecânicas do material, mas, também, o impacto na sua

durabilidade. Para tal, buscar-se-á realizar testes capazes de avaliar o desempenho dos compósitos produzidos, quanto a migração de íons cloreto na sua matriz cimentícia.

Ainda no contexto do reaproveitamento de resíduos industriais, é de conhecimento comum que o emprego de materiais cimentícios suplementares, como a escória de alto forno, sílica ativa e cinzas volantes, concedem melhorias nas propriedades mecânicas e na durabilidade dos compósitos cimentícios. Tais materiais promovem um refinamento na estrutura porosa do concreto, provocando, por exemplo, maior resistência à penetração de íons cloreto. Ademais, é notável que a utilização de subprodutos industriais na produção de cimentos compostos, como adições minerais, contribui para obtenção de um concreto ecologicamente viável, uma vez que diminui a disposição de rejeitos no meio ambiente, proporcionando tanto uma menor demanda de matérias-primas, quanto uma redução nas emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera.

Dentre os materiais cimentícios suplementares, habitualmente utilizados, a escória granulada de alto forno destaca-se por conter os elementos necessários para a formação dos hidratos gerados a partir do clínquer. Verifica-se, também, em sua composição, uma maior presença de aluminatos, o que potencializa a formação de cloroaluminatos. Estes, por sua vez, são responsáveis pelo aumento da capacidade de fixação de íons cloreto contribuindo, deste modo, para a redução dos coeficientes de difusão nos concretos (MAGALHÃES, 2019).

Assim, o presente estudo propõe a avaliação das propriedades dos concretos produzidos a partir da substituição parcial dos agregados miúdos naturais por agregados miúdos reciclados de RCFL provenientes do beneficiamento por meio de sistema de tratamento por decantação em conjunto com cominuição com o auxílio de britador de mandíbula. Para tanto, foram confeccionados concretos com e sem a substituição parcial de cimento Portland por escória granulada de alto forno. Os concretos foram produzidos com a finalidade de testar as propriedades mecânicas, físicas e de resistência à penetração de água, assim como avaliar seu desempenho junto à penetração de íons cloreto por meio da medição dos coeficientes de migração com utilização do ensaio especificado na norma NT BUILD 492 (NORDTEST, 1999).

## **1.1 Objetivo geral**

Esta pesquisa tem como objetivo a avaliação da penetração de íons cloreto em concretos produzidos com a substituição parcial de cimento Portland por escória granulada de alto forno e de agregados miúdos naturais por agregados miúdos reciclados de resíduo de concreto fresco obtidos por lavagem.

## **1.2 Objetivos específicos**

Este estudo tem como objetivos específicos avaliar os efeitos no desempenho final dos concretos produzidos com os diferentes teores de substituição de cimento Portland por escória granulada de alto forno e de agregados miúdos naturais por agregados miúdos reciclados no que concerne aos seguintes aspectos:

- a) propriedades mecânicas (resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade);
- b) propriedades físicas e resistência à penetração de água (absorção por capilaridade, absorção por imersão, índices de vazios e massas específicas);
- c) resistência à penetração de íons cloreto por meio de ensaio acelerado de migração em estado não estacionário.

## **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 estruturado em mais cinco capítulos, conforme descritos a seguir.

No capítulo 2 a fundamentação teórica acerca do tema proposto é descrita com o intuito de fornecer uma visão geral dos conceitos de maior relevância deste estudo. Para tanto, foram consultados diversos periódicos, dissertações e teses priorizando aqueles mais recentes. Os

principais tópicos abordados estão relacionados ao uso do resíduo de concreto usinado na produção de agregados reciclados de RCFL, a durabilidade das estruturas de concreto armado, aos mecanismos de transporte dos agentes agressivos, ao ataque de cloretos no concreto e as suas consequências, aos fatores intervenientes ao fenômeno e as prescrições normativas vigentes que objetivam na avaliação da resistência ao ingresso destes no concreto.

No capítulo 3, são descritos os materiais e os métodos utilizados nesta pesquisa, sendo apresentados os parâmetros e procedimentos empregados na execução do plano experimental. São pormenorizadas as informações correspondentes às etapas de dosagem dos concretos e às moldagens dos corpos de prova, do mesmo modo que todas as técnicas e procedimentos adotados durante a realização de cada um dos ensaios. Ademais, são exibidos e discutidos os resultados relacionados às caracterizações físicas e químicas dos materiais utilizados.

O capítulo 4 apresenta os resultados alcançados, por meio de texto, gráficos e tabelas, de cada um dos ensaios propostos no plano experimental. As discussões e análises relacionadas a estes resultados, assim como as respectivas avaliações estatísticas dos dados experimentais obtidos também são objetivamente apresentadas, com o intuito de fundamentar as conclusões relacionadas aos efeitos observados.

Por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões relativas às análises dos resultados. Na sequência, são apresentadas as referências bibliográficas consultadas e utilizadas como base para o desenvolvimento desse estudo. Em apêndice, mais detalhes relacionados à análise estatística realizada para a fundamentação das conclusões deste estudo são apresentados.

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

# 2

## REVISÃO DA LITERATURA

A bibliografia consultada para o desenvolvimento deste trabalho procurou identificar os principais aspectos relacionados ao fenômeno da penetração de íons cloreto em compósitos de matriz de cimento Portland produzidos com a substituição parcial de agregados miúdos naturais por agregados reciclados de resíduo de concreto fresco por lavagem.

Neste capítulo são apresentados, primeiramente os aspectos relacionados aos agregados naturais e aos agregados reciclados provenientes do reaproveitamento de resíduos originados em usinas de concreto, os processos de beneficiamento para os resíduos, elucidando, os subprodutos originários dos processos de reutilização conhecidos.

Em um segundo momento, uma investigação bibliográfica é realizada com o intuito de abordar o fenômeno de penetração de íons cloreto às estruturas de concreto armado e seu impacto na durabilidade destes. Para tanto, as principais fontes de contaminação, as fases as quais os íons cloreto se apresentam no concreto, os teores críticos de concentração previstos na literatura e os mecanismos de transporte de massa predominantes, são aqui apresentados. Além disso, abordam-se as principais recomendações normativas nacionais e internacionais vigentes e alguns métodos experimentais de avaliação da penetrabilidade de íons cloreto em compósitos cimentícios.

### 2.1 Agregados

Os agregados são materiais relativamente baratos e que não reagem quimicamente com a água, ocupando entre 60% e 80% do volume do concreto. Em geral, os agregados são

procedentes de jazidas minerais naturais (areia, pedregulho e pedra britada) sendo constituídos de diversas composições mineralógicas (MEHTA e MONTEIRO, 2014). São classificados como grãos e miúdos de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009, p.3) que define agregado grão como, *“agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm”* e agregado miúdo como, *“agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm”*.

Os agregados consumidos na produção de concreto podem ser de origem artificial, natural ou reciclada. Os agregados artificiais são obtidos a partir de processos de cominuição de rochas metamórficas, tais como os quartzitos, calcários e gnaisses, de rochas sedimentares, como os arenitos e os siltitos, e de rochas ígneas, como os granitos, sienitos, basaltos e diabásios (LA SENNA e REZENDE, 2013). Já os agregados naturais são originados de rochas submetidas à processos de intemperismo (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Os agregados reciclados, podem ser oriundos de materiais termicamente processados, como a argila e o folhelho expandidos, ou a partir de rejeitos industriais, como a escória de alto forno e as cinzas volantes. Os resíduos de construção civil, incluindo os resíduos provenientes de usinas de concreto, também originam agregados pertencentes a tal categoria (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

As características físicas e químicas dos agregados influenciam na resistência mecânica, na durabilidade e na trabalhabilidade dos concretos (NEVILLE e BROOKS, 2013). Assim, a NBR 7211 (ABNT, 2009) delimita as diretrizes e os requisitos exigíveis para a recepção e produção de agregados destinados à fabricação de concretos de cimento Portland. A norma determina que os agregados devam ser formados por grãos de minerais duros, estáveis, limpos, duráveis e compactos, isentos de substâncias que afetem a hidratação e o endurecimento do cimento e que prejudiquem as suas propriedades.

Os agregados reciclados provenientes do beneficiamento de resíduos de concretos usados estão relacionados aos agregados originalmente utilizados na produção dos concretos sendo possível presumir que alguns aspectos ligados às suas características petrográficas permanecem inalterados, contudo diferenciam-se dos originais devido à pasta de cimento

aderida. O uso de agregados de RCFL para a preparação de novos concretos é recomendado em percentuais de até 5% pelo item 1.6 da NBR 7211 (ABNT, 2009), quando em condições de não atendimento aos requisitos de qualidade nesta especificados, ou para agregados de RCFL não subdivididos quanto à granulometria. Contudo, presume-se que após passar por um processo de beneficiamento por meio de cominuição adequada, o RCFL pode ser utilizado como agregado na produção de novos concretos em percentuais mais elevados. (VIEIRA e FIGUEIREDO, 2016).

## **2.2 Resíduo de concreto usinado**

A reutilização de resíduos de construção civil é uma prática conhecida desde o final da segunda guerra mundial e, seus princípios e técnicas voltaram a receber atenção considerável em todo o mundo desde o final da década de 1980.

O resíduo de concreto usinado é caracterizado pelo material obtido na lavagem do pátio e instalações e dos elementos presentes nas usinas de concreto, tais como caminhões betoneira, bombas de concreto, entre outros (POLESELLO *et al.*, 2010). Também é caracterizado pelo concreto retornado, ocasionado em situações de incerteza na quantidade necessária de concreto suficiente para projetos de construções ou insatisfatória trabalhabilidade no canteiro de obras (SÉRIFOU *et al.*, 2013).

A maior parte do concreto retornado ainda tem sua utilização viável, tendo reuso direto. Este é remixado, com ou sem aditivos inibidores de pega, e acrescido a concretos específicos, como na produção de blocos ou na construção de aterros ou pavimentos. Quando isso não acontece, o concreto retornado é depositado em áreas de despejo temporário nas usinas, conjuntamente ao material obtido por meio da lavagem dos elementos e instalações, para posterior beneficiamento ou condução a aterros controlados destinados a materiais inertes.

Os resíduos de concreto usinado também são originados dos demais processos de fabricação e atividades laboratoriais das usinas. Tais resíduos podem estar tanto no estado fresco como em estado endurecido (XUAN *et al.*, 2018). Ao longo deste trabalho, o material residual da deposição conjunta de concreto retornado e do material obtido por meio da lavagem dos elementos das usinas foi denominado resíduo de concreto fresco por lavagem (RCFL).

Usualmente, como pode-se observar na Figura 2.1, as usinas buscam adaptar estratégias de gestão dos resíduos originados por estas de forma particular, com configurações exclusivas que são implantadas e projetadas para se adequar às condições locais, à produção, ao fornecimento e a capacidade destas. Quando optam por fazer uso direto ou beneficiar para reutilizar os resíduos originados, comumente destinam o concreto produzido por meio dos materiais reutilizáveis em finalidades não estruturais, concretos pré-moldados, pavimentação ou outras aplicações menos exigentes e utilizam a água recuperada no controle de poeira do pátio e instalações e na lavagem dos elementos.

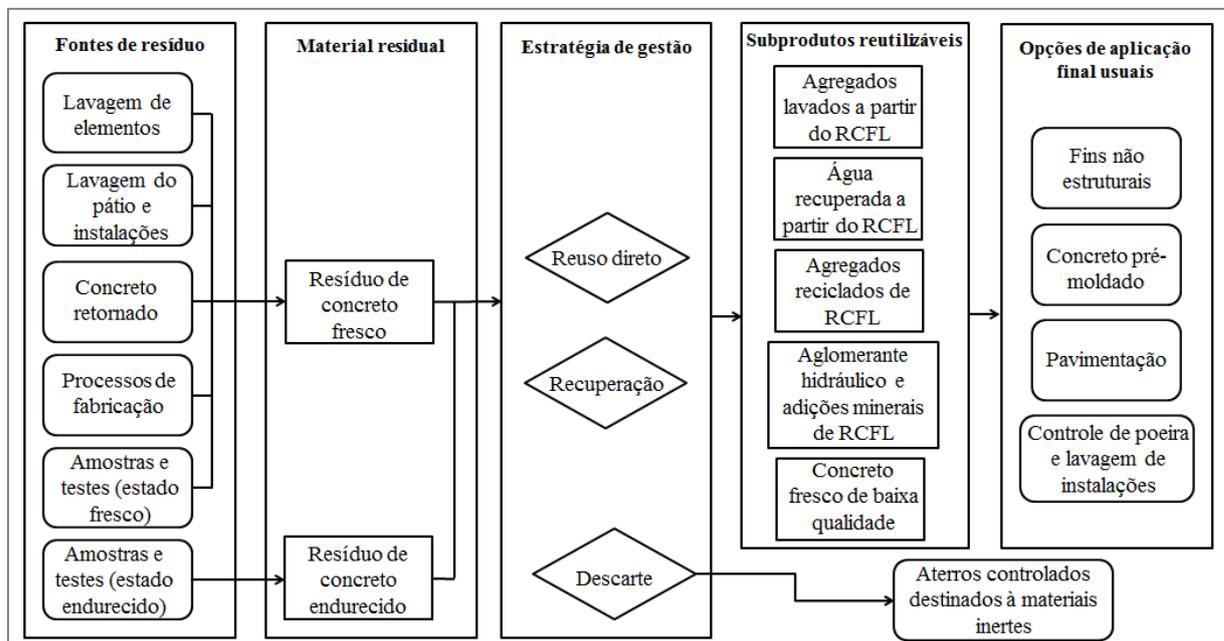


Figura 2.1 - Gestão de processamento de resíduo nas usinas de concreto  
Fonte: Adaptado de XUAN *et al.*, 2018, p.240.

De acordo com Xuan *et al.* (2018) o RCFL é constituído de 70% ou mais de agregados recuperáveis e 30% ou menos de um composto de água, materiais cimentícios, agregados finos, pozolanas reagidas, cimento parcialmente hidratado e baixa quantidade de mistura não reagida.

Este pode originar diferentes subprodutos reutilizáveis como pôde ser observado anteriormente na Figura 2.1, tais como agregados reciclados, adições minerais e aglomerantes (HOSSAIN *et al.*, 2017). Os agregados naturais presentes no RCFL também podem ser recuperados e ter seu reuso direto por meio de sistemas mecânicos de lavagem de agregados, do mesmo modo que a água presente no RCFL pode ser drenada e reutilizada em um ciclo

fechado. Na Figura 2.2 observa-se os processos para a obtenção dos subprodutos reutilizáveis de resíduo de concreto usinado ou o processo envolvido no tratamento do resíduo para posterior descarte em aterros controlados (HOSSAIN *et al.*, 2017).

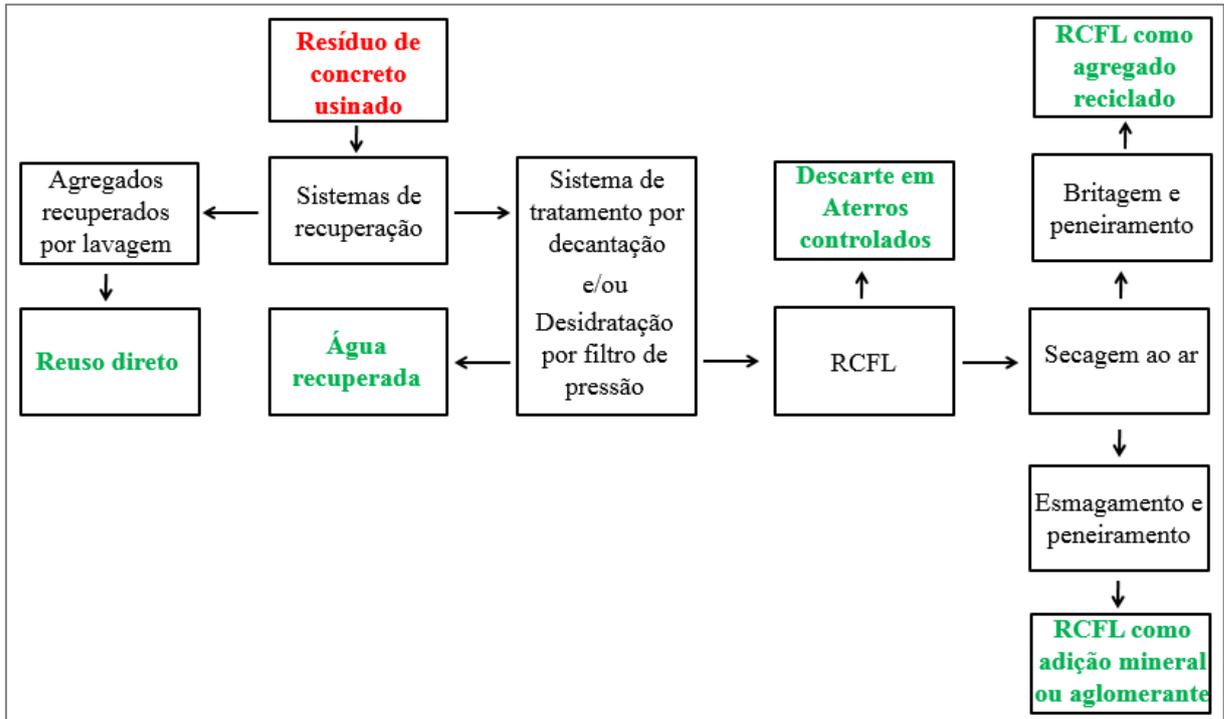


Figura 2.2 - Obtenção de subprodutos reutilizáveis ou de tratamento do resíduo para posterior descarte em aterros controlados

Fonte: Adaptado de HOSSAIN *et al.*, 2017, p.398.

### 2.3 Sistemas usuais de recuperação de resíduo de concreto usinado

Para que os sistemas de obtenção de subprodutos reaproveitáveis sejam considerados viáveis pelas usinas de concreto muitas pesquisas vêm sendo desenvolvidas em todo o mundo. No Quadro 2.1 observa-se diferentes processos por meio dos quais obteve-se alguns subprodutos reutilizáveis para a aplicação destes na produção de concretos.

Nos tópicos seguintes serão detalhados alguns dos métodos de processamento de resíduos de concreto utilizados para a obtenção dos agregados reciclados. Ressalta-se que alguns métodos de processamento aqui detalhados são utilizados pelas usinas de concreto conjuntamente com outros, como observado por meio do Quadro 2.1, para obtenção dos subprodutos reutilizáveis oriundos de resíduo de concreto usinado.

Quadro 2.1 - Obtenção de subprodutos reutilizáveis a partir de resíduo de concreto usinado

<b>Pesquisador</b>	<b>Sistema de tratamento utilizado para obtenção</b>	<b>Aplicabilidade do subproduto obtido</b>
Audo <i>et al.</i> (2016)	Sistema de tratamento por decantação, coleta, secagem e moagem	Adição mineral
Correia <i>et al.</i> (2009)	Coleta, secagem, desaglomeração manual e peneiramento	Agregados miúdos
Kim e Goulías (2015)	Secagem ao ar coleta e britagem	Agregados graúdos
Kou <i>et al.</i> (2012a, b)	Sistema mecânico de separação por lavagem de agregados e desidratação por filtro de pressão associados com secagem ao ar, trituração e peneiramento	Agregados graúdos e miúdos
Rughooputh <i>et al.</i> (2015)	Coleta, Secagem, desaglomeração manual e peneiramento	Agregados graúdos e miúdos
Schoon <i>et al.</i> (2015)	Coleta, secagem e moagem	Adição mineral
Sérifou <i>et al.</i> (2013)	Secagem e trituração	Agregados graúdos e miúdos
Vieira e Figueiredo (2016)	Sistema de tratamento por decantação em conjunto com um sistema mecânico de separação por lavagem de agregados	Água para lavagem de elementos e agregados miúdos e graúdos recuperados por lavagem
Xuan <i>et al.</i> (2016a, b)	Sistema de tratamento por decantação com desidratação por filtro de pressão	Agregados miúdos e aglomerante hidráulico
Zega e Di Maio (2011)	Secagem ao ar e britagem	Agregados graúdos
Zervaki <i>et al.</i> (2013)	Sistema de tratamento por decantação associado à: adição mineral: secagem e desaglomeração manual água: filtragem e controle do teor total de sólidos, cloretos e pH.	Água recuperada e adição mineral

### 2.3.1 Sistema de tratamento por decantação

Segundo Buttler (2003) e Polesello *et al.* (2010) o sistema de tratamento por decantação para a obtenção de agregados reciclados e demais subprodutos é o mais utilizado no Brasil devido ao baixo custo. O sistema de recuperação por decantação consiste no lançamento em caixas de decantação de concreto residual e do material proveniente da lavagem dos caminhões betoneiras ao final do período de operação dos caminhões. Ressalta-se que a lavagem para

retirada é necessária para evitar a secagem de sobras de concreto no interior do mesmo, o que prejudica a atividade do equipamento no processo de homogeneização na produção de novos concretos. O beneficiamento do resíduo ocorre por meio de processos de moagem, trituração ou britagem conseguinte à secagem do material contido nas caixas de decantação (POLESELLO *et al.*, 2010). O conjunto de caixas de decantação contém quatro compartimentos conectados. Pode-se observar na Figura 2.3 uma seção transversal esquemática de um sistema de caixas de decantação padrão. O primeiro compartimento é a caixa de recepção, que regula o fluxo e recebe o RCFL da usina. O segundo compartimento é a caixa de contenção, que retém partículas sólidas de natureza diferente do RCFL que por ventura entrem no sistema. O RCFL decanta e pode ser coletado, a água segue para o terceiro compartimento. Este, é chamado de caixa de segurança, onde as partículas sólidas que tenham escapado das duas primeiras caixas são retidas salvaguardando que apenas a água chegue ao último compartimento, sendo recuperada e armazenada para posterior utilização para a lavagem dos elementos (VIEIRA e FIGUEIREDO, 2016).

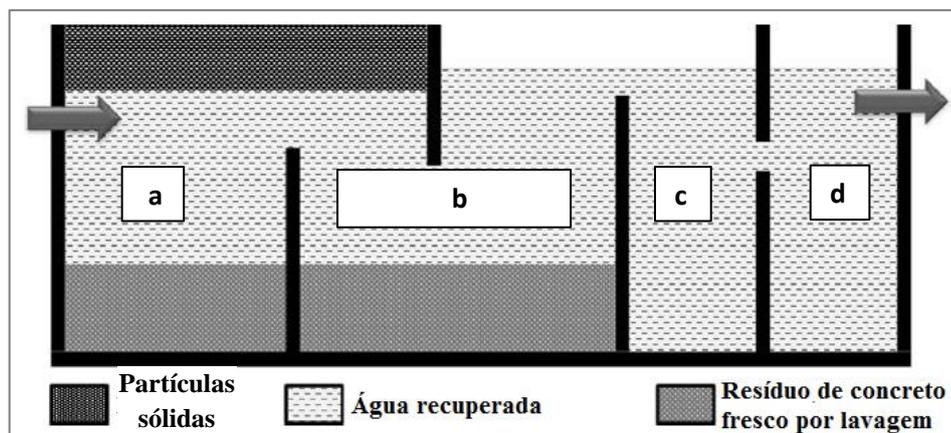


Figura 2.3 - Seção transversal de um sistema de caixas de decantação usual

- caixa de recepção
- caixa de contenção
- caixa de segurança
- caixa contendo água recuperada pronta para ser utilizada

Fonte: Adaptado de VIEIRA e FIGUEIREDO, 2016, p.339.

Schoon *et al.* (2015) afirmam que o sistema de tratamento por decantação pode ser ainda mais simples, sendo necessárias apenas três caixas de decantação. A primeira caixa recebe o resíduo dos caminhões betoneira e demais elementos. A fração de água, com alguma fração de sedimentos, é transferida para a segunda caixa por meio de um sistema de drenagem. Posteriormente a sedimentação, a água de ambas as caixas é reciclada e deposta na terceira

caixa e o resíduo nas primeiras caixas pode ser removido. O sistema de tratamento por decantação é um dos sistemas mais utilizados não só para a obtenção dos subprodutos reutilizáveis, mas também, na preparação do resíduo de concreto usinado para condução a aterros controlados destinados a materiais inertes. Este sistema de tratamento é também utilizado em associação a outros sistemas, como, por exemplo, o sistema mecânico de separação por lavagem de agregados e filtro de pressão. Pode-se observar de forma esquemática na Figura 2.4 um sistema de obtenção de subprodutos reutilizáveis que associa o uso do sistema mecânico de separação por lavagem de agregados, o tratamento por decantação e o filtro de pressão. No sistema mostrado o caminhão betoneira é lavado e o material residual é conduzido ao sistema mecânico de separação por lavagem de agregados e, em seguida, os agregados lavados são separados e tem reuso direto. O material resultante é conduzido a uma caixa de sedimentação e depois é submetido à etapa de desidratação por filtro de pressão (XUAN *et al.*, 2016a).

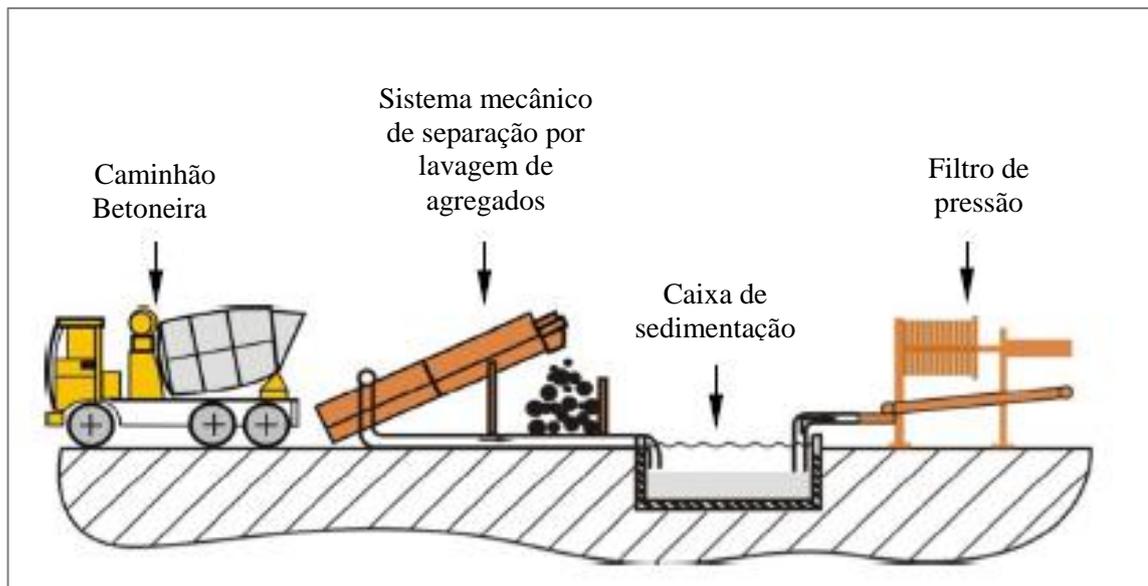


Figura 2.4 - Sistema de recuperação de resíduo de concreto fresco usinado  
Fonte: Adaptado de XUAN *et al.*, 2016a, p.665.

### 2.3.2 Sistema mecânico de separação por lavagem de agregados

O sistema mecânico de separação por lavagem de agregados remove a pasta de cimento recuperando agregados aptos ao reuso direto. Na Figura 2.5 observa-se a ilustração de um exemplo deste sistema.

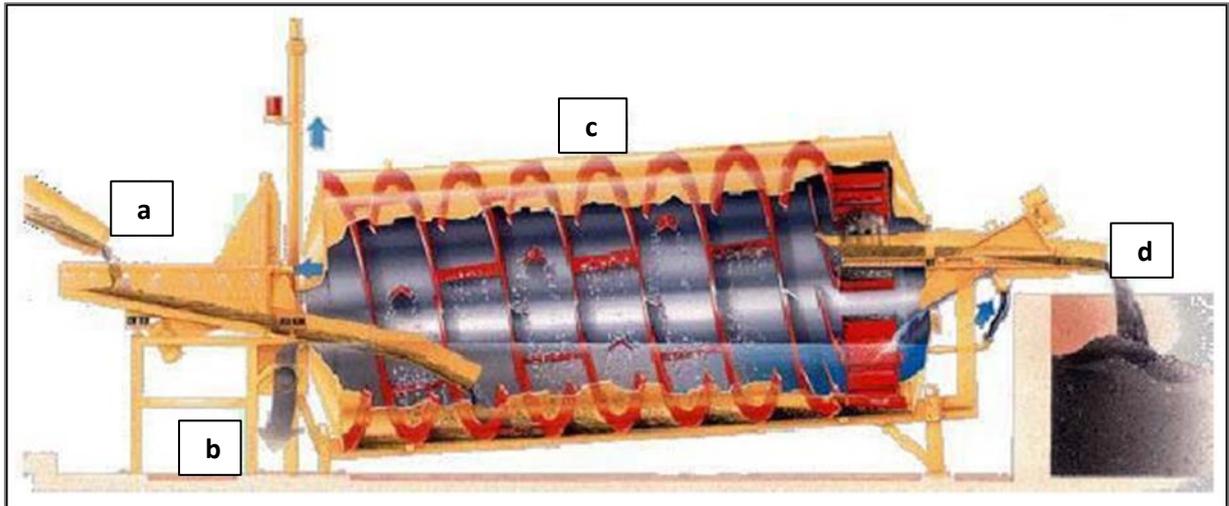


Figura 2.5 - Equipamento utilizado para reciclagem de concreto fresco usinado  
 a) resíduos de concreto fresco sendo depositados no funil alimentador  
 b) saída da água de lavagem com os finos em suspensão  
 c) processo de lavagem sendo executado no tambor  
 d) saída dos agregados na calha de descarga

Fonte: SCHWING STETTER. Disponível em <[www.schwingstetter.com.br](http://www.schwingstetter.com.br)>. Acesso em: 2 jan. 2019.

Trata-se de uma recicladora do tipo tambor composta de um funil alimentador, no qual os resíduos de concreto fresco usinado são depositados sendo conduzidos para uma primeira sessão do equipamento, onde se introduz água para auxílio na decantação dos agregados, de modo que o aglomerante existente permaneça suspenso. Essa sessão do equipamento consiste em um tambor com espirais que giram no sentido contrário ao fluxo de água. A água é recolhida em abertura próxima ao ponto onde são introduzidos os resíduos de concreto. Os finos em suspensão são expelidos juntamente com a água, e são direcionados para um tanque que possui agitadores evitando a decantação. Na outra extremidade do equipamento os agregados são recolhidos na calha de descarga, se encontrando, finalmente, preparados para a sua aplicação na fabricação de novos traços de concreto. Ressalta-se que os agregados também podem ser separados em frações, desde que um sistema de peneiramento seja instalado junto ao reciclador (VIEIRA e FIGUEIREDO, 2016).

A recicladora do tipo peneira rotativa, observada na Figura 2.6, denota outro sistema mecânico de separação por lavagem de agregados. A recicladora inicialmente separa as frações de agregados da pasta de cimento, e a água é subsequentemente recuperada. Este sistema lava e separa o resíduo, que flui para baixo na peneira rotativa, sendo separado em agregados e pasta de cimento. Os agregados miúdos e graúdos são despejados em compartimentos separados, permitindo sua futura reutilização em proporções específicas na

fabricação de novos concretos. Após o processo de reciclagem, os agregados recuperados gerados são coletados e depositados em uma câmara de secagem, onde o teor de água presente é reduzido por secagem natural. Os agregados reciclados lá permanecem por aproximadamente um dia, posteriormente, são homogeneizados e colocados em outro compartimento, até serem enviados para a produção de concreto (VIEIRA e FIGUEIREDO, 2016).

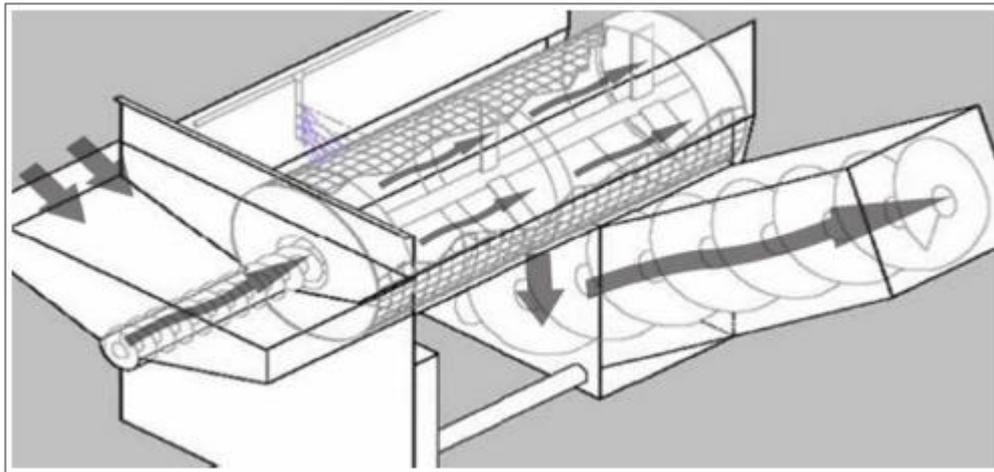


Figura 2.6 - Recicladora do tipo peneira rotativa  
Fonte: VIEIRA e FIGUEIREDO, 2016, p.340.

No beneficiamento de resíduos de concretos usinados com a utilização de sistemas mecânicos de separação, os agregados originais são separados da pasta de cimento por meio do processo de lavagem com água sob pressão. Em ambos os equipamentos exemplificados, a pasta de cimento residual é deposta no sistema de caixas de decantação, a fim de separar as fases com uma maior concentração de sólidos de água recuperada. O uso destes sistemas requer a disponibilização de espaço destinado à alocação dos agregados recuperados e água recuperada (VIEIRA e FIGUEIREDO, 2016).

### 2.3.3 Sistema de recuperação de água

A indústria da construção civil é responsável por um alto volume de consumo de água, sendo o concreto um material dependente da sua utilização e amplamente consumido. Deste modo, a produção do concreto não se relaciona somente com a geração de resíduos, mas também com o gasto de água em seus processos produtivos. O processo de lavagem dos caminhões

betoneira, das bombas de lançamento e de outros elementos presentes nas usinas geram alta demanda de água e causam poluição da água e solos quando o material residual deste processo não é adequadamente destinado à aterros controlados (ASADOLLAHFARDI *et al.*, 2015). Assim, a recuperação da água utilizada é certamente uma medida proativa de gestão ambiental, útil para reduzir os impactos gerados em decorrência destas atividades (XUAN *et al.*, 2018).

Neste contexto, alguns dos sistemas de recuperação de resíduo de concreto fresco usinado podem, também, ter como foco a recuperação da água utilizada nos processos de lavagem. No sistema de tratamento por decantação, a água utilizada na lavagem dos elementos é recuperada por meio do processo de sucessivos níveis de decantação sendo esta água reutilizada em um ciclo fechado, evitando o descarte no meio ambiente (POLESELLO *et al.*, 2010). Nos sistemas mecânicos de separação por lavagem de agregados, um sistema de recuperação de água, que separa os sólidos da água, pode ser instalado possibilitando a sua reutilização no sistema de lavagem de agregados, e também para depressão de poeira e outros processos de limpeza.

Caso a água recuperada seja destinada à produção de novos concretos, há necessidade de atendimento à alguns critérios para não prejudicar sua qualidade. A adequação da água recuperada a este uso é dependente do teor de sólidos em suspensão e a quantidade de sais, tais como cloretos e sulfatos, bem como do seu pH. O conteúdo de sólidos pode ser correlacionado com a densidade da água recuperada, sendo que, quando a quantidade de partículas finas na água recuperada é superior aos limites pré-definidos, seu uso acarreta um efeito negativo sobre a eficácia dos agentes redutores de água, como plastificantes e outros aditivos (VIEIRA e FIGUEIREDO, 2016).

A NBR 15900-1 (ABNT, 2009) determina que para ser utilizada como água para amassamento de concreto estrutural, a massa adicional de material sólido no concreto produzido com a utilização da água recuperada deve ser menor que 1% (massa/massa) da massa total de agregados presentes no concreto. Nos casos de concretos com exigências especiais, a possível influência da utilização da água recuperada deve ser considerada. Para alguns processos de preparação de concreto e, conforme as exigências propostas ao concreto

produzido, a presença de maiores teores de material sólido é permitido, desde que o seu desempenho satisfatório seja certificado.

## **2.4 Durabilidade das estruturas de concreto armado**

A durabilidade das estruturas de concreto armado é, seguramente, um dos temas de maior preocupação nas pesquisas relacionadas a avaliação do desempenho dos compósitos de matriz cimentícia. O desenvolvimento sustentável tem como enfoque principal o aumento da eficácia econômica favorecendo uma gestão melhorada dos recursos humanos, naturais e financeiros. Assim, torna-se adequado evitar a demolição de uma construção em concreto ou a necessidade de intervenções precoces (CAPMAS, 2014).

Neville (1997, p. 481) considera essencial que as estruturas de concreto duráveis *“desempenhem as funções que lhe foram atribuídas, que mantenham a resistência e a utilidade que delas se espera, durante um período de vida previsto ou, pelo menos, razoável. Portanto o concreto deve poder suportar o processo de deterioração ao qual se supõe que venha a ser submetido”*. Assim, a NBR 6118 (ABNT, 2014, p. 15) estabelece vida útil como *“o período de tempo durante o qual se mantêm as características das estruturas de concreto, sem intervenções significativas, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor, bem como de execução dos reparos necessários decorrentes de danos acidentais”*.

Helene (1997) demonstra a conceituação de vida útil da estrutura por meio do diagrama que pode ser observado na Figura 2.7. A vida útil de projeto é o período de tempo que vai até a despassivação das armaduras. Nesta etapa os agentes agressivos estão penetrando a rede de poros do cobrimento sem causar danos reais à estrutura. O período em que os efeitos da penetração dos agentes agressivos na estrutura começam a se revelar até o momento do surgimento de manchas superficiais, fissuras ou destacamentos no concreto de cobrimento compreende a etapa de vida útil de serviço. A etapa de vida última ou total abrange o período que há redução significativa da seção resistente da armadura ou a considerável diminuição de sua aderência com o concreto podendo ocasionar o colapso da estrutura. Já o período de vida útil residual determina o tempo em que a estrutura será capaz de desempenhar suas funcionalidades após uma vistoria ou intervenção. Salienta-se que essa etapa envolve parte da

vida útil de serviço e da vida total. Sendo assim, para ser considerada durável, a estrutura deve resistir às influências e ações capazes de intervir na sua execução e utilização e permanecer adaptada ao uso ao qual foi concebida durante sua vida útil (BAROGHEL-BOUNY *et al.*, 2014).

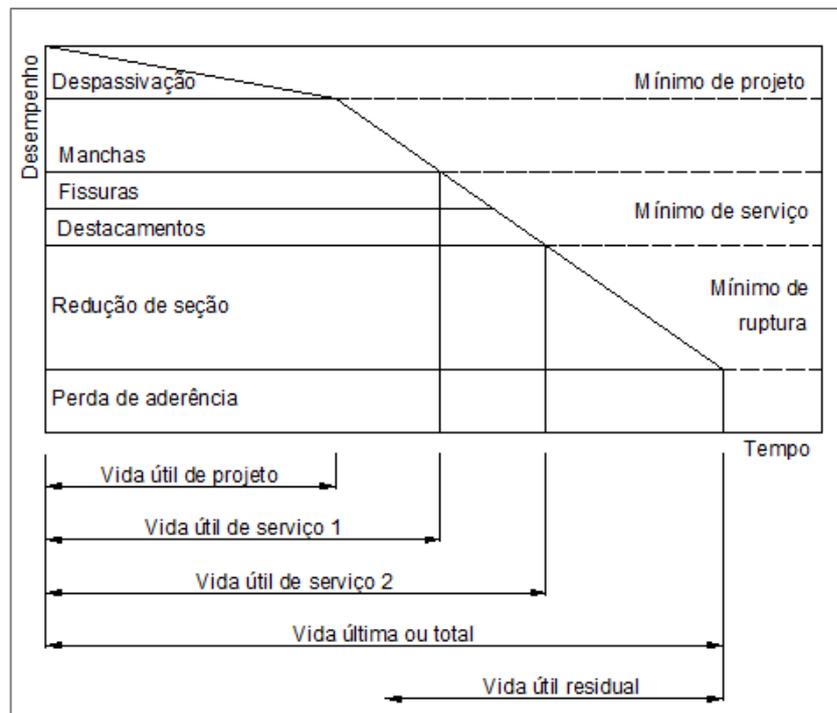


Figura 2.7 - Conceituação de vida útil da estrutura  
Fonte: Adaptado de HELENE, 2004, p.10.

De acordo com Reis (2013) o tempo de vida útil pode variar conforme às características das estruturas e à sua localização, sendo a deteriorização problemática se ocorrer antes do término de vida útil projetado (NEVILLE, 1997). As características relacionadas à durabilidade das estruturas de concreto armado podem ser controladas por meio da composição, adensamento, cura e pela espessura de cobrimento das armaduras (HELENE, 1997). Para que a durabilidade seja aumentada é fundamental estender o máximo possível o período de iniciação dos processos de deterioração, empregando-se concretos compactos e pouco permeáveis.

Os processos de deterioração podem ser iniciados por meio de causas físicas ou químicas, sendo o desgaste superficial, erosão, cavitação, fissuração originária de variações na temperatura e umidade, cristalização de sais nos poros, exposição à carregamentos estruturais excessivos e exposição a temperaturas extremas, como fogo ou congelamento, deteriorações de origem física. As causas químicas envolvem três categorias, hidrólise de componentes da

pasta por água mole, reações químicas, que conduzem à formação de produtos expansivos, como corrosão da armadura do concreto, reação álcali-agregado e ataque por sulfato, e reações de troca catiônica entre fluidos agressivos e a pasta de cimento (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Quadro 2.2 - 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 Submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana <sup>1,2</sup> Marinha <sup>1</sup>	Pequeno
III	Forte	Industrial <sup>1,2</sup> Industrial <sup>1,3</sup>	Grande
IV	Muito forte	Respingo de maré	Elevado

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

2) Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras de região de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

3) Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014).

Tabela 2.1 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40
Consumo de cimento Portland por metro cúbico de concreto kg/m <sup>3</sup>	CA e CP	≥ 260	≥ 280	≥ 320	≥ 360

1) CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado

2) CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido

Fonte: NBR 12655 (ABNT, 2015).

De acordo com Troian (2010), a perda de durabilidade do concreto armado pode estar relacionada a falta de conhecimento do ambiente ao qual será submetido, sendo necessária a avaliação das condições ambientais para garantir desempenho, qualidade e funcionalidade adequados às estruturas de concreto. A NBR 6118 (ABNT, 2014) apresenta a relação entre o nível de agressividade ambiental e o risco de deterioração que a estrutura será submetida, conforme pode ser observado no Quadro 2.2 e na Tabela 2.1.

## 2.5 Corrosão das armaduras

A concepção de estruturas para as mais variadas finalidades construtivas é possível em virtude da utilização de armaduras de aço nas zonas tracionadas da estrutura de concreto armado e um dos importantes papéis desempenhados pelo concreto é o de fornecer à armadura um ambiente protetor (BAROGHEL-BOUNY *et al.*, 2014). A degradação das estruturas de concreto devido à corrosão das armaduras é um problema relacionados à redução da vida útil que afeta mundialmente a indústria da construção civil. Este inconveniente tem alto impacto em função da precocidade com que ocorre, da quantidade de casos verificados, assim como do montante de recursos envolvidos para sanar o problema (MEIRA, 2017).

A corrosão das armaduras é um processo resultante da interação destrutiva de um material com o ambiente. Conforme discussões de Cascudo (2000), em condições normais, desde a concepção da estrutura de concreto armado, as armaduras encontram-se envoltas de uma proteção química resistente, estável, impermeável, compacta e aderente à superfície do aço. Esta proteção química é chamada de camada passivadora e é composta por óxidos de ferro, sendo estes formados por meio das reações de oxidação do ferro e de redução do oxigênio presente na fase líquida dos poros do concreto. Sua composição varia entre magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) e maghemita ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) (SAGOE-CRENTSIL e GLASSER, 1990 *apud* CASCUDO, 2000). Estes autores também afirmam que existe um estado de semipassivação do aço, condição característica da maioria das estruturas de concreto. De acordo com os mesmos, a proteção química do aço neste estado apresenta uma estrutura interfacial dupla, constituída por uma camada mais interna de óxido de ferro e uma camada mais externa que é uma mistura de goetita ( $\alpha\text{-FeOOH}$ ) e óxido de ferro. Assim, enquanto a armadura se encontrar nestes estágios, ou seja, enquanto a película se mantiver estável, não haverá corrosão. Tal estabilidade é

decorrente da alta alcalinidade do referido extrato aquoso do concreto, dotado de um pH entre 12 a 13 (HAUSMANN, 1967).

Contudo, com o decorrer da vida útil da estrutura de concreto armado, esta película pode perder sua funcionalidade sendo despassivada, permitindo a penetração de umidade, oxigênio e agentes agressivos à superfície do aço, dando início a corrosão. A despassivação se dá essencialmente em função de dois aspectos principais, a saber: à redução da alcalinidade do concreto, devido às reações de carbonatação, situações em que o concreto se submete à lixiviação ou na decorrência da penetração de substâncias ácidas e devido à presença de uma quantidade suficiente de íons cloretos livres. Neste processo, o pH sofre uma redução para valores inferiores a 11,5, faixa na qual a camada de passivação se desestabiliza (BAKKER, 1988). Conforme discussão apresentada por Neville e Brooks (2013) com a presença de oxigênio e umidade no concreto, forma-se uma película de eletrólito sobre a superfície dos fios ou barras de aço com regiões catódicas e anódicas. Os íons ferrosos carregados positivamente no ânodo ( $\text{Fe}^{++}$ ) passam para a solução, enquanto os elétrons livres negativamente carregados ( $e^-$ ) passam pelo aço até o cátodo, onde são absorvidos pelos constituintes do eletrólito e se combinam com a água e oxigênio formando os íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ). Estes, por sua vez, se combinam com os íons ferrosos formando o hidróxido ferroso, sendo convertidos pela oxidação posterior em hidróxido férrico ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ).

Na Figura 2.8 pode-se observar, de maneira esquemática, o processo eletroquímico e a formação dos produtos de corrosão. É possível perceber a ocorrência da criação da pilha local sobre o aço, compreendida entre as zonas catódica e anódica, sendo que tal processo, acarreta na dissolução do metal na região do ânodo e à precipitação de diferentes óxidos ferrosos na presença de água e oxigênio (BAROGHEL-BOUNY *et al.*, 2014). A oxidação do aço é responsável por aumentar o volume da região por ela ocupada na estrutura de concreto armado, gerando assim, tensões de expansão responsáveis por causar a fissuração e o destacamento do concreto (NEVILLE e BROOKS, 2013). O processo corrosivo é intensificado quando se associa à umidade e presença de oxigênio, agentes agressivos, como os íons cloreto e o dióxido de carbono. Estes agentes agressivos são capazes de combinar com o elétron liberado na reação de formação do íon ferroso, formando a pilha ou célula de corrosão eletroquímica (HELENE, 1986).

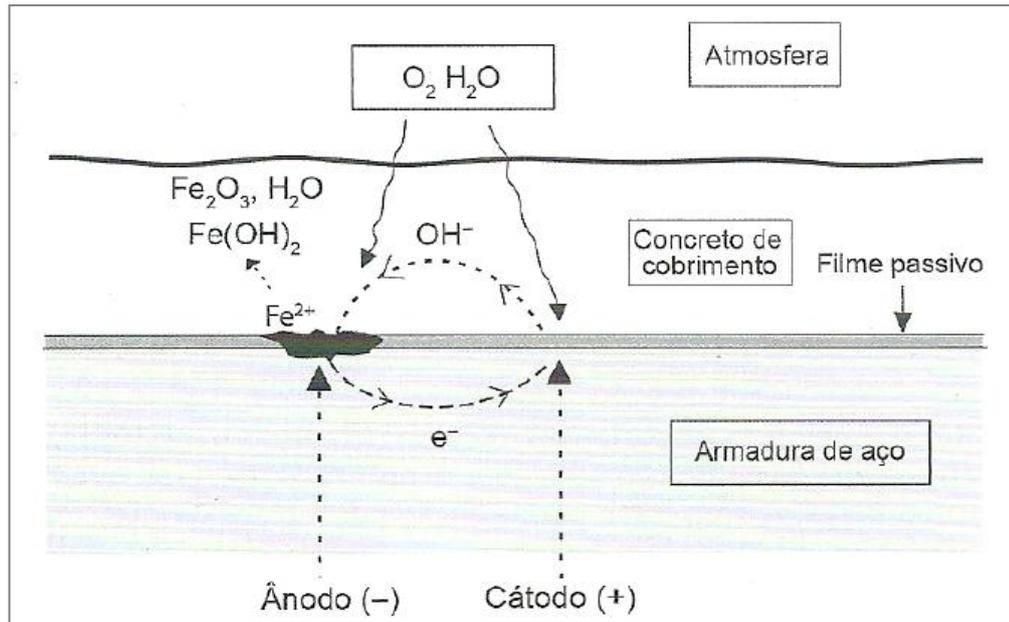


Figura 2.8 - Esquema de formação dos produtos de corrosão  
 Fonte: BAROGHEL-BOUNY *et al.*, 2014, p.265.

## 2.6 Corrosão das armaduras pela ação de íons cloreto

Os íons cloreto podem ser incorporados ao concreto durante o processo de mistura quando os agregados e a água de amassamento estão contaminados ou pela utilização de aditivos aceleradores de endurecimento baseados em cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ). A NBR 6118 (ABNT, 2014) assim como a NBR 12655 (ABNT, 2015) determinam que estes aditivos não devam ser utilizados em estruturas de concreto armado ou protendido. O concreto e as armaduras também podem estabelecer contato com os íons por meio do ambiente externo, com o ingresso através da rede de poros, se a estrutura estiver exposta a ambientes agressivos. São estes, locais contendo ar atmosférico industrial, ambientes marinhos, estruturas submetidas ao uso de sais de degelo e ácido clorídrico (HCl), empregados na lavagem de fachadas (TROIAN, 2010). A taxa de penetração de íons cloreto através do concreto condiciona-se ao local onde a estrutura de concreto está localizada (região e a situação de contato com os íons), a qualidade do concreto executado e a presença de umidade e oxigênio. De acordo com a discussão realizada por Ferreira (2003) os íons cloreto penetram nos poros do concreto por meio da solução eletrolítica e desestabilizam pontualmente a camada de passivação iniciando o processo corrosivo. Na presença de cloretos, ocorrem as reações químicas representadas pelas Equações 2.5 e 2.6.



O ataque por íons cloreto é localizado em pontos específicos da armadura, formando cavidades limitadas, os pites. Na superfície do metal, identifica-se a formação das micropilhas, os pites correspondem às zonas anódicas e a camada passivadora corresponde às superfícies catódicas conforme visto na Figura 2.9 (BAROGHEL-BOUNY *et al.*, 2014).

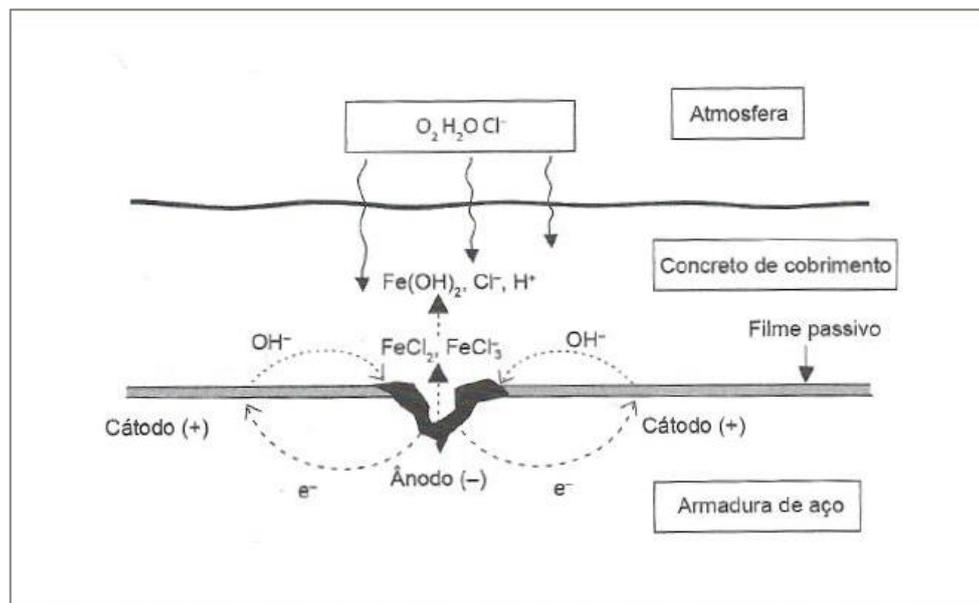


Figura 2.9 - Mecanismo de corrosão eletroquímica em presença de cloretos  
Fonte: BAROGHEL-BOUNY *et al.*, 2014, p. 283.

É consenso que os íons cloreto em quantidades suficientes podem levar a ruptura da camada de passivação da armadura, conduzindo ao processo corrosivo. Todavia o mecanismo preciso ainda é controverso. A maioria das teorias que procuram explicar este fenômeno consideram que a destruição do filme passivo é algo dinâmico, que ocorre em ciclos de despassivação e repassivação até o momento em que a despassivação seja completa. Existem três teorias modernas aceitas pelo Comitê 222 (ACI, 2002) sendo elas a Teoria do Filme de Óxido, que é referente ao período de iniciação da corrosão, a Teoria da Adsorção e a Teoria do Complexo Transitório, estas, referentes ao período de propagação (TESSARI, 2001).

Helene (1993) afirma que os ânions de cloro podem destruir a película passivadora presente na armadura independentemente da alcalinidade do meio em que está inserida, a partir das reações químicas que ocorrem com o ingresso dos íons cloreto. Neste processo, os íons cloreto se combinam com os íons de ferro, formando moléculas de cloreto de ferro, estes participam das reações sem ser consumidos, sendo liberados posteriormente para novas reações. Assim, o processo corrosivo pode se instaurar mesmo com pequenas quantidades de íons, mas a formação dos produtos de corrosão intermediários contendo cloretos diminui temporariamente a sua concentração.

A quantidade de íons  $\text{OH}^-$  originários da reserva alcalina do líquido intersticial tende a repassar as zonas atacadas, limitando, assim, a propagação da corrosão. Se o aporte de cloretos se mantiver, a concentração de íons aumentará nas áreas anódicas sobre toda a armadura. As variações de umidade e o gradiente de concentração de cloretos produzem novos ânodos que acabam por se agrupar em grandes zonas corroídas. Assim, a corrosão será tão mais pronunciada quanto maior a concentração de íons cloreto no nível das armaduras (BAROGHEL-BOUNY *et al.*, 2014).

### **2.6.1 Formas de apresentação dos íons cloreto no concreto**

Os íons cloreto podem se apresentar no concreto sob três formas: cloretos livres (na forma de íons na solução aquosa dos poros), cloretos fisicamente adsorvidos nas paredes dos poros capilares e cloretos fixos (quimicamente combinados, como nos cloroaluminatos, incorporados aos produtos da hidratação do cimento). Os íons que mais contribuem para o desenvolvimento da corrosão são os íons livres, pois estes se encontram disponíveis para as reações químicas que conduzem ao processo corrosivo (BAROGHEL-BOUNY *et al.*, 2014; TROIAN, 2010).

### **2.6.2 Teores críticos de cloretos**

Os limites considerados nocivos à estrutura ainda não são consenso mundial, apesar de que, diversas normas pesquisadas de diversos países adotem valores próximos para os teores críticos de cloretos (TABELA 2.2).

Tabela 2.2 - Limites de normas para o teor total de cloretos em relação à massa de cimento

<b>Normas/Locais</b>	<b>Teor crítico de cloretos (%)</b>
BRE (1980) Inglaterra	1
ACI Committe 318 EUA	0,15 em ambientes com cloretos
	0,3 em ambiente normal
	1,0 em ambiente seco
	0,06 para concreto protendido
ACI Committe 222 EUA	0,08 para concreto protendido
	0,10 em ambiente úmido
	0,20 em ambiente seco
BS 8110: Part 1 - BSI (1997) Inglaterra	0,10
NBR 12655 (2015) Brasil	0,15 em ambientes com cloretos
	0,3 em ambiente normal
	0,40 em concretos com branda condição de exposição (seco ou protegido de umidade)
EN 206-1 (ECS,2000) Europa	0,10 a 0,20 para concreto protendido
	0,20 a 0,40 para concreto armado
Bulletin 34 (FIB, 2006) Suíça	0,20
EHE - 08 (CPH, 2011) Espanha	0,60 para concreto armado
	0,30 para concreto protendido
Hong Kong Building Depart (HKBD, 2016) China	0,10 para concreto protendido
	0,20 para concretos com cimento resistente a sulfatos
	0,35 para concretos com cimento Portland de endurecimento rápido
NZS 3101 (NZS, 2006) Nova Zelândia	0,02 para concreto protendido
	0,03 para concreto armado úmido
	0,07 para concreto armado seco

Fonte: Adaptado de FIGUEIREDO, 2005, p.844; MEIRA, 2017, p. 41; SILVA, 2006, p. 48.

A taxa de penetração de íons cloreto em uma estrutura depende das condições locais e da qualidade do concreto, sendo que o teor crítico de cloretos em uma estrutura também se condiciona a tais aspectos. Para que certa quantidade de íons cloreto chegue até a armadura instaurando o processo corrosivo, é necessária a presença de oxigênio e umidade associada a

presença de cloretos livres. O tipo de cátion que será associado aos íons cloretos e a presença de outros ânions como, por exemplo, sulfatos intensificam o processo (SILVA, 2006).

Na Figura 2.10 observa-se uma relação quantitativa entre os teores críticos de cloretos, as condições de umidade do ambiente e a qualidade do concreto.

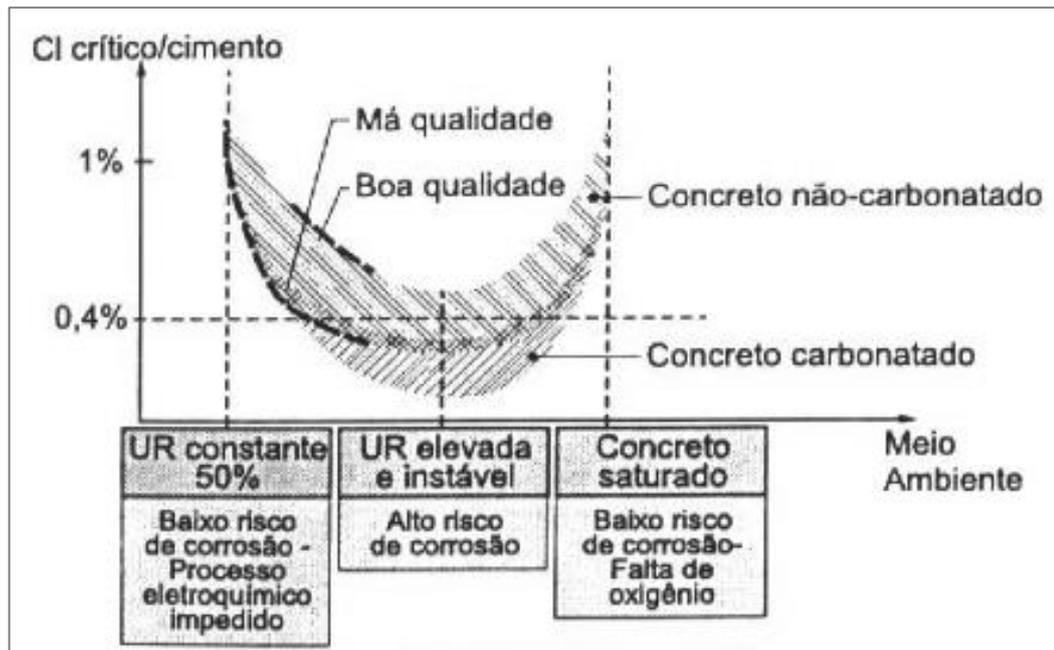


Figura 2.10 - Relação quantitativa entre teor crítico de cloretos, condições de umidade ambiental e qualidade do concreto

Fonte: Adaptado de Bulletin D'Information 183 (CEB, 1992) *apud* SILVA, 2006, p.17.

Assim, em ambientes de baixa umidade as reações químicas responsáveis por desencadear o processo corrosivo são dificultadas, visto que, um componente fundamental está ausente, a solução eletrolítica, responsável pelo transporte dos íons cloreto pelos poros capilares. A mesma dificuldade é enfrentada em ambientes saturados visto que a baixa disponibilidade de oxigênio também é um fator que impede as reações químicas responsáveis por originar o processo corrosivo. Então, quando as estruturas de concreto armado estão submetidas a tais condições os teores limites de íons cloreto na estrutura de concreto armado podem se elevar. O contrário ocorre quando a umidade relativa da estrutura é elevada e instável, a presença de solução eletrolítica nos poros capilares do concreto conduz os íons cloreto mais rapidamente às proximidades da armadura e a presença de oxigênio possibilita que as reações químicas ocorram, assim, os teores limites de íons cloreto são mais baixos. O processo corrosivo se

torna ainda mais pronunciado quando se associa a estes fatores a exposição da estrutura ao dióxido de carbono.

### **2.6.3 Mecanismos de transporte**

Os agentes deletérios penetram no concreto por intermédio da rede de poros por meio de diferentes mecanismos de transporte. Dentre os mecanismos de transporte de líquidos e gases no concreto, a absorção capilar, a difusão, a migração iônica e a permeabilidade destacam-se como os mais predominantes no fenômeno de corrosão das armaduras pela penetração de íons cloreto, podendo atuar simultaneamente ou sucessivamente ao longo do tempo (SILVA, 2017).

De acordo com Mota *et al.* (2012) a primeira etapa da penetração de íons cloreto na superfície do concreto ocorre por meio da absorção capilar, quando a estrutura se submete a ciclos de molhagem e secagem em ambientes de exposição à névoa salina, zonas de maré ou saís de degelo (BAROGHEL-BOUNY *et al.*, 2014). Esta é condicionada pela porosidade, que permite o transporte de líquidos para o interior do concreto. Após a etapa de absorção capilar, a difusão iônica se torna o meio predominante de movimentação dos cloretos no interior do concreto, ocorrendo quando os íons atravessam a camada superficial e atingem a parte interior. A diferença de concentração de cloretos entre o meio externo e o interior do concreto promove a movimentação dos íons na busca do equilíbrio. A migração iônica é um mecanismo de transporte ocasionado pelo campo gerado pela corrente elétrica do processo de corrosão eletroquímico da armadura (CASCUDO, 1997). A diferença de potencial elétrico induz a movimentação dos íons pela rede de poros do concreto, sob a qual os íons negativos de cloro migram em direção à zona de menor potencial elétrico.

Neville e Brooks (2013) conceituam, permeabilidade como a facilidade com a qual os líquidos ou gases podem se movimentar através do concreto, sob um gradiente de pressão externa. A segmentação dos capilares exerce grande influência na permeabilidade, reforçando o conceito de que a simples presença de elevada porosidade não fornece permeabilidade ao concreto, uma vez que, os poros capilares precisam estar conectados, sendo admissível que dois corpos porosos apresentem porosidades equivalentes, porém com permeabilidades distintas. Sendo assim, a permeabilidade é um dos principais indicadores da qualidade de um

concreto. É um parâmetro que depende diretamente da relação água/cimento na mistura, quanto menor for este fator, menos permeável será a estrutura (MOTA *et al.*, 2012). Pode ser observado por meio da Figura 2.11 os principais mecanismos de transporte dos íons cloreto no concreto.

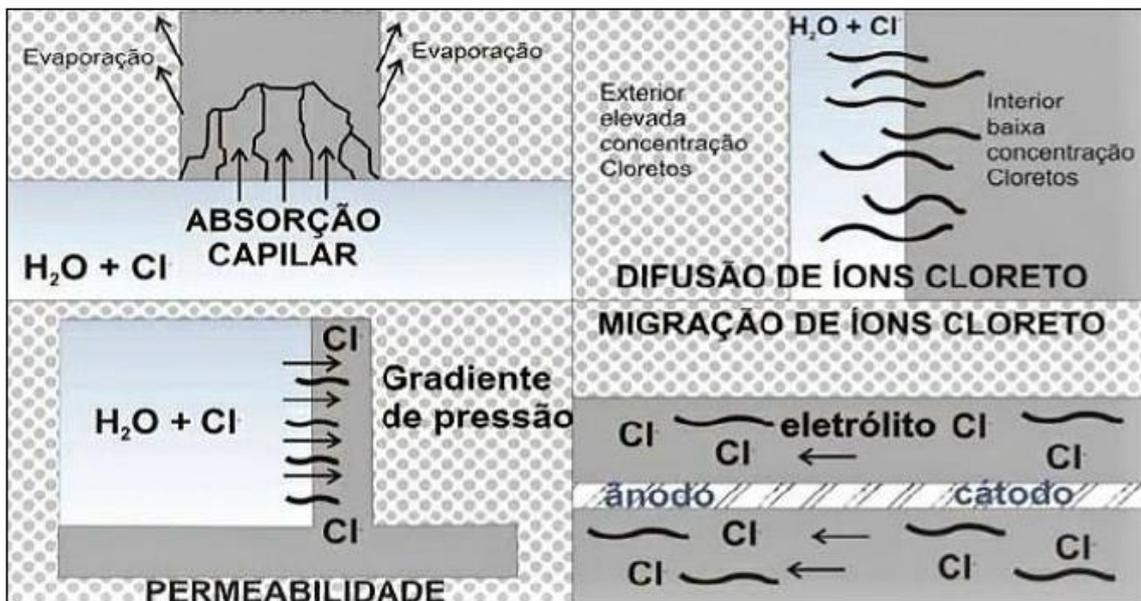


Figura 2.11 - Formas de penetração de íons cloreto na estrutura de concreto  
Fonte: HELENE, 1993, p. 121.

### 2.6.3.1 Absorção capilar

A absorção capilar é definida como o fluxo de um fluido em consequência de um gradiente de umidade. Este mecanismo também pode ser definido pelo transporte de líquidos por ação da tensão superficial atuante nos poros capilares do concreto. Esta ocasiona o surgimento de forças capilares que provoca a ascensão do líquido através dos poros. A intensidade das forças capilares depende das características do sólido poroso (raio, tortuosidade e continuidade dos poros), das características do líquido (viscosidade, densidade e tensão superficial), da energia superficial e da presença de umidade (SANTOS, 2006). A absorção capilar pode ser modelada pela Lei de Jurin que relaciona a altura de ascensão capilar ao tempo de contato com a água, conforme Equação 2.7 (HELENE, 1993).

$$h = \frac{2\gamma}{r\gamma}$$

Eq. 2.7

Onde:

$h$  = altura ou penetração da água no capilar (m);

$\nu$  = tensão superficial da água (kg/m);

$r$  = raio do capilar (m);

$\gamma$  = massa específica da água (kg/m<sup>3</sup>).

Uma vez que o concreto é um material hidrófilo a absorção capilar da água é um mecanismo de difícil controle. Helene (1993) condiciona a absorção capilar ao diâmetro dos poros capilares da estrutura e sua interconectividade. O autor afirma que quanto menor o diâmetro dos poros, maiores são as pressões capilares promovendo uma maior profundidade de concreto atingida pela água absorvida. Por outro lado, quanto maior o diâmetro dos poros capilares, menor será a profundidade, contudo, a quantidade total de água absorvida será maior. Todavia, o autor pondera que esses princípios se confirmam em partes, pois a intercomunicabilidade dos poros é um fator mais importante do que o diâmetro em si. Assim, quando considerado os dois fatores, intercomunicabilidade e menor diâmetro, o resultado é um concreto que absorve menor quantidade de água, e contrariamente ao esperado, apresentam a menor profundidade de penetração de água.

### 2.6.3.2 Difusão

A difusão é um mecanismo de transporte de um constituinte sob o efeito de sua agitação aleatória em uma escala molecular. Com a existência de uma diferença de concentração entre dois pontos de um determinado meio, a difusão ocorre com o transporte global do constituinte considerado, desde a zona mais concentrada até a zona menos concentrada, neste sentido, até o equilíbrio das concentrações (OLLIVIER e TORRENTI, 2014). Este fenômeno ocorre tanto para substâncias presentes em meio líquido como para aquelas em meio gasoso. A teoria da difusão é baseada no modelo matemático proposto por Adolph Eugen Fick. A 1ª Lei de Fick (EQUAÇÃO 2.8) descreve o mecanismo de transporte das espécies iônicas em solução em decorrência da existência de uma diferença de concentração entre dois pontos de um meio específico.

$$J_x = -D \frac{\partial c}{\partial x}$$

Eq. 2.8

Onde:

$J_x$  = fluxo do constituinte na direção  $x$ ;

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

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

$\frac{\partial c}{\partial x}$  = gradiente de concentração nesta direção.

O sinal negativo indica que o fluxo ocorre no sentido oposto ao aumento da concentração. A Equação 2.8 permite calcular o fluxo de massa dos íons cloreto associado à um gradiente de concentração e se aplica a fenômenos de difusão em estado estacionário. Este fluxo é diretamente proporcional ao produto do gradiente com a difusividade dos íons no meio, medido na direção perpendicular à seção do fluxo (TUUTTI, 1982).

No transporte de espécies iônicas em solução, por difusão, na fase aquosa intersticial, além do mecanismo básico dado pelas diferenças de concentração, o transporte também acontece pela ocorrência de diferenças entre o potencial local, tal mecanismo é denominado gradiente de potencial de membrana. Este é decorrente das forças de interações elétricas, uma vez que cada íon cerca-se por outras espécies iônicas (OLLIVIER e TORRENTI, 2014). O fluxo que decorre desse potencial de membrana efetivando-se sobre um íon é dado pela relação expressa na Equação 2.9.

$$J_{i,x} = -u_i c_i \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad \text{Eq. 2.9}$$

Onde:

$J_{i,x}$  = fluxo decorrente do potencial de membrana;

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

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

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

Assim, o fluxo total de massa é a soma da contribuição devida ao gradiente de concentração, dado pela 1ª Lei de Fick, e da parcela devida ao potencial de membrana (EQUAÇÃO 2.10), a saber:

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

Onde:

$J_d$  = fluxo total de massa;

$D_i$  = coeficiente de difusão efetivo dos íons cloreto no concreto ( $m^2.s^{-1}$ );

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

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

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

$\frac{\partial C_i}{\partial x}$  = gradiente de concentração, nesta direção;

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

No concreto, a difusão é resultado do contato da solução presente nos poros com o meio ambiente, sendo o fenômeno mais intenso quanto maior a sua concentração na solução externa (PEREIRA, 2001). Para o cálculo do coeficiente de difusão dos cloretos no interior do concreto saturado, geralmente utiliza-se a 2ª Lei de Fick dada pela Equação 2.11.

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

Onde:

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

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

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

Neste caso, o regime de transporte não é permanente, ou seja, acontece em estado não-estacionário, o que contempla o fluxo variável com o tempo e a profundidade de penetração (OLLIVIER e ORRENTI, 2014). Conhecendo os parâmetros relacionados e baseando-se na 2ª Lei de Fick é possível prever a vida útil de um elemento de concreto armado estimando em quanto tempo os agentes agressivos atingirão a armadura. Também é possível determinar o tempo necessário para que a concentração de cloretos alcance teores críticos para que seja iniciado o processo corrosivo (PEREIRA, 2001).

### 2.6.3.3 Migração

O fenômeno da migração iônica é definido pela presença de íons em campo elétrico devido a uma diferença de voltagem, que pode ser originária da deflagração de pilhas de corrosão eletroquímicas ou de uma diferença de potencial gerada por uma fonte externa. Durante este fenômeno, os íons cloreto, negativos, migram em direção ao ânodo, zona de menor potencial elétrico, ocasionando deste modo, o deslocamento de tais íons através do concreto (HELENE, 1993; PEREIRA, 2001; TROIAN, 2010). Nas estruturas de concreto armado ou em procedimentos de ensaios acelerados, como por exemplo, o ensaio proposto pela NT BUILD 492 (NORDTEST, 1999), a migração pode ocorrer simultaneamente a outro mecanismo, como em conjunto com o transporte dos íons cloreto para o interior do concreto por difusão. Assim, o fluxo de íons em consequência da migração e o coeficiente de difusão podem ser correlatados por meio da Equação 2.12.

$$q_m = -D \frac{zF}{RT} \frac{\partial v}{\partial x} \quad \text{Eq. 2.12}$$

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).

### 2.6.3.4 Permeabilidade

Os concretos produzidos com uma mistura contendo uma relação água/cimento baixa atingem o estágio de segmentação dos poros em um período reduzido de cura úmida, característica importante do ponto de vista da durabilidade. Embora a água seja um componente fundamental para as reações da hidratação do cimento, estando presente desde a concepção do

concreto e atuando como agente facilitador na mistura dos componentes, grande parte da água evaporável, isto é, toda a água capilar e uma parte da água adsorvida, podem ser eliminadas dependendo das condições ambientais e da espessura do elemento de concreto deixando os poros não saturados. Devido ao fato de a água se movimentar livremente na parte interna do concreto a sua ausência dificultará a ocorrência de fenômenos destrutivos dependentes da condutividade hidráulica, que também é conhecida como coeficiente de permeabilidade (K) (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Apesar de haver ensaios normatizados pela ASTM (American Society of Testing Materials), a permeabilidade do concreto pode ser medida por um ensaio simples de laboratório, contudo os resultados são comparativos. Com a realização do ensaio se obtém por meio da Lei de Darcy, representada pela Equação 2.13, a permeabilidade do concreto à água, em regime laminar, estacionário e não turbulento (NEVILLE e BROOKS, 2013). Deste modo, quanto menor o coeficiente de permeabilidade da amostra, mais durável será o material.

$$\frac{1}{A} \frac{dq}{dt} = K \frac{\Delta h}{L} \quad \text{Eq. 2.13}$$

Onde:

K = coeficiente de permeabilidade do concreto à água (m<sup>2</sup>/s);

$\frac{dq}{dt}$  = velocidade do fluxo de água (m<sup>3</sup>/s);

A = área da seção transversal da amostra (m<sup>2</sup>);

$\Delta h$  = diferença de altura na coluna hidráulica através da amostra (m);

L = espessura da amostra (m)

## 2.7 Cimento Portland e sua influência na corrosão das armaduras

O cimento Portland é um material utilizado como aglutinante na produção de concretos, tendo sido descoberto no século XIX e patenteado por Joseph Aspdin, um construtor de Leeds, no Reino Unido (NEVILLE e BROOKS, 2013). O tipo de aglomerante exerce influência na durabilidade das estruturas de concreto armado e a sua composição química é um aspecto de extrema relevância. Alguns de seus constituintes, tais como, o aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A) e o

ferroaluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ), presentes no clínquer, são importantes, pois formam os cloroaluminatos ao reagirem com os íons cloreto. Estes são responsáveis por reduzir a concentração de íons cloreto livres na solução aquosa dos poros de concreto. Deste modo, a formação dos cloroaluminatos representa a fixação de cloretos e leva, portanto, à diminuição da velocidade de transporte dos íons na matriz cimentícia, sendo estes constituintes bastante relevantes na preservação da durabilidade das estruturas expostas à ação dos íons cloreto (MEIRA, 2017). Tal fenômeno ocorre com a reação dos íons cloreto com o aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) que conduz ao surgimento de um sal complexo insolúvel, denominado por cloroaluminato de cálcio hidratado (Sal de Friedel). Assim, quanto maior o teor de  $C_3A$  do cimento, maior será a quantidade de íons cloreto fixos, o que os mantém indisponíveis para o fenômeno de despassivação do aço (BARONGHEL-BOUNY *et al.*, 2014).

### **2.7.1 Cimento Portland e adições minerais**

O cimento Portland é uma mistura de clínquer e uma pequena quantidade de sulfato de cálcio. O clínquer é produzido a partir da calcinação a 1450 °C de uma mistura finamente moída e homogeneizada de calcário e argila para formar, em maior parte, silicatos de cálcio, e em menor proporção, aluminatos e ferroaluminato tetracálcico (NONAT, 2014). Este processo é chamado de clinquerização sendo a etapa mais importante do processo de fabricação do cimento.

Devido à alta emissão de  $CO_2$  para a atmosfera, o alto consumo de energia, despendidos no processo de clinquerização, os cimentos compostos se tornaram uma alternativa atrativa para que as indústrias pudessem limitar a quantidade de clínquer no cimento e reduzir tais problemas. Para tal, uma parte do clínquer é então substituída por compostos minerais mais ou menos reativos, como fíler calcário, adições pozolânicas (sílica ativa, cinzas volantes, xistos calcinados) e adições consideradas potencialmente hidráulicas como a escória de alto forno. Deste modo, diferentes tipos de cimento são obtidos e podem ser identificados baseando-se na natureza e na proporção da adição (NONAT, 2014).

Em um passado recente, estes compostos minerais e adições existiam em depósitos naturais e necessitavam de pouco ou nenhum tratamento, outras vezes eram subprodutos de rejeitos de processos industriais, tais como o caso da escória de alto forno, cinzas volantes ou sílica ativa,

tornando estes materiais suplementares bastante acessíveis. Outras razões que impulsionaram os estudos relacionados com a utilização destes materiais suplementares como substitutos foi a necessidade de redução das extrações de recursos naturais para a obtenção de matéria-prima para a produção do clínquer. A utilização de subprodutos também proporcionou uma destinação adequada a estes rejeitos sem a necessidade de deposição no meio ambiente. Contudo, o aspecto de maior relevância identificado por inúmeras pesquisas desenvolvidas é que a utilização de escórias de alto forno não somente contribui para reduzir os impactos ambientais relatados, mas também, por razões técnicas na modificação das propriedades específicas dos concretos, proporciona um aumento da durabilidade (TESSARI, 2001).

De acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018) o cimento Portland de alto forno (CP III) pode ter classe de resistência de 25, 32 ou 40 e pode ser resistente a sulfatos, ou de baixo calor de hidratação quando sua nomenclatura acompanhar o sufixo RS ou BC, respectivamente. A norma determina os limites de sua composição em 25% a 65% em massa de clínquer e sulfatos de cálcio. A presença da escória granulada de alto forno deverá estar compreendida entre 35% e 75% em massa e o limite de presença de materiais carbonáticos é de 10% em massa.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014) a escória de alto forno é um subproduto da extração do ferro a partir de óxidos de minérios. Trata-se de um material não-cristalino formado por meio do resfriamento pela imersão em água da escória de alto forno fundida. Sabe-se que a escória granulada de alto forno é composta por teores de óxido de cálcio (CaO) (até 50%), dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>) (até 40%), óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (até 19%), óxido ferroso (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (até 2,5%), óxido de magnésio (MgO) (até 21%) e traços de óxido de manganês (MnO), enxofre (S) e trióxido de enxofre (SO<sub>3</sub>) (ÖZBAY *et al.*, 2015). Este material quando associado ao cimento Portland, forma um aglomerante caracterizado por:

a) reagir lentamente, as taxas de liberação de calor e o desenvolvimento da resistência também são afetados, em idades avançadas a resistência pode superar a de concretos produzidos com cimento Portland puro;

b) a escória granulada de alto forno presente no sistema gera menos hidróxido de cálcio no processo de hidratação que o clínquer, o que representa um importante papel na durabilidade

da pasta hidratada frente a ambientes cloretados, ácidos ou sulfatados (SISOMPHON *et al.*, 2010);

c) a resistência e a impermeabilidade do sistema são melhoradas já que os produtos das reações químicas ocasionadas com a presença da escória granulada de alto forno em conjunto com o cimento Portland são muito eficientes em preencher espaços capilares provocando um refinamento da microestrutura.

### 2.7.2 Cimento Portland de alto forno frente ao ingresso de íons cloreto

Para uma avaliação adequada da resistência do concreto ao ingresso de íons cloreto, alguns fatores devem ser considerados. Geralmente, a classe de resistência elevada e a relação água/cimento do concreto são os fatores de controle mais importantes, sendo que relações água/cimento em proporções superiores a 0,40 aumentaria nitidamente a porosidade do concreto produzido (FIGURA 2.12) (GJØRV, 2014).

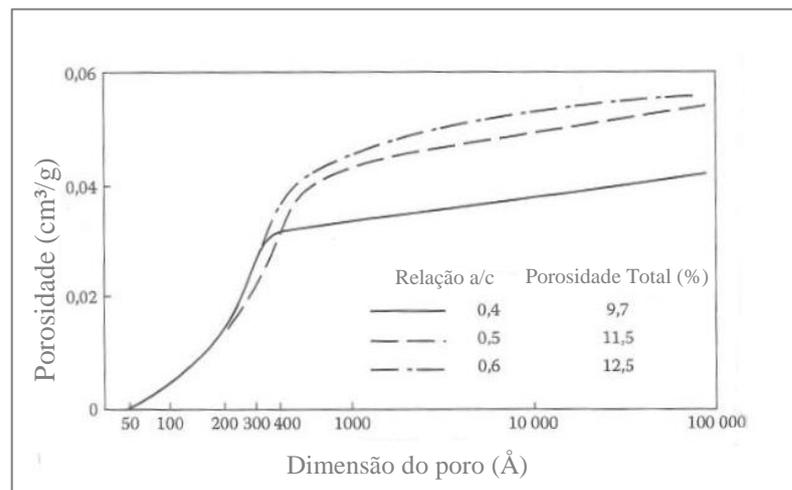


Figura 2.12 - Efeito da relação a/c na porosidade do concreto baseado em cimento Portland puro

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

Baronghel-Bouny *et al.* (2014) concordam com tal afirmação, declarando que em relação ao período de iniciação da corrosão, a qualidade do concreto, considerando os fatores anteriormente descritos e as condições de exposição cuja estrutura está submetida, tem uma influência maior do que a escolha do tipo de cimento utilizado em sua produção. Contudo,

está bem documentado na literatura que a seleção de um aglomerante adequado pode ser ainda mais relevante do que selecionar uma baixa relação água/cimento. Assim, quando esta for reduzida de 0,50 para 0,40, em um concreto produzido com cimento Portland, a difusividade de íons cloreto será reduzida, enquanto a incorporação de vários tipos de adições minerais, como a escória granulada de alto forno, na mesma relação água/cimento reduzirá ainda mais a difusividade dos íons cloreto (GJØRV e VENNESLAND, 1979 *apud* GJØRV, 2014).

Na Figura 2.13 pode ser observado que a resistência ao ingresso de íons cloreto de quatro tipos diferentes de aglomerantes comerciais produzidos na Noruega com a mesma relação água/cimento, 0,45.

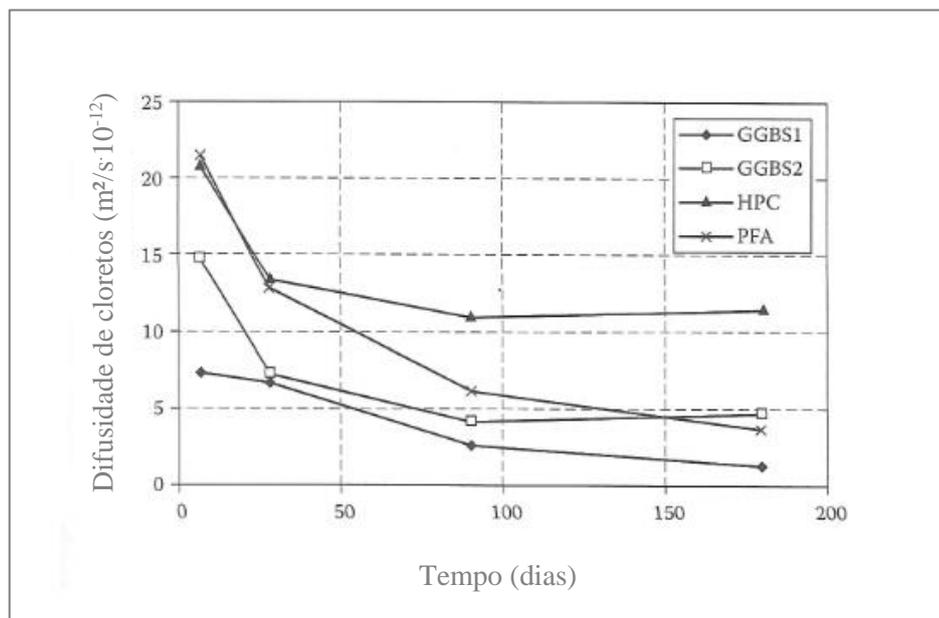


Figura 2.13 - Efeito do tipo de cimento na resistência ao ingresso de íons cloreto baseado em uma relação a/c de 0,45

Fonte: Adaptado de ÅRSKOG *et al.*, 2007 *apud* GJØRV, 2014.

Os cimentos testados incluem um tipo com cimento Portland puro (HPC), dois tipos com substituição do cimento Portland por escória granulada de alto forno, o primeiro com 34% de substituição (GGBS1) e o segundo com 70% de substituição (GGBS2) e um tipo com substituição do cimento Portland por cinza volante em um teor de 18% (PFA). A resistência ao ingresso de íons cloreto foi determinada baseando-se no ensaio acelerado de migração em estado não estacionário prescrito pela NT BUILD 492 (NORDTEST, 1999) em amostras de concreto em cura de diferentes idades, sendo a idade máxima igual a 180 dias. Foi observado

que os dois cimentos com adição de escória granulada de alto forno proporcionaram uma resistência nitidamente maior ao ingresso de íons cloreto quando comparado ao cimento de cinza volante, e uma resistência substancialmente maior do que o cimento Portland sem adição. Os dois tipos de cimento composto por escória granulada de alto forno mostraram uma resistência à penetração de íons cloreto muito alta em idades precoces em relação aos outros tipos de cimento (ÅRSKOG *et al.*, 2007 *apud* GJØRV, 2014).

Com a hidratação do cimento Portland, cristais de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), são produzidos concomitantemente ao silicato de cálcio hidratado (C-S-H), um gel amorfo que se comporta como um composto cimentício estável. A portlandita é parcialmente solúvel, deste modo os concretos produzidos com cimento com adições, como, por exemplo, as cinzas volantes ou a escória granulada de alto forno apresentam um melhor desempenho durável quando comparado ao concreto produzido com cimento Portland sem adições, já que estas reagem com a portlandita e formam C-S-H secundário, este, menos solúvel do que o ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) original que após estas reações passa a estar presente na pasta de cimento hidratada em menor quantidade. Assim, há redução da possibilidade de lixiviação deste composto do concreto. Deste modo, os íons cloretos se fixam nas estruturas hidratadas de C-S-H, resultando em menor quantidade de íons cloreto disponíveis para iniciar processos corrosivos. Além disso, os produtos de reação tendem a preencher os vazios capilares na mistura do concreto, reduzindo assim a sua permeabilidade (AHMARUZZAMAN, 2010).

Observa-se, deste modo, que os coeficientes de migração de íons cloreto em concretos produzidos com cimentos Portland com incorporação de adições minerais são reduzidos quando comparados aos coeficientes obtidos em concretos produzidos com cimento Portland sem adições, como pôde ser analisado no gráfico que pode ser observado na Figura 2.13.

Na Figura 2.14 observam-se os resultados de um estudo desenvolvido por Sengul e Gjorv (2014) sendo utilizado cimento Portland parcialmente substituído por 40%, 60% e 80% de escória de alto forno. Neste estudo, foram produzidos concretos com relação a/c de 0,40, em seguida, foram mantidos em cura submersa na temperatura de 20°C em um período de até 365 dias. A resistência ao ingresso de íons cloreto foi também testada com base no ensaio acelerado de migração em estado não estacionário prescrito pela NT BUILD 492 (NORDTEST, 1999). Após 28 dias, foi observado que as quantidades de adição de escória de

alto forno reduziram sucessivamente a difusividade dos íons cloreto de 11,2 para 4,9, 3,6 e 2,3  $\times 10^{-12}$   $\text{m}^2/\text{s}$ , respectivamente, enquanto que, após um ano, a difusividade dos concretos contendo escória de alto forno como adição mineral variaram de 3,0 a 1,2  $\times 10^{-12}$   $\text{m}^2/\text{s}$  comparado com 7,0  $\times 10^{-12}$   $\text{m}^2/\text{s}$  para os concretos de cimento Portland. Esses resultados reforçam como a adição de escória de alto forno pode contribuir positivamente como barreira frente ao ingresso de íons cloreto em concretos produzidos baseando-se nesta adição (SENGUL e GJØRV *et al.*, 2007 *apud* GJØRV, 2014).

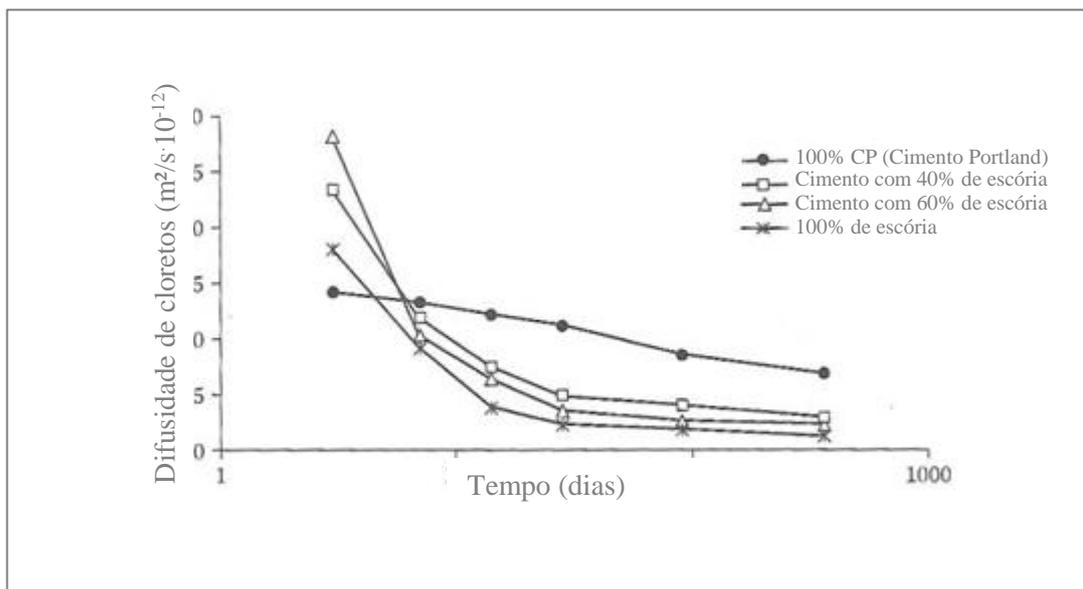


Figura 2.14 - Efeito da adição de escória de alto forno na resistência ao ingresso de íons cloreto  
 Fonte: Adaptado de SENGUL e GJØRV *et al.*, 2007 *apud* GJØRV, 2014.

## 2.8 Normas que avaliam a resistência de compósitos cimentícios à penetração de cloretos

Tendo em vista o impacto que as estruturas de concreto armado estão sujeitas quando expostas à ambientes com a presença de íons cloreto, diversos órgãos regulamentadores abordam o assunto e fixam requisitos de projeto e de verificação. Deste modo, este item destina-se na apresentação dos principais métodos de previsão da penetração de íons cloreto em estruturas de concreto armado. Inicialmente são abordadas as normas relacionadas aos ensaios de longa duração, sendo estas, a norma americana T259 (AASHTO, 2017) e a NT BUILD 443 (NORDTEST, 1995). Em seguida, serão tratados alguns dos métodos de ensaios acelerados por campo elétrico externo, NT BUILD 492 (NORDTEST, 1999), C 1202 (ASTM, 2019), T 277-83 (AASHTO, 2015) e C 1556 (ASTM, 2016).

### **2.8.1 AASHTO T 259**

O método de ensaio previsto pela T 259 (AASHTO, 2017) é de regime não estacionário e propõe a determinação da resistência de amostras de concreto à penetração de íons cloreto. Este método evidencia a influência das variações nas propriedades dos concretos alcançadas por meio da composição destes, sob a penetração dos íons, não sendo especificado para fornecer uma medida quantitativa do tempo de serviço que pode ser esperado de um tipo específico de estrutura de concreto armado.

O procedimento de realização deste ensaio prescreve a obtenção de espécimes em forma de placas de 75 mm de espessura e área superficial mínima de 17500 mm<sup>2</sup> que devem ser mantidos em cura úmida por 14 dias e mantidos em ambiente seco até a idade de 28 dias. Imediatamente após esta etapa, as faces laterais das amostras deverão ser impermeabilizadas e a face superior da placa deverá ser mantida em contato com uma solução de 3% de cloreto de sódio (NaCl) por um período de 90 dias, enquanto a face inferior deverá ser mantida em contato com um ambiente com umidade relativa de 50%. Posteriormente, as amostras deverão ser secas e escovadas tornando as superfícies livres do acúmulo de cristais. As concentrações de íons cloreto das amostras deverão ser então determinadas por meio do procedimento determinado pela T 260 (AASHTO, 2016) com a aspensão de nitrato de prata (AgNO<sub>3</sub>) ou por meio de um espectrômetro. A partir da obtenção destes dados, a 2<sup>a</sup> lei de Fick (EQUAÇÃO 2.11) é aplicada e o coeficiente de difusão de cloretos é então determinado.

### **2.8.2 NT BUILD 443**

A NT BUILD 443 (NORDTEST, 1995) prescreve um método para estimativa da profundidade de penetração de íons cloreto em concreto endurecido ou outros materiais cimentícios baseado na 2<sup>a</sup> Lei de Fick (EQUAÇÃO 2.11). A resistência à penetração de íons cloretos é determinada por testes acelerados. O método proposto é aplicável tanto para amostras coletadas em campo como para amostras produzidas em laboratório mantidas em cura com idade mínima de 28 dias. Para a execução do ensaio são necessárias ao menos três amostras mantidas em condição saturada visando prevenir qualquer absorção inicial. Como preparo, somente uma das faces da amostra não é impermeabilizada, sendo esta,

posteriormente submetida à uma solução de cloreto de sódio por um período que varia entre 35 e 120 dias, de acordo com a qualidade do concreto amostrado. Para a apuração do coeficiente efetivo de difusão aparente de cloretos no concreto, decorrido o período de exposição, as amostras são separadas em camadas finas, paralelas à superfície exposta, e o teor de cloretos correspondente a cada uma delas é então determinado por meio de uma correlação entre os valores de profundidade de penetração medidos abaixo da superfície exposta, na condição inicial.

### 2.8.3 NT BUILD 492

Este procedimento é prescrito pela norma Finlandesa NT BUILD 492 (NORDTEST, 1999) e destina-se à determinação, em regime não estacionário, do coeficiente de migração de íons cloreto em concretos, argamassas ou materiais de reparo baseados em cimento Portland. O coeficiente de migração de cloretos determinado pelo método trata-se de uma medida da resistência do material testado à penetração de íons cloretos. O coeficiente de migração não estacionário obtido não deve ser comparado diretamente com os coeficientes de difusão de cloretos obtidos por meio de outros métodos de teste, tais como o teste de imersão em estado estacionário ou o teste de migração em estado estacionário. Na Tabela 2.3 pode ser observada uma referência para a classificação dos coeficientes de difusão de íons cloreto proposta por Nilson *et al.* (1998) *apud* Gjörv (2014), para mensurar a qualidade do concreto submetido a este procedimento. Estes resultados de referência foram obtidos por meio da realização de ensaios em concretos produzidos com diferentes tipos de cimento, na idade de 28 dias.

Tabela 2.3 - Valores de referência para classificar os concretos submetidos ao ensaio prescrito pela NT BUILD 492

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

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

Para a execução do procedimento, as amostras deverão ser moldadas conforme normatizações vigentes relacionadas a esta etapa e mantidas em cura até a idade prevista para a realização do ensaio. O método requer amostras cilíndricas com um diâmetro de 100 mm e uma espessura de 50 mm, obtidas por meio de corte dos corpos de prova inicialmente moldados. Ao menos três amostras devem ser usadas no teste. Depois de serrar, escovar e lavar as rebarbas das superfícies da amostra e limpar o excesso de água das superfícies, estas deverão ser submetidas à pré-condicionamento a vácuo. Finalizado o pré-condicionamento as amostras deverão ser lavadas, jateadas com o auxílio de ar comprimido para desobstrução dos poros, e fixadas por meio de abraçadeiras metálicas em camisas de silicone.

Assim, para a realização do ensaio, as amostras deverão ser mantidas em contato com uma solução catolítica de 10% de NaCl em uma das superfícies. A outra superfície deverá ser mantida em contato com uma solução anolítica de 0,3 N de hidróxido de sódio (NaOH). Um potencial elétrico externo é aplicado axialmente através da amostra induzindo a migração dos íons cloreto para o interior desta. Após certa duração do ensaio, a amostra é dividida axialmente e uma solução de  $\text{AgNO}_3$  é pulverizada em uma das seções recentemente divididas para que a profundidade de penetração de íons cloreto possa então ser mensurada. Os coeficientes de migração podem ser calculados a partir desta profundidade por meio de fórmula empírica baseada na 2ª Lei de Fick (EQUAÇÃO 2.11).

Em razão da simplicidade, base teórica clara, metodologia que conduz à resultados precisos, curta duração e por ser sugerido na literatura como o método mais adequado dentre os ensaios que avaliam a penetrabilidade de íons cloreto, o procedimento prescrito pela NT BUILD 492 (NORDTEST, 1999) foi então escolhido nas avaliações das resistências à penetração de íons cloreto nos concretos produzidos na presente pesquisa. Este procedimento está melhor detalhado na seção 3.3.6 deste trabalho.

#### **2.8.4 ASTM C 1556**

O método prescrito pela C 1556 (ASTM, 2016) permite a determinação do coeficiente de difusão aparente de uma matriz cimentícia endurecida. Para a realização do ensaio é necessário obter duas amostras representativas da matriz cimentícia endurecida, uma para ser utilizada como referência ao final do ensaio e outra para ser submetida à exposição aos íons

cloreto. Assim, uma das amostras deverá ser saturada e exposta em uma solução de hidróxido de cálcio, em seguida a amostra deverá ser lavada com água da torneira e exposta à uma solução de cloreto de sódio. Após um tempo de exposição especificado, a amostra de teste é removida da solução de cloreto de sódio e as camadas finas são retificadas paralelamente à face exposta da amostra. O coeficiente de difusão é então obtido por meio da determinação da profundidade de penetração e do teor de íons cloreto em diferentes camadas da amostra, por meio da correlação do teor inicial obtido na amostra de referência, no início do ensaio.

### **2.8.5 AASHTO T 277 e ASTM C 1202**

O método de ensaio previsto na T 277-15 (AASHTO, 2015) é o método predecessor ao método proposto pela norma C 1202 (ASTM, 2019) ambos abrangem a determinação da condutância elétrica do concreto para fornecer uma indicação rápida de sua resistência à penetração de íons cloreto. É adequado para avaliação de materiais e proporções de materiais para execução de concretos e desenvolvimento de pesquisas.

O método proposto nas referidas normas consiste no monitoramento da corrente elétrica que passa através de amostras de 50 mm de espessura e diâmetro nominal de 100 mm por um período de seis horas. Uma voltagem elétrica de 60 V deverá ser aplicada entre as faces das amostras, uma das quais é imersa em uma solução de NaCl e a outra em uma solução de NaOH. O método proposto na T 277-15 (AASHTO, 2015) foi desenvolvido inicialmente para a avaliação de materiais alternativos. Contudo, na prática, seu uso evoluiu para aplicações como controle de qualidade e testes de aceitação. Fatores como as diferenças entre traços das misturas de concreto, o método e a duração da cura afetam os resultados deste teste.

De acordo com Magalhães (2019) estes ensaios promovem um aquecimento das soluções e das amostras com a elevação da temperatura no sistema ocasionada devido à alta voltagem aplicada. Este aquecimento, por efeito Joule, modifica a velocidade com que o fluxo dos íons atravessa a amostra, assim como não se distingue o fluxo de cloretos das demais reações que ocorrem simultaneamente. Deste modo, devido à falta de confiabilidade dos resultados obtidos, este método vem sendo cada vez menos utilizado pela comunidade científica.

# 3

## MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e métodos utilizados nesta pesquisa serão descritos e apresentados neste capítulo. Serão abordados os parâmetros e procedimentos adotados, as caracterizações físico-química dos materiais, as variáveis analisadas, bem como o detalhamento de todos os métodos executados para que o objetivo geral da pesquisa e os objetivos específicos fossem alcançados.

### 3.1 Materiais

Os concretos foram produzidos com a utilização de cimento Portland, escória granulada de alto forno, areia de rio lavada de granulação média e RCFL como agregados miúdos, pedra britada tipo 1 (agregado graúdo), aditivo superplastificante e água potável.

#### 3.1.1 Aglomerante

O cimento Portland (CPV ARI) utilizado nesta pesquisa foi fornecido pela unidade localizada no município de Pedro Leopoldo, Minas Gerais, do Grupo LafargeHolcim. A escória granulada de alto forno foi concedida pela unidade do Grupo Votorantim localizada no município de Cantagalo, Rio de Janeiro. Tais materiais foram embalados à vácuo em sacos plásticos apropriados e acondicionados afastados de alvenarias e em estruturas suspensas do piso, visando à minimização do contato com o ambiente externo a fim de evitar qualquer tipo de hidratação precoce.

A escória granulada de alto forno foi utilizada substituindo o cimento Portland (CPV ARI) parcialmente em teores de 0% e 60% em massa no momento das moldagens, de modo a possibilitar a avaliação da influência desta no comportamento mecânico e de durabilidade dos

concretos produzidos com, e sem a utilização de agregados miúdos reciclados de RCFL. Na Tabela 3.1 observa-se a nomenclatura adotada para identificar os cimentos Portland utilizados neste estudo de acordo com o teor de substituição.

Tabela 3.1 - Nomenclaturas adotadas para os cimentos Portland

<b>Nomenclatura do cimento</b>	<b>Teor de escória de Alto forno (% em massa)</b>
CP00	0
CP60	60

As propriedades químicas dos cimentos Portland CP00 e CP60 e da escória granulada de alto forno estão apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Propriedades químicas dos cimentos Portland utilizados e da escória de alto forno

<b>Propriedade</b>	<b>Norma utilizada</b>	<b>CP00 (%)</b>	<b>CP60 (%)</b>	<b>Escória</b>
Óxido de cálcio (CaO)		64,58	49,63	40,13
Dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> )		18,14	28,74	34,85
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		4,90	9,23	10,81
Anídrico Sulfúrico (SO <sub>3</sub> )		2,53	1,85	3,20
Óxido de magnésio (MgO)	NBR 14656	0,73	5,95	7,81
Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		2,99	1,33	0,65
Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)		0,78	0,54	0,50
Óxido de manganês		-	0,46	0,82
Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)		-	0,21	0,06
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	NBR NM 20	4,87	-	-
C <sub>3</sub> A (Teórico)	Equação Bogue	7,57	-	-
Perda ao fogo 1000°C	NBR NM 18	5,63	-	-
Perda ao fogo 950°C		-	0,94	-1,75
Perda ao fogo 500°C	IT HOLCIM	0,58	-	-
Resíduo insolúvel	NBR NM 15	0,95	-	-

Fonte: Relatório de ensaios fornecido pela assessoria técnica da LafargeHolcim (17/05/2019 a 18/11/2019).

O aspecto da escória granulada de alto forno moída e do cimento Portland (CPV ARI) utilizados nesta pesquisa podem ser observados por meio da Figura 3.1.



Figura 3.1 - Aspecto dos materiais empregados como aglomerante  
 a) escória granulada de alto forno  
 b) cimento Portland (CPV ARI)

A Tabela 3.3 apresenta as propriedades físicas dos cimentos Portland CP00 e CP60 e da escória granulada de alto forno.

Tabela 3.3 - Propriedades físicas dos cimentos Portland utilizados e da escória de alto forno

Propriedade	Norma utilizada	Unidade	CP00 (%)	CP60 (%)	Escória	
Finura Blaine	NBR 16372	cm <sup>2</sup> /g	4799	4470	3941	
Resíduo #400	IT Holcim	%	2,6	-	-	
Resíduo #200	NBR 11579	%	≤ 6,0	-	-	
Tempo de início de pega	NBR NM 65	Min	131	210	-	
Tempo de fim de pega		Min	-	270	-	
Resistência à compressão	NBR 7215	1 dia	MPa	27,0	6,3	-
		3 dias	MPa	41,4	19,3	-
		7 dias	MPa	46,2	31,5	-
		28 dias	MPa	51,4	46,0	-

Fonte: Relatório de ensaios fornecido pela assessoria técnica da LafargeHolcim (17/05/2019 a 21/10/2020).

### 3.1.2 Agregados miúdos

O agregado miúdo natural utilizado nos ensaios do presente trabalho foi fornecido pela mineração Montreal localizada na cidade de Betim/MG, já o agregado miúdo reciclado foi

obtido por meio do beneficiamento do RCFL de uma usina de concreto localizada na região metropolitana de Belo Horizonte, na cidade de Santa Luzia.

### 3.1.2.1 Obtenção dos agregados miúdos de RCFL

A usina de concreto que forneceu os agregados miúdos de RCFL para esta pesquisa realiza diariamente o processo de lavagem do pátio e dos caminhões betoneira em serviço. A lavagem dos caminhões ocorre com a utilização de água e tem como objetivo retirar o concreto aderido nas paredes e remover possíveis sobras de concreto retornado.

O material residual é constituído de concretos com resistência característica à compressão entre 15 e 45 MPa, com e sem a presença dos aditivos plastificante Maximent NT 14 e superplastificante Maxifluid 920, fornecidos pela empresa Matchem, aditivo retardador Centripor Retard 225 e incorporador de ar Centripor 411, para argamassas estabilizadas, fornecidos pela empresa MC-Bauchemie e fibra de polipropileno, 12mm, do fabricante Neomutex. A relação a/c dos concretos produzidos é variável, e o *slump* destes está compreendido entre  $8 \pm 2$  a  $16 \pm 2$ , assim como também são produzidos concretos com *slump* de  $22 \pm 3$ . O cimento utilizado na produção usualmente é o CII-E-40 e os traços são compostos com agregado miúdo e graúdo (brita 0, brita 1 e pedrisco) originados da britagem de rochas gnáissicas.

O RCFL obtido no processo de lavagem dos caminhões e sobras de concreto retornado é depositado em um conjunto de caixas de resíduos úmidos para decantação (FIGURA 3.2). O primeiro compartimento do conjunto é a caixa de recepção, toda a mistura de água e resíduo de concreto provenientes da lavagem dos caminhões é aqui descarregada, a água e os resíduos sólidos são separados por decantação e os sólidos são retidos. Os compartimentos posteriores têm a função de separar a água da parte sólida do resíduo de concreto. Rotineiramente, a água residual fica disposta no último compartimento, e é reaproveitada para a lavagem de novos caminhões betoneira, outros elementos e instalações. Os resíduos sólidos provenientes do processo de decantação são destinados à aterros controlados. Para este estudo, o RCFL permaneceu na caixa de recepção do conjunto por aproximadamente quinze dias antes de ser coletado e transportado para a realização do processo de beneficiamento destinado à esta pesquisa (FIGURA 3.3).



Figura 3.2 - Conjunto de caixas de decantação de resíduos úmidos da usina de concreto



Figura 3.3 - Carga, transporte e descarga do RCFL

O RCFL foi transportado para uma mineração anexa à usina de concreto que forneceu o resíduo, onde foi beneficiado por meio de cominuição. Este processo ocorreu por britagem após a secagem ao ar da porção residual coletada na usina de concreto por um período de vinte e um dias. Para tanto, foi utilizado um conjunto de britagem Asteca composto por um britador de mandíbulas com abertura de malha de 1" (25,4 mm) e 7/8" (22,23 mm) e um britador cone com abertura de malha de 1/2" (12,7 mm) e 1/4" (6,35 mm). O RCFL foi introduzido no conjunto de britagem para o processo de cominuição que deu origem aos agregados miúdos reciclados (FIGURA 3.4).



Figura 3.4 - Conjunto de britagem e peneiramento utilizado para o beneficiamento do RCFL

Conforme mencionado, a usina de concreto em questão não realiza o beneficiamento do RCFL, e ao final do processo de decantação, a porção sólida do resíduo é removida e destinada à aterros controlados para o descarte final. O transporte acontece com um intervalo médio de 15 dias, quando o volume de resíduo de concreto atinge um volume suficiente para compensar o transporte. Ressalta-se que não foi realizada uma estimativa do volume de resíduo gerado na usina de concreto, visto que o mesmo varia em função da quantidade de concreto produzido, o que demandaria um acompanhamento a longo-prazo da operação da usina, não sendo este, o objetivo desta pesquisa.

### 3.1.2.2 Caracterização química dos agregados miúdos de RCFL

Com o intuito de realizar a caracterização química dos agregados miúdos de RCFL utilizados nesta pesquisa amostras deste material foram submetidas aos ensaios de Fluorescência de raios-X e de Difração de raios-X.

#### a) Caracterização química por Fluorescência de raios-X

Os agregados miúdos reciclados obtidos por meio do beneficiamento de RCFL foram submetidos a análise química por meio de Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX) com a finalidade de identificar os elementos presentes, bem como de estabelecer as suas proporções. Para tanto, procedeu-se o quarteamento do material e uma amostragem foi selecionada e moída com o auxílio de Moinho de Almofariz/Pistilo Motorizado da marca Marconi e em pistilo de ágata até que 100% fosse passante na peneira #200 (abertura 75  $\mu\text{m}$ ). A amostra foi então preparada em pastilhas fundidas (pérolas) e submetida à análise por meio de Espectrometria de Fluorescência de raios-X, realizadas em Espectrômetro da PANalytical, modelo Zetium, com um tubo de raios-X com potência de 3kW. Na Tabela 3.4 pode-se observar as propriedades químicas do agregado miúdo de RCFL obtidas.

Tabela 3.4 - Propriedades químicas do agregado miúdo de RCFL

Composição química/Perda ao Fogo	Norma utilizada	RCFL (%)
Óxido de cálcio (CaO)		9,49
Dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> )		61,70
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		13,14
Anidrido Sulfúrico (SO <sub>3</sub> )	NBR	0,38
Óxido de magnésio (MgO)	14656	0,96
Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		2,47
Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)		2,03
Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)		3,65
Perda ao fogo 950°C	NBR NM 18	6,24

Fonte: Relatório de ensaios fornecido pela assessoria técnica da LafargeHolcim (19/06/2020).

Por meio dos resultados obtidos no ensaio de Fluorescência de raios-X constatou-se que a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) é o principal óxido constituinte dos agregados miúdos de RCFL utilizados neste estudo, com teor de 61,70%. A alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e o óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) são outros óxidos representativos, com teores de 13,14% e 9,49%, respectivamente.

### b) Caracterização química por Difração de raios-X

Com o intuito de se obter uma classificação qualitativa das fases mineralógicas presentes no agregado miúdo de RCFL foi realizado o ensaio de Difração de raios-X para amostras em pó (DRX), em um equipamento da marca Bruker, modelo D8 Advance, utilizando radiação  $\text{CuK}\alpha$ . Os padrões utilizados na Difração de raios-X foram coletados na faixa de  $2\theta$  entre  $5^\circ$  e  $90^\circ$ , utilizando-se uma velocidade de varredura de  $0,6^\circ \text{ s}^{-1}$ . O método de análise é baseado na comparação dos valores das distâncias interplanares e das intensidades dos picos nos difratogramas das amostras analisadas e uma amostra de referência, utilizando o padrão do banco de dados PDF-2 do ICDD - International Center for Diffraction Data. O difratograma obtido pode ser observado por meio da Figura 3.5.

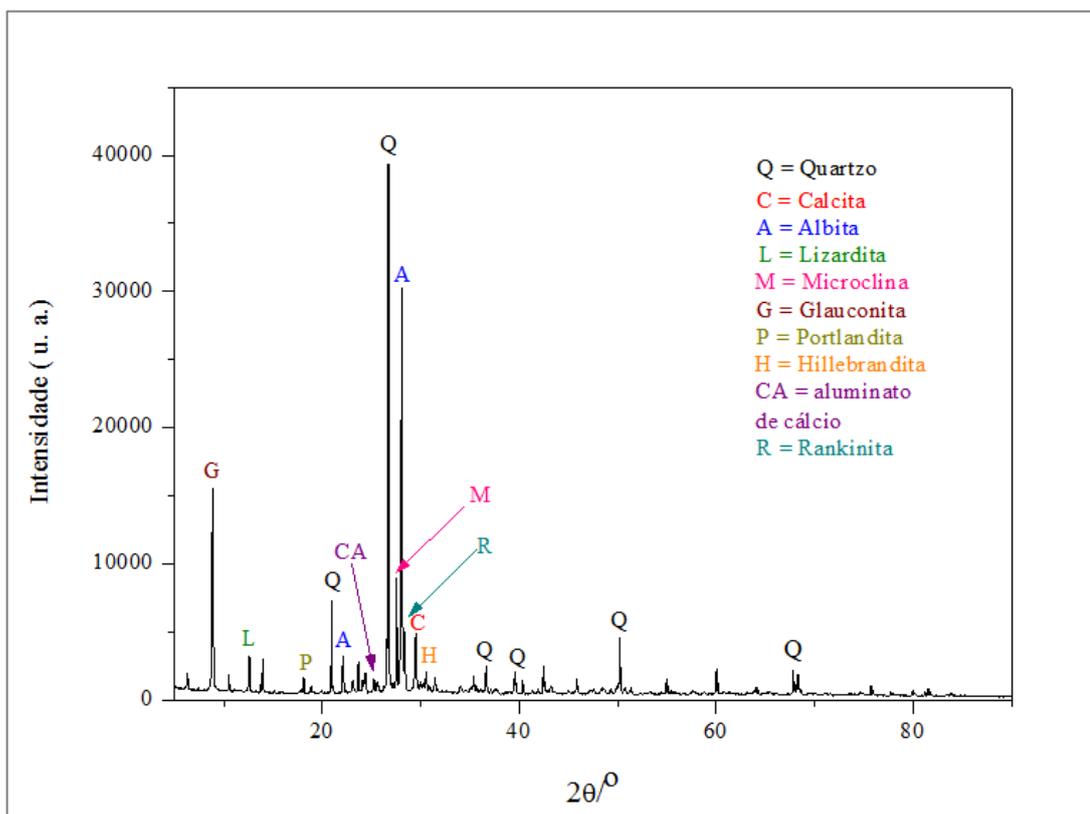


Figura 3.5 - Caracterização química do agregado miúdo reciclado realizada por meio de DRX

O difratograma obtido por meio da amostra de agregado miúdo de RCFL permitiu a identificação de fases cristalinas de Quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) (número ICDD: 4610-45), Calcita  $\text{Ca}(\text{CO}_3)$  (número ICDD: 81-2027), Albita  $((\text{Na}, \text{Ca}) \text{Al}(\text{Si}, \text{Al})_3\text{O}_8)$  (número ICDD: 41-1480), Lizardita  $((\text{Mg}, \text{Al})_3(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_5(\text{OH})_4)$  (número ICDD: 12-583), Microclina  $(\text{KAlSi}_3\text{O}_8)$  (número ICDD: 72-1114), Glauconita  $((\text{K}, \text{Na}) (\text{Fe}^{+3}, \text{Al}, \text{Mg})_2 (\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2)$  (número ICDD: 2-466), Portlandita  $(\text{CaO} \cdot \text{H}_2\text{O})$  (número ICDD: 2-969), Hillebrandita  $(\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O})$  (número ICDD: 2-731), Aluminato de cálcio  $(\text{Ca}_3\text{Al}_{10}\text{O}_{18})$  (número ICDD: 2-392) e Rankinita  $(\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7)$  (número ICDD: 9-327).

Assim como o averiguado por meio da literatura consultada em relação à composição química dos agregados miúdos de RCFL (AUDO *et al.*, 2018; SCHOON *et al.*, 2015; CORREIA *et al.*, 2009), observou-se que as fases identificadas no ensaio de Difração de raios-X eram provenientes dos agregados utilizados para a produção do concreto original, pasta de cimento residual e cimento anidro.

No estudo desenvolvido por Correia *et al.* (2009) foi constatado que os agregados miúdos de RCFL são basicamente compostos de agregados do concreto original e pasta de cimento residual. Audo *et al.* (2018) concluíram que as amostras de RCFL ensaiadas eram materiais ricos em cimento e pobres em areia, e apresentavam elevados teores de clínquer e de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) em sua composição. Já o estudo desenvolvido por Schoon *et al.* (2015), indicou que a composição do RCFL é de partículas finas das diferentes matérias-primas utilizadas na produção do concreto originário do resíduo, sendo elas, no caso de seu estudo, cimento, areia, agregados e cinza volante.

Os resultados observados por meio do ensaio de Difração de raios-X dos agregados miúdos de RCFL apresentaram, de modo geral, coerência, sendo possível a identificação de fases cristalinas compostas por óxidos identificados no ensaio de Fluorescência de raios-X. Indica-se que a predominância do óxido de silício se deve à presença de quartzo, hillebrandita e rankinita. O teor de óxido de alumínio identificado se relaciona à presença de aluminato de cálcio. O teor de óxido de cálcio identificado relaciona-se à presença de calcita, albita, portlandita, hillebrandita, aluminato de cálcio e rankinita. Ademais, os elevados teores dos óxidos de silício e de alumínio, assim como dos demais óxidos identificados por meio do ensaio de Fluorescência de raios-X também justificam-se pela presença de albita, lizardita, microclina e glauconita.

### 3.1.2.3 Caracterização granulométrica dos agregados miúdos

A distribuição granulométrica dos agregados miúdos naturais e reciclados assim como das composições de agregados com teores de 30% e 50% de substituição, em massa, dos agregados naturais pelos agregados reciclados, foi obtida de acordo com as recomendações da NBR 7211 (ABNT, 2009) para a determinação da composição granulométrica de agregados miúdos para concreto.

Para a caracterização dos agregados miúdos naturais, após o devido quarteamento do material, uma amostra foi selecionada e peneirada, sendo pesada a fração retida em cada peneira.

Na Tabela 3.5 e na Figura 3.6 podem ser observados os resultados obtidos para o agregado miúdo natural, os quais equivalem à média aritmética de duas determinações realizadas para o mesmo material. A dimensão máxima característica é igual a 2,4 mm. O módulo de finura é igual a 2,49.

Tabela 3.5 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo natural

Abertura da peneira (mm)	Material retido (g)	Material retido acumulado (%)
9,5	0	0
6,3	5,32	0
4,8	2,19	0
2,4	13,45	1
1,2	73,9	16
0,6	199,78	45
0,3	311,94	90
0,15	52,26	97
Fundo	20,47	100
Dimensão máxima característica (mm)		2,4
Módulo de Finura (MF)		2,49

Fonte: Relatório de ensaios fornecido pela assessoria técnica da LafargeHolcim 23/05/2019.

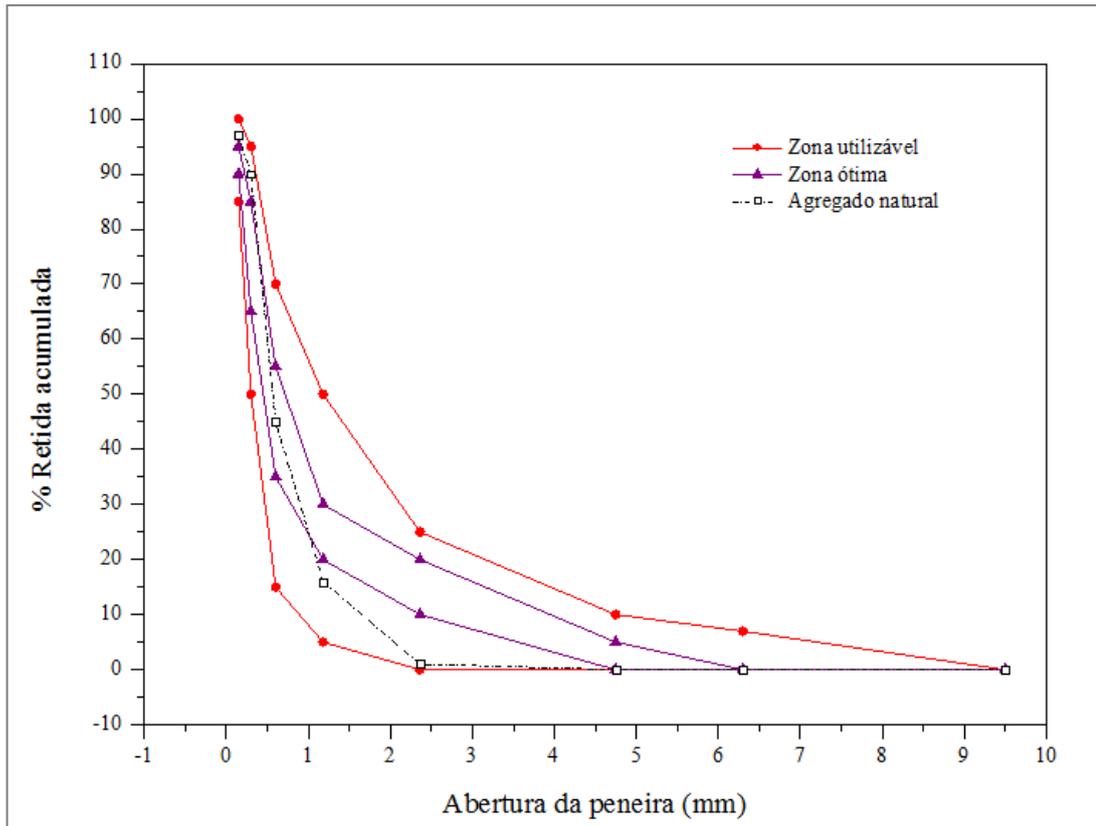


Figura 3.6 - Curva granulométrica do agregado miúdo natural

Fonte: Adaptado de Relatório fornecido pela assessoria técnica da LafargeHolcim de 23/05/2019.

Para a determinação da composição granulométrica dos agregados miúdos de RCFL, após o devido quarteamento do material, uma amostra foi selecionada e peneirada, sendo pesada a fração retida em cada peneira. Na Tabela 3.6 e na Figura 3.7 podem ser observados os resultados obtidos, os quais equivalem à média aritmética de duas determinações realizadas para o mesmo material. A dimensão máxima característica do agregado de RCFL é igual a 9,5 mm. O módulo de finura é igual a 2,56.

Ademais, procedeu-se com a caracterização granulométrica das composições dos agregados miúdos de RCFL. Estas, com a substituição parcial dos agregados miúdos naturais pelos agregados miúdos reciclados nos teores de 30% e 50% em massa. Após o devido quarteamento do material, uma amostra foi selecionada e peneirada, sendo pesada a fração retida em cada peneira. As Tabelas 3.7 e 3.8 apresentam, respectivamente, os resultados obtidos para as composições de 30% e 50%. Tais resultados equivalem à média aritmética de duas determinações realizadas para o mesmo material. A dimensão máxima característica e o módulo de finura, das composições de agregados miúdos de RCFL em teores de 30% e 50% foram, ambas, iguais a 6,3 mm e 2,51.

Tabela 3.6 - Distribuição granulométrica dos agregados miúdos de RCFL

Abertura da peneira (mm)	Material retido (g)	Material retido acumulado (%)
9,5	16,0	2
6,3	29,92	6
4,8	26,44	10
2,4	80,71	22
1,2	89,76	35
0,6	81,41	47
0,3	98,81	61
0,15	80,71	73
Fundo	190,66	100
Dimensão máxima característica (mm)		9,5
Módulo de Finura (MF)		2,50

Fonte: Relatório de ensaios fornecido pela assessoria técnica da LafargeHolcim de 23/05/2019.

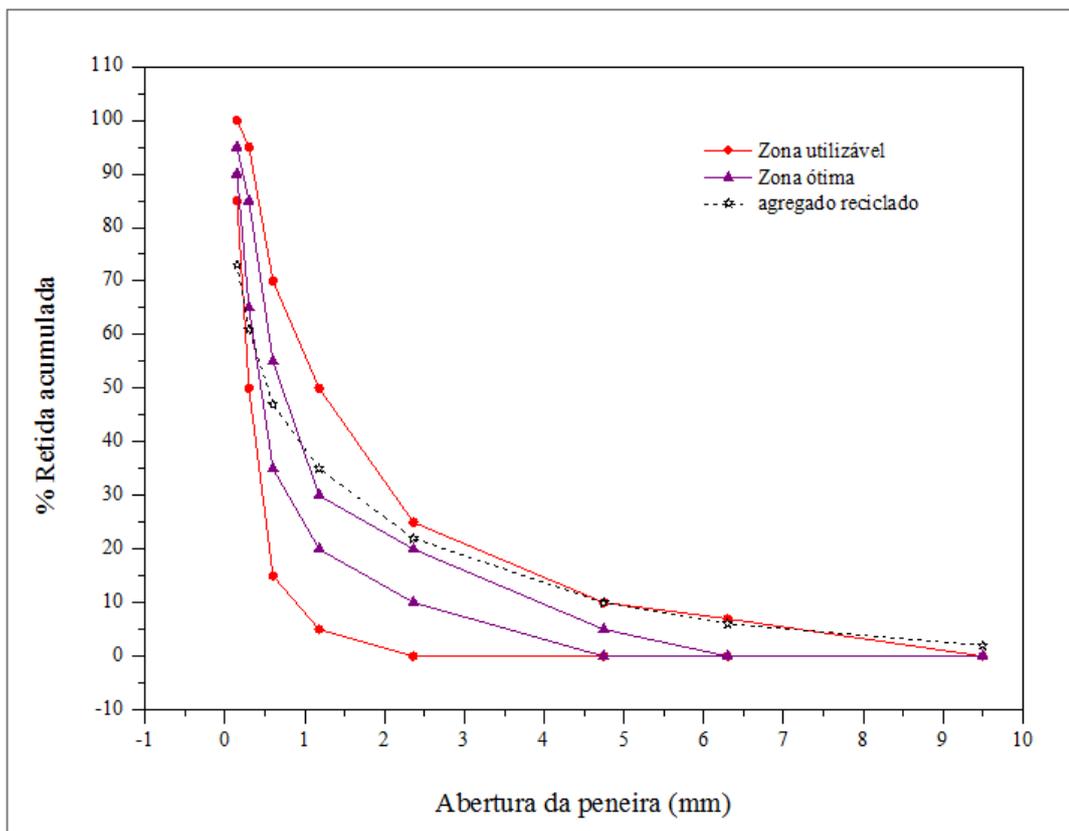


Figura 3.7 - Curva granulométrica dos agregados miúdos de RCFL

Fonte: Adaptado de Relatório fornecido pela assessoria técnica da LafargeHolcim de 23/05/2019.

Tabela 3.7 - Distribuição granulométrica da composição de agregados miúdos com teor de 30% de RCFL

Abertura da peneira (mm)	Material retido (g)	Material retido acumulado (%)
9,5	0	0
6,3	14,54	2
4,8	13,54	4
2,4	47,51	9
1,2	99,31	20
0,6	230,85	45
0,3	330,1	81
0,15	81,99	90
Fundo	91,14	100
Dimensão máxima característica (mm)		4,8
Módulo de Finura (MF)		2,49

Fonte: Relatório de ensaios fornecido pela assessoria técnica da LafargeHolcim de 23/05/2019.

Tabela 3.8 - Distribuição granulométrica da composição de agregados miúdos com teor de 50% de RCFL

Abertura da peneira (mm)	Material retido (g)	Material retido acumulado (%)
9,5	2,79	0
6,3	25,95	3
4,8	14,14	5
2,4	67,32	13
1,2	98,73	24
0,6	191,06	45
0,3	279,95	76
0,15	84,34	85
Fundo	133,93	100
Dimensão máxima característica (mm)		4,8
Módulo de Finura (MF)		2,48

Fonte: Relatório de ensaios fornecido pela assessoria técnica da LafargeHolcim de 23/05/2019.

Na Figura 3.8 pode-se observar a curva granulométrica obtida nos ensaios de caracterização das composições em teores de 30% e 50% de substituição dos agregados miúdos naturais por agregados miúdos de RCFL e os limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009). Observa-se que as curvas granulométricas obtidas para as composições de agregados miúdos nos teores de substituição dos agregados miúdos naturais por agregados miúdos de RCFL mencionados se encontram dentro dos limites utilizáveis estabelecidos por esta norma.

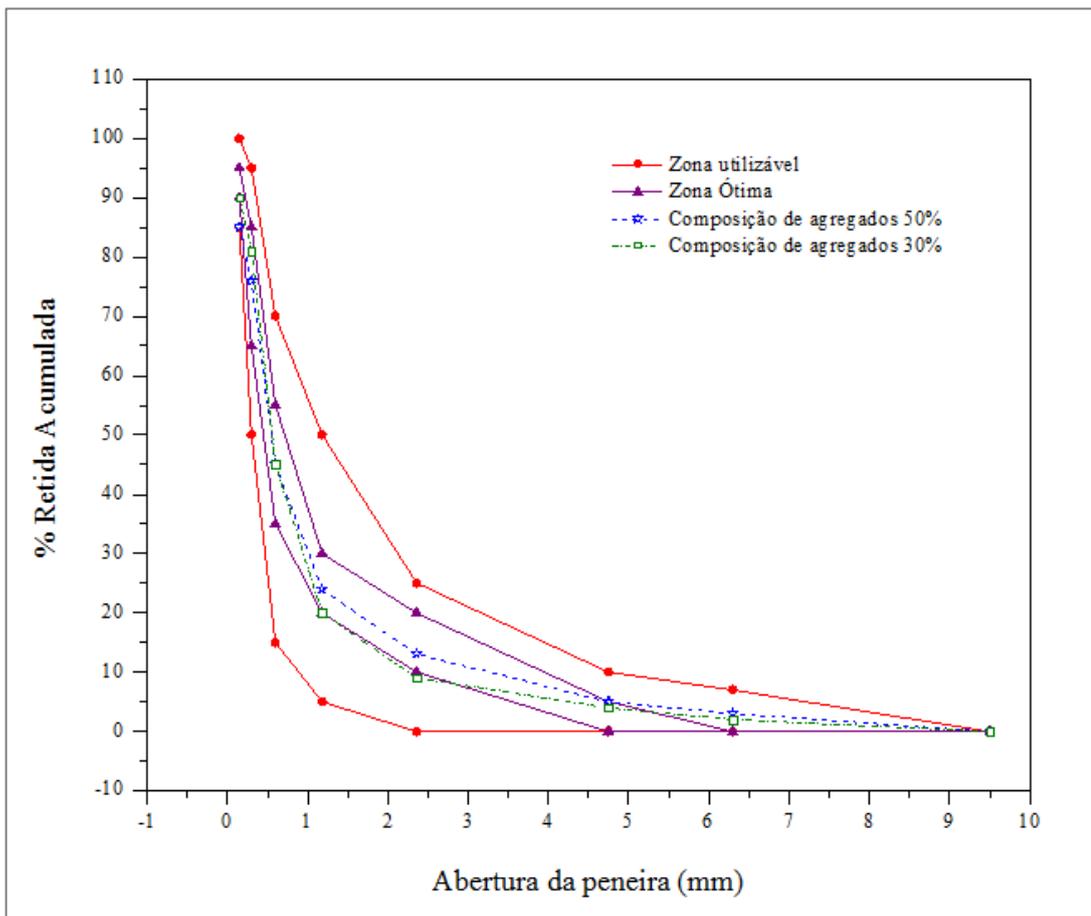


Figura 3.8 - Curva granulométrica das composições de agregados miúdos de RCFL em teores de 30% e 50%

Fonte: Adaptado de Relatório fornecido pela assessoria técnica da LafargeHolcim de 23/05/2019.

#### 3.1.2.4 Caracterização física dos agregados miúdos

Os resultados dos ensaios de caracterização física dos agregados miúdos naturais e dos agregados miúdos de RCFL, bem como das composições com substituição dos agregados miúdos naturais pelos agregados miúdos de RCFL em teores de 30% e 50% podem ser observados na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Características físicas dos agregados miúdos naturais e reciclados

Descrição do Ensaio	Norma	Resultados			
		Agregados naturais	Composição de agregados 30%	Composição de agregados 50%	Agregados de RCFL
Massa específica - g/cm <sup>3</sup>	NBR NM 52 (ABNT, 2009)	2,62	2,61	2,59	2,54
Teor de materiais pulverulentos - %	NBR NM 46 (ABNT, 2003)	1,57	6,56	12,12	23,00
Módulo de finura	NBR 7211	2,49	2,49	2,48	2,50

Fonte: Relatório de ensaios fornecido pela assessoria técnica da LafargeHolcim de 23/05/2019.

Com a caracterização física dos materiais utilizados como agregados miúdos nesta pesquisa observou-se que a massa específica do agregado natural é superior à do agregado de RCFL, indicando que deve ser realizada uma compensação de massa entre os dois materiais para a obtenção de um mesmo volume conforme observado por Abreu (2016).

Tratando-se dos materiais pulverulentos, a NBR 7211 (ABNT, 2009) indica que o teor máximo de material fino que passa através da peneira 75 µm por lavagem não deve ser superior à 12%, quando o agregado analisado for constituído totalmente de grãos gerados durante a britagem da rocha, sendo utilizados em concretos protegidos do desgaste superficial. Ainda segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009), deve-se comprovar, por apreciação petrográfica realizada de acordo com a NBR 7389-1 (ABNT, 2009), que os grãos constituintes acima de 150 µm não geram finos que interferem nas propriedades do concreto, tais como materiais micáceos, ferruginosos e argilominerais expansivos. Segundo Abreu (2016), os agregados reciclados obtidos a partir de resíduos provenientes da lavagem de caminhões betoneira (RCFL), podem ser avaliados segundo os mesmos critérios, devendo apresentar um teor de materiais finos, passantes na peneira 75 µm por lavagem, até o limite de 12%, uma vez que a composição destes não interferirá nas propriedades dos concretos produzidos.

Deve-se atentar para o fato de que apesar de os agregados de RCFL utilizados nesta pesquisa, isoladamente apresentarem um teor de pulverulentos superior ao limite de materiais pulverulentos estabelecido na NBR 7211 (ABNT, 2009), os teores encontrados para as composições estudadas, ficaram dentro dos limites normativos estabelecidos para as situações aqui descritas.

Em relação ao módulo de finura, a NBR 7211 (ABNT, 2009) indica que os valores podem variar de 1,55 a 3,50. Deste modo, observa-se que os materiais estudados atendem os limites estabelecidos por norma. Por fim, na Figura 3.9 observa-se o aspecto dos agregados miúdos naturais, dos agregados miúdos de RCFL, bem como pode ser observado o aspecto das composições com teores de 30% e 50% de substituição de agregados miúdos naturais por agregados miúdos de RCFL.

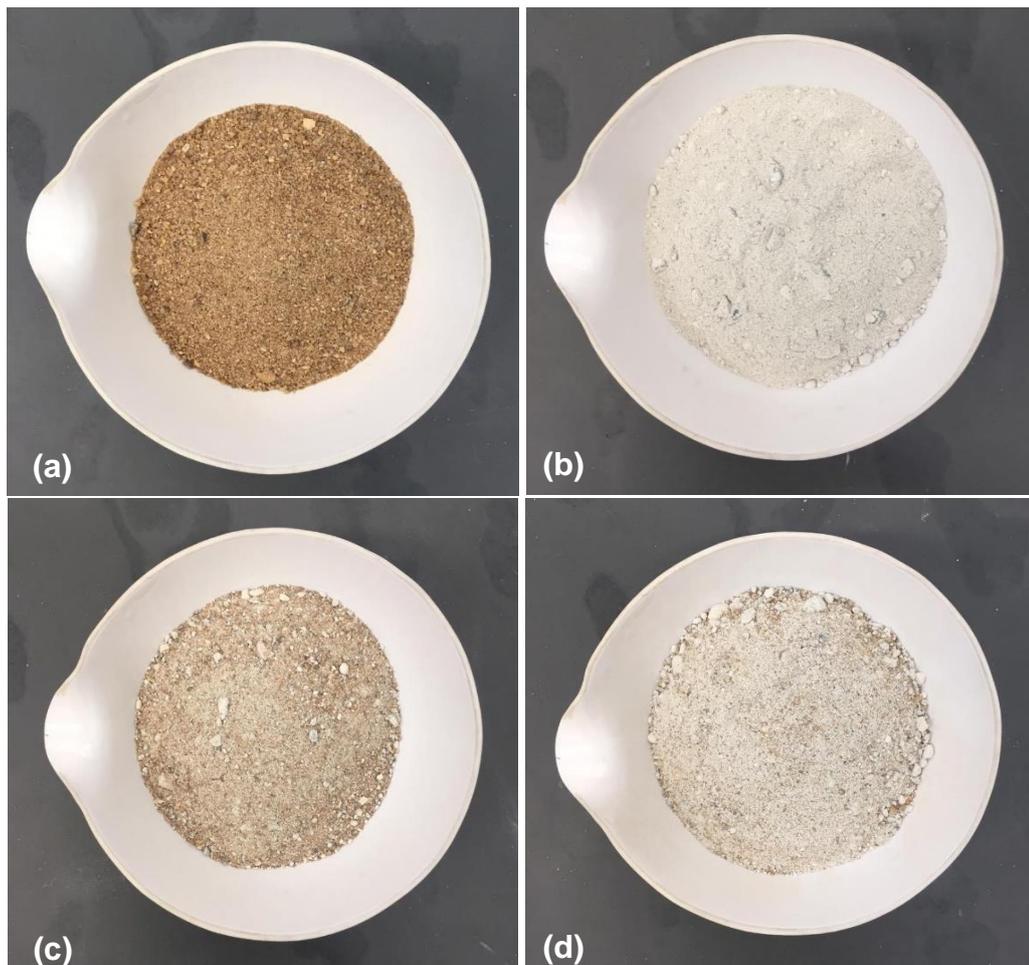


Figura 3.9 - Aspecto dos materiais empregados como agregados miúdos

- a) areia de origem natural lavada de granulação média
- b) agregado miúdo de RCFL
- c) composição de agregados com 30% de RCFL
- d) composição de agregados com 50% de RCFL

### 3.1.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado nesta pesquisa é oriundo de britagem de rocha do tipo gnaisse, cedida pela empresa Martins Lanna. Estes foram armazenados em sacos plásticos apropriados

e acondicionados em caixotes plásticos até a data das moldagens dos corpos de prova de concreto. A Tabela 3.10 apresenta as principais características físicas do material.

Tabela 3.10 - Propriedades físicas do agregado graúdo utilizado

Propriedade – Unidade	Norma Utilizada	Valor obtido
Massa específica do agregado seco - g/cm <sup>3</sup>		2,67
Massa específica do agregado saturado superfície seca - g/cm <sup>3</sup>	NBR NM 53 (ABNT, 2009)	2,64
Massa específica aparente - g/cm <sup>3</sup>		2,64
Absorção de água - %		0,45
Massa Unitária Compactada - g/cm <sup>3</sup>	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1,45
Massa Unitária Solta - g/cm <sup>3</sup>		1,32

Fonte: Relatório de ensaio obtido no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade FUMEC de 27/02/2019.

A análise da distribuição granulométrica do agregado graúdo foi realizada de acordo com o procedimento recomendado pela NBR 7211 (ABNT, 2009) para a determinação da composição granulométrica de agregados para concreto. Após o quarteamento do material, uma amostra foi selecionada e peneirada, sendo pesada a fração retida em cada peneira. Na Tabela 3.11 e na Figura 3.10 observam-se os resultados obtidos, os quais equivalem à média aritmética de duas determinações realizadas para o mesmo material.

Tabela 3.11 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo

Abertura da peneira (mm)	Material retido (g)	Material retido acumulado (%)
19,0	269,50	5
12,5	3303,50	71
9,5	813,00	87
6,3	585,50	99
4,8	1,50	99
2,4	1,00	99
Fundo	22,50	100
d/D		9,5/25
Dimensão máxima característica (mm)		19,0

Fonte: Relatório de ensaio obtido no Laboratório de Materiais da FUMEC de 27/02/2019.

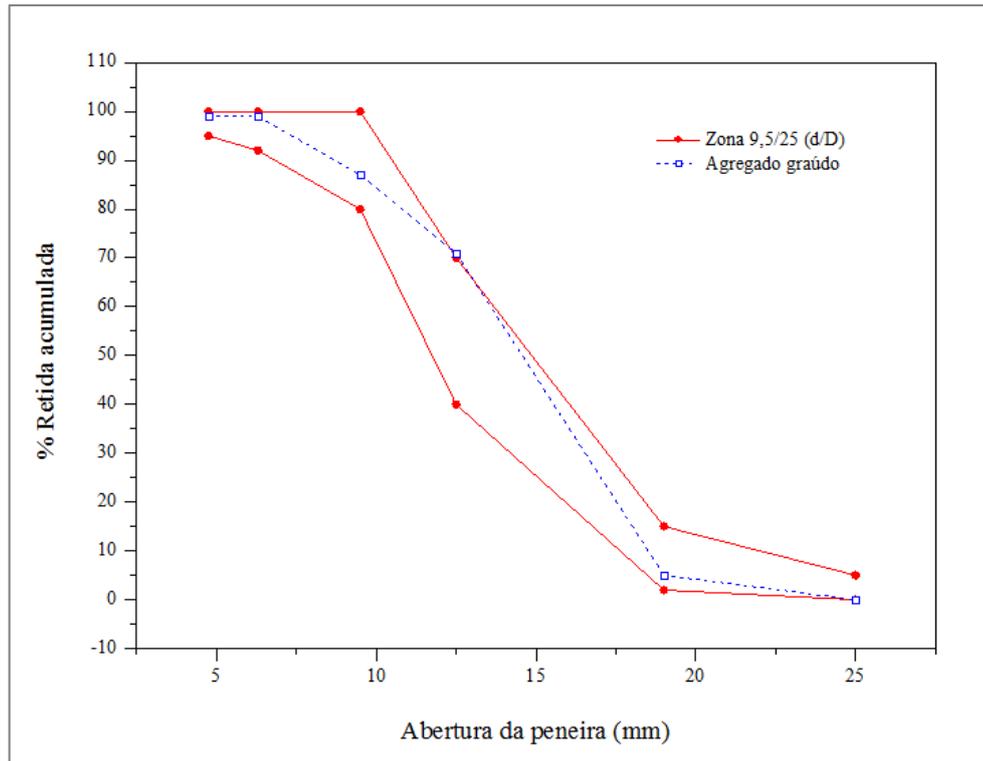


Figura 3.10 - Curva granulométrica do agregado graúdo utilizado

Fonte: Adaptado de relatório de ensaio realizado no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade FUMEC de 27/02/2019.

### 3.1.4 Aditivo

Para a realização desta pesquisa foi fornecido pela empresa MC-Bauchemie o aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1180. As propriedades deste produto, fornecidas pelo fabricante, podem ser observadas na Tabela 3.12.

Tabela 3.12 - Propriedades do aditivo MC-PowerFlow 1180

Característica	Especificação
Estado	Líquido
Cor	Marrom
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,09
pH	6,7
Teor de sólidos (%)	35,05

Fonte: Informações fornecidas pelo fabricante.

### 3.1.5 Água de amassamento

A água utilizada na mistura dos concretos foi fornecida pela rede pública gerida pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA). A água, potável, foi utilizada conforme especificado pela NBR 15900-1 (ABNT, 2009).

## 3.2 Plano experimental

Para a realização do presente trabalho o plano experimental desenvolvido seguiu as seguintes etapas:

- dosagem experimental e ajustes dos traços de concreto executados;
- produção dos concretos propostos;
- ensaios de consistência dos concretos produzidos, por meio da medição do abatimento do tronco de cone, conforme descrito pela NBR NM 67 (ABNT, 1998);
- moldagem, identificação e cura de 306 corpos de prova (CPs), nas dimensões de (10 x 20) cm conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015);
- preparação dos corpos de prova para os ensaios propostos conforme as respectivas orientações normativas;
- realização dos seguintes ensaios propostos:
  - caracterização mecânica dos corpos de prova por meio de ensaio de resistência à compressão axial nas idades de 3, 7, 28, 63, 91, 126 e 182 dias, conforme NBR 5739 (ABNT, 2018);
  - caracterização mecânica dos corpos de prova por meio de ensaio de resistência à tração por compressão diametral na idade de 28 dias, conforme NBR 7222 (ABNT, 2011);

- caracterização mecânica dos corpos de prova por meio de ensaio de módulo estático de elasticidade à compressão na idade de 28 dias, conforme NBR 8522 (ABNT, 2017);
- caracterização física dos corpos de prova por meio dos ensaios de absorção por capilaridade, ensaios de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica na idade de 28 dias, conforme, respectivamente a NBR 9779 (ABNT, 2005) e NBR 9778 (ABNT, 2012);
- avaliação do avanço da frente de penetração de íons cloreto dos corpos de prova por meio do método de ensaio descrito pela norma finlandesa NT BUILD 492 (NORDTEST, 1999) nas idades de 28, 63, 91, 126 e 182 dias.

### **3.2.1 Dosagem experimental e ajustes dos traços de concreto**

Todos os traços foram dosados experimentalmente de modo a atender aos requisitos de qualidade estabelecidos na NBR 6118 (ABNT, 2009) para concreto armado obedecendo os parâmetros especificados para classe de agressividade ambiental III, que determina relação a/c máxima igual a 0,55 e classe de resistência à compressão de projeto mínima de 30 MPa. Além disto, especificou-se que o abatimento de tronco de cone, avaliado por meio do procedimento estabelecido pela NBR NM 67 (ABNT, 1998), deveria estar compreendido no intervalo de (12 ± 1) cm.

Por meio da realização de investigação bibliográfica acerca da utilização de agregados reciclados obtidos por meio do beneficiamento de resíduo de concreto fresco usinado na produção de concretos, foi possível constatar que alguns autores mencionaram que os agregados de RCFL apresentavam a característica de alta absorção da água utilizada nas misturas para a produção dos concretos. Sérifou *et al.* (2013), afirmam que os agregados reciclados de RCFL apresentam esta característica, além de mencionar que são menos densos e mais porosos que os agregados naturais. Em seus estudos, este aumento da porosidade conduziu à redução da trabalhabilidade dos concretos produzidos e, para ajustar esta característica, os autores optaram por acrescentar água na mistura. Contudo, ao adicionar água, os resultados obtidos nos ensaios realizados para avaliar as propriedades dos concretos produzidos indicaram declínio do

desempenho. Posto isto, para manter constante a relação a/c e, portanto, conservar as propriedades dos concretos produzidos, recorreu-se ao uso de aditivo superplastificante. Na Tabela 3.13 pode-se observar os traços de concreto propostos para a presente pesquisa.

Tabela 3.13 - Traços de concreto propostos para a presente pesquisa

Nomenclatura do traço de concreto	Cimento utilizado	Teor de escória de alto forno (% em massa)	Teor de agregado miúdo reciclado de RCFL (% em massa)
CR-00			0
CAR-00-30	CP00	0	30
CAR-00-50			50
CR-60			0
CAR-60-30	CP60	60	30
CAR-60-50			50

Deste modo, foram dosados, de acordo com os parâmetros especificados, dois traços de referência, sendo estes os traços CR-00 e CR-60, produzidos com cimento Portland CPV ARI, contendo 0% e 60% de substituição do cimento por escória de alto forno (CP00 e CP60, respectivamente) sem a presença de agregados miúdos reciclados de RCFL. Posteriormente foram dosados dois traços com substituição parcial de 30% e 50% em massa dos agregados miúdos naturais por agregados miúdos reciclados de RCFL para cada cimento (CP00 e CP60), baseando-se nos traços de referência definidos. Assim, a composição dos traços propostos foi então determinada e pode ser observada por meio da Tabela 3.14.

Tabela 3.14 - Composição dos traços de concreto adotada conforme dosagem

Nomenclatura do traço de concreto	Relação água/cimento (em massa)	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado miúdo natural (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado miúdo de RCFL (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado graúdo (kg/m <sup>3</sup> )	Água (litros)	Aditivo (%)
CR-00			834	0			0,09
CAR-00-30			584	250			0,50
CAR-00-50			417	417			1,05
CR-60	0,55	340	834	0	935	187	0,09
CAR-60-30			584	250			0,41
CAR-60-50			417	417			1,00

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

No Quadro 3.1 observa-se as quantidades de corpos de prova por traço produzidos.

Quadro 3.1 - Quantitativo de corpos de prova por traço executados para a realização dos ensaios

Ensaio	Idade (dias)	CR-00	CAR-00-30	CAR-00-50	CR-60	CAR-00-30	CAR-00-50
<b>Resistência à compressão axial</b>	3,7,28,63, 91,126 e 182						3 unidades por idade e por traço
Total de CPs por ensaio							126 unidades
<b>Resistência à tração por compressão diametral</b>	28						3 unidades por idade e por traço
Total de CPs por ensaio							18 unidades
<b>Módulo estático de elasticidade à compressão</b>	28						3 unidades por idade e por traço
Total de CPs por ensaio							18 unidades
<b>Absorção, índice de vazios e massa específica</b>	28						3 unidades por idade e por traço
Total de CPs por ensaio							18 unidades
<b>Absorção de água por capilaridade</b>	28						6 unidades por idade e por traço
Total de CPs por ensaio							36 unidades
<b>Migração de cloretos</b>	28, 63, 91, 126 e 182						3 unidades por idade e por traço
Total de CPs por ensaio							90 unidades
<b>Total geral</b>							<b>306 unidades</b>

A produção dos concretos e moldagem dos corpos de prova ocorreu em seis etapas, sendo uma para cada um dos traços de concreto propostos para este estudo. Em cada etapa foram moldados 51 corpos de prova nas dimensões de (10 x 20) cm. As moldagens dos corpos de prova foram realizadas 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). Todos os corpos de prova foram mantidos sob abrigo após a moldagem e em temperatura ambiente por um período de 24 horas. Decorrido tal período, procedeu-se à desmoldagem, identificação e submersão dos corpos de prova em água potável. A condição de cura submersa se manteve até as idades previstas para cada um dos ensaios propostos. Na Figura 3.11 observa-se como este processo ocorreu. Na realização de cada etapa de produção e moldagem, foram realizados, 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 3.12).



Figura 3.11 - Moldagem, identificação e cura dos corpos de prova  
 a) materiais adicionados na betoneira para produção dos concretos  
 b) corpos de prova moldados  
 c) corpos de prova desmoldados e devidamente identificados  
 d) corpos de prova em cura submersa



Figura 3.12 - Realização do *Slump test*

### 3.3 Métodos dos Ensaio

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 axial

Três corpos de prova de cada traço, com dimensões de (10 x 20) cm foram retirados da condição de cura submersa nas idades de 3, 7, 28, 63, 91, 126 e 182 dias. Em seguida, foram submetidos ao ensaio mecânico de determinação da resistência à compressão, conforme procedimento recomendado pela NBR 5739 (ABNT, 2018). O procedimento foi realizado em consonância às idades previstas e as tolerâncias observadas na Tabela 3.15. Para assegurar o paralelismo das faces dos corpos de prova durante a realização do ensaio, estes, foram previamente retificados, de acordo com o previsto na NBR 5738 (ABNT, 2015).

Tabela 3.15 - Idade e tolerância de atraso para rompimento

Idade de ensaio (dias)	Tolerância permitida (horas)
3	2
7	6
28	24
63	36
91	48
126	68
182	96

Fonte: NBR 5739 (ABNT, 2018, p.4), adaptada.

Para a realização deste ensaio foi utilizada uma prensa eletro-hidráulica da marca MOHR+FEDERHAFF+LOSENHAUSEN com capacidade para 2000 kN. 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 de acordo com a recomendação da NBR 5739

(ABNT, 2018). O carregamento só cessou quando houve uma queda de força indicando a ruptura. A resistência à compressão foi calculada baseando-se na 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

Aos 28 dias de idade três corpos de prova de cada traço, com dimensões de (10 x 20) cm, designados ao ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral, foram removidos da cura submersa e ensaiados, seguindo o procedimento previsto pela NBR 7222 (ABNT, 2011) com o uso de uma prensa eletro-hidráulica da marca MOHR+FEDERHAFF+LOSENHAUSEN com capacidade para 2000 kN. Para alocar os CPs de maneira correta na máquina, foi utilizado um aparato metálico auxiliar e tiras de chapa dura de fibra de madeira entre este e os corpos de prova.

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.

$$f_{td} = \frac{2F}{\pi D l} \quad \text{Eq. 3.2}$$

Onde:

$f_{td}$  = 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 Módulo de elasticidade

Para o ensaio de determinação do módulo de elasticidade três corpos de prova de cada traço nas dimensões de (10 x 20) cm foram retirados da cura submersa na idade de 28 dias. Posteriormente, foram alocados em compressômetro de bases independentes e levados à prensa eletro-hidráulica da marca MOHR+FEDERHAFF+LOSENHAUSEN com capacidade para 2000 kN. Foi utilizado o método estático, conforme procedimentos estabelecidos na NBR 8522 (ABNT, 2017). Os principais parâmetros a serem utilizados estão listados conforme pode-se observar na Tabela 3.16.

Tabela 3.16 - Parâmetros de ensaio para determinação do módulo de elasticidade

Característica	Especificação
Idade (dias)	28
Tipo de cura	Saturada
Método de ensaio	Estático - Tensão $\sigma$ (0,5 MPa)
Características dos CPs	(10 x 20) cm
Medidores	Mecânicos (2 unidades)
Altura da base da medida – cm	10
Capreamento	Retificação
Número de amostras	3

Fonte: Adaptado de NBR 8522 (ABNT, 2017).

### 3.3.4 Absorção de água por capilaridade

Seis corpos de prova de cada um dos traços, com dimensões de (10 x 20) cm foram retirados da cura submersa na idade de 28 dias, para serem avaliados quanto à absorção de água por ascensão capilar de acordo com as diretrizes da NBR 9779 (ABNT, 2012). Para tanto, no momento da retirada da cura, a massa ao ar de cada um deles foi determinada. As dimensões e as alturas dos corpos de prova também foram mensuradas, para tal, fez-se uso de paquímetro digital com resolução igual a 0,01 mm. Os diâmetros foram obtidos por meio da média de dois diâmetros, medidos ortogonalmente na metade da altura dos corpos de prova. As alturas foram

medidas sobre o eixo longitudinal dos corpos de prova. Em seguida, estes foram levados à estufa na temperatura de  $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$  por um período de 72 horas.

Após a retirada da estufa foi realizado o resfriamento ao ar dos corpos de prova até a temperatura ambiente, e então foram determinados os valores da massa seca de cada um dos corpos de prova para a posterior inserção destes em um recipiente fechado com tampa, devidamente preparado para o ensaio num ambiente com temperatura constante de  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ . Os corpos de prova foram devidamente posicionados e mantidos em contato com uma lâmina d'água de  $(5 \pm 1)$  mm acima de sua face inferior. Para evitar a molhagem por respingos de outras superfícies das amostras, foram aplicadas fitas adesivas no entorno dos corpos de prova na região superior à de contato com a lâmina d'água. Este processo pode ser observado por meio da Figura 3.13.

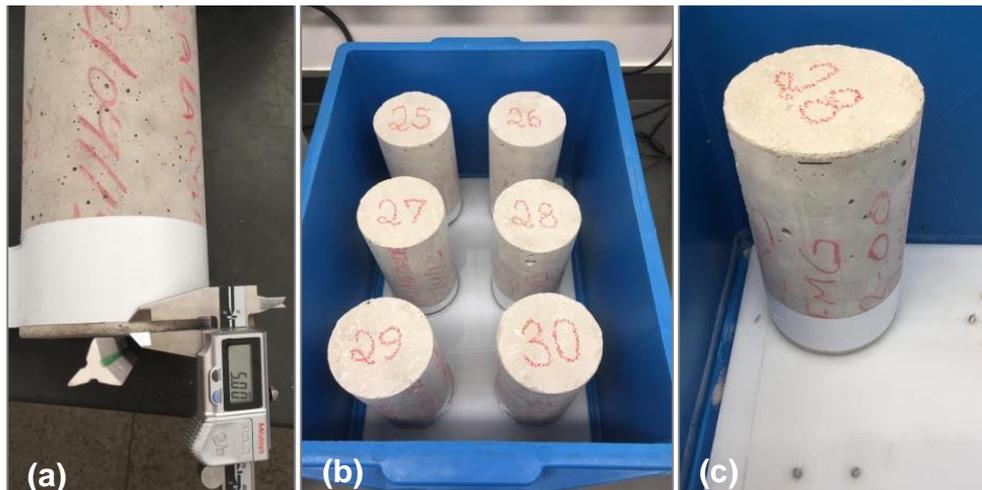


Figura 3.13 - Ensaio de absorção por capilaridade

- a) fita adesiva na superfície superior à área de contato com a água
- b) corpos de prova em contato com a lâmina d'água
- c) corpo de prova posicionado sobre pinos metálicos

Decorridos 3, 6, 24, 48 e 72 horas contadas a partir da colocação destes em contato com a lâmina d'água, as massas dos corpos de prova foram então determinadas. A espessura da lâmina d'água foi mantida constante, completando-se sempre que necessário.

Após a última determinação de massa, visando permitir a anotação da distribuição da água no interior dos CPs, os corpos de prova foram rompidos por compressão diametral (FIGURA 3.14), de acordo com orientações descritas na NBR 7222 (ABNT, 2011).



Figura 3.14 - Medição da altura de ascensão capilar após o rompimento por compressão diametral (28 dias)

A absorção de água por capilaridade, expressa em  $\text{g}/\text{cm}^2$ , foi então 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  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$  (g);

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

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

A norma NBR 9778 (ABNT, 2005) especifica os procedimentos para a determinação da absorção de água, do índice de vazios por imersão e fervura e das massas específicas dos corpos de prova. Na idade de 28 dias, 3 (três) corpos de prova de cada traço foram retirados da cura

submersa e suas dimensões e alturas foram mensuradas com o uso de paquímetro digital com resolução igual a 0,01 mm com procedimento semelhante ao evidenciado para o ensaio de absorção por capilaridade. Posteriormente, os corpos de prova foram submetidos à secagem em estufa por um período equivalente à 72 horas, à uma temperatura constante de  $(105 \pm 2) ^\circ\text{C}$ , para determinação das massas secas ( $m_s$ ) dos CPs. Seguidamente, os CPs foram saturados em água à temperatura de  $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ , por meio de submersão, e mantidos nessa condição por um período de 72 horas. Ao final dessa etapa, os corpos de prova foram dispostos em um recipiente cheio de água, que foi levado à ebulição por um período de 5 horas, conservando-se aproximadamente o mesmo volume de água, possibilitando que os corpos de prova permaneçam submersos durante todo esse processo.

Transcorrido o período de fervura e após o resfriamento natural da água até a temperatura ambiente de  $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$  foi então obtida a massa imersa de cada um dos CPs ( $m_i$ ) ensaiados por meio de uma balança hidrostática. Logo após, os CPs foram retirados da água, secos com pano úmido e então as suas massas na condição saturada superfície seca ( $m_{\text{sat}}$ ) foram determinadas. Na Figura 3.15 observa-se o processo supracitado.

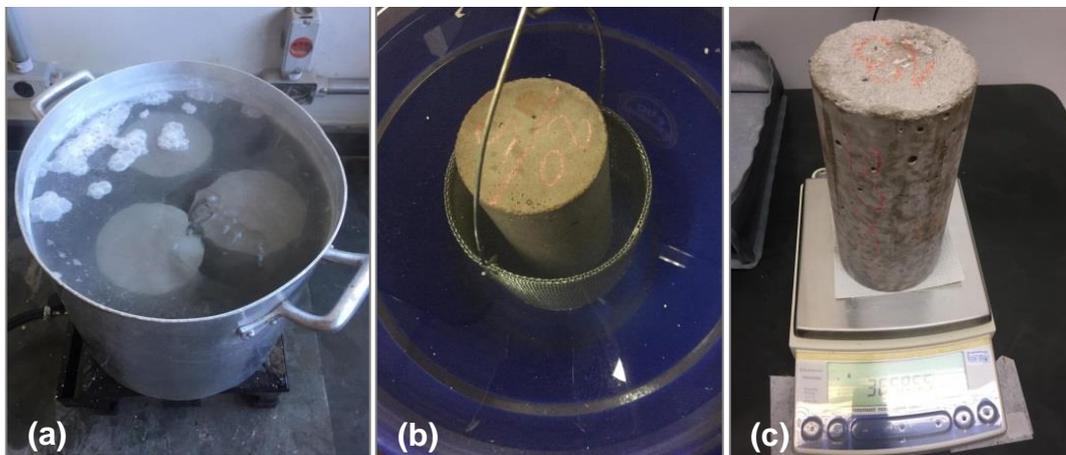


Figura 3.15 - Ensaio de absorção, índice de vazios e massa específica  
 a) corpos de prova em recipiente com água em fervura  
 b) pesagem hidrostática  
 c) pesagem em balança convencional

Com as informações obtidas foi possível a determinação da absorção de água, o índice de vazios por imersão e fervura e as massas específicas dos CPs. O percentual de absorção (A) foi calculado pela razão entre a diferença da massa saturada superfície seca ( $M_{\text{sat}}$ ) pela massa seca ( $m_s$ ) e 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:

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

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

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

### 3.3.6 Migração de Cloretos

Nas idades de 28, 63, 91, 126, 182 dias, 3 (três) corpos de prova com dimensões de (10 x 20) cm de cada traço foram retirados da cura submersa para a avaliação da penetrabilidade dos íons cloreto com base no ensaio acelerado de migração em estado não-estacionário prescrito pela NT BUILD 492 (NORDTEST, 1999).

#### 3.3.6.1 Obtenção das amostras

Inicialmente, os corpos de prova foram marcados na superfície lateral e cortados em quatro fatias com alturas correspondentes a  $(50 \pm 2)$  mm e com 100 mm de diâmetro, com o uso de máquina de corte apropriada. As fatias do topo e base dos corpos de prova de origem foram descartadas e as fatias internas, reservadas para a realização do ensaio, foram limpas em água corrente com o auxílio de escova de aço e identificadas de acordo com sua posição no corpo de prova. Na Figura 3.16 pode-se observar o esquema para a obtenção das amostras.

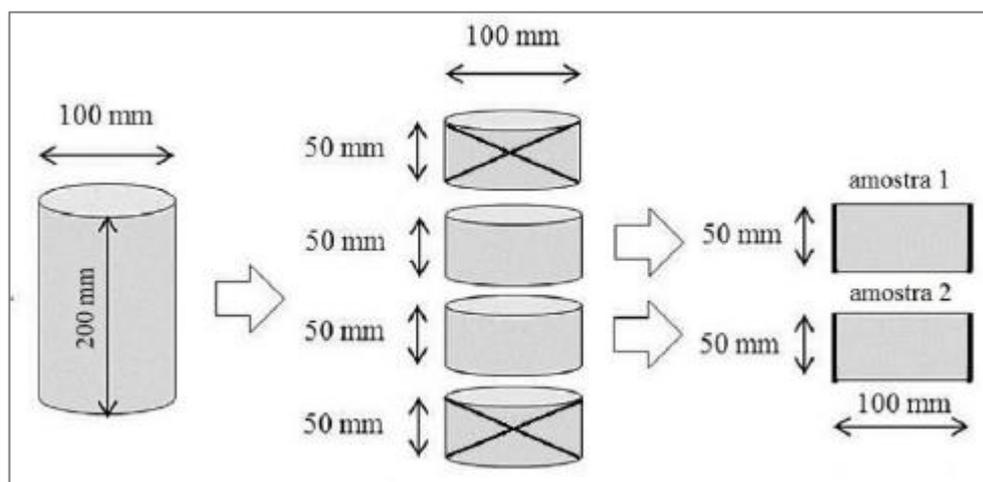


Figura 3.16 - Esquema para corte das amostras para o ensaio de migração de íons cloreto  
Fonte: MAGALHÃES, 2019, p. 97.

Assim, foram obtidas 6 (seis) amostras para cada traço/idade. Na Figura 3.17 observa-se um corpo de prova devidamente posicionado para corte e as amostras obtidas.

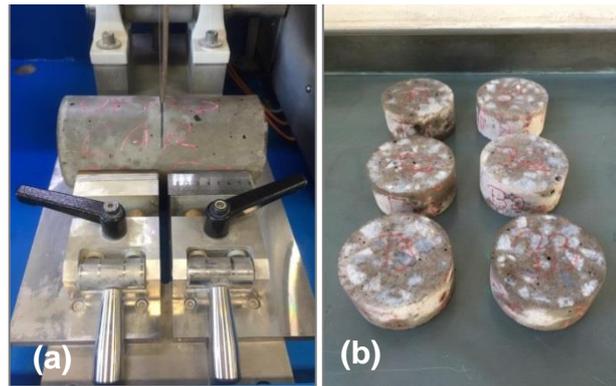


Figura 3.17 - Corte dos corpos de prova e identificação das amostras obtidas  
 a) corpos de prova marcados para corte  
 b) amostras obtidas e identificadas

### 3.3.6.2 Preparo das amostras

Os corpos de prova obtidos foram inseridos em uma câmara de vácuo de modo que não houvesse contato entre elas e submetidas à uma pressão de vácuo de aproximadamente 50 mBar (5 kPa) por um período de 3 horas. Para esta etapa foi utilizado o aparato que pode ser observado por meio da Figura 3.18, que consiste em 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.



Figura 3.18 - Conjunto: câmara de vácuo, *ColdTrap* e bomba

Após o período de 3 horas, a câmara foi preenchida, ainda sob pressão de vácuo, com uma solução previamente preparada composta por 10 litros de água potável aquecida e 20 gramas do reagente hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Os corpos de prova permaneceram nesta condição por mais 1 hora. Na Figura 3.19 observa-se as amostras acondicionadas na câmara de vácuo.

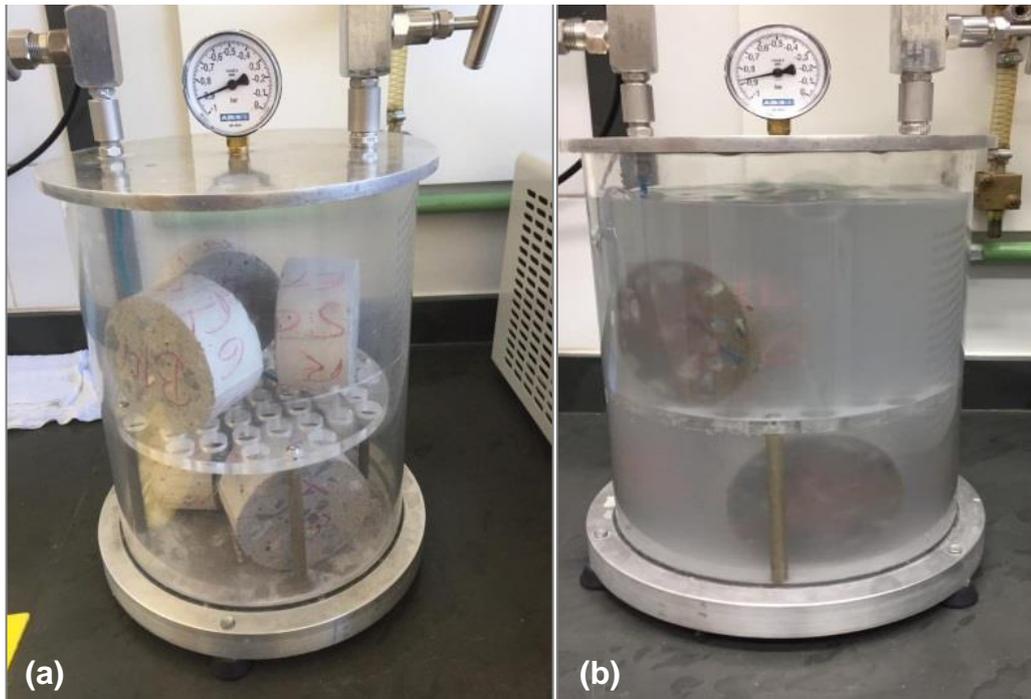


Figura 3.19 - Processo de vácuo das amostras  
a) amostras em vácuo seco  
b) amostras em vácuo com solução de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Ao término deste período, permitiu-se o retorno do ar para o interior da câmara, e as amostras permaneceram 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.

### 3.3.6.3 Migração de íons cloreto

As superfícies laterais das amostras foram impermeabilizadas com o uso de graxa de silicone e posicionadas no interior de camisas de borracha envolvidas por duas abraçadeiras metálicas cada. A estanqueidade dos conjuntos (amostra + camisa de silicone) foi verificada com a submersão parcial destes em água (FIGURA 3.20).



Figura 3.20 - Preparo das amostras para o início do ensaio de migração  
 a) posicionamento e fixação das amostras em camisas de silicone  
 b) teste de estanqueidade dos conjuntos

Posteriormente, as camisas de silicone contendo as amostras foram preenchidas internamente 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. Seguidamente, os conjuntos (amostra + camisa de silicone) foram posicionados em suportes, 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 que pode ser observado por meio da Figura 3.21.

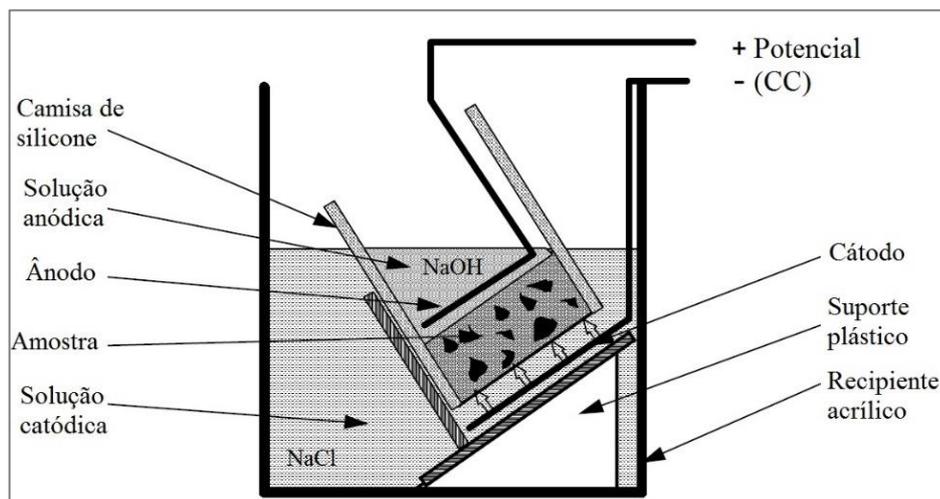


Figura 3.21 - Arranjo esquemático do aparato recomendado pela NT BUILD 492  
 Fonte: Adaptado de NORDTEST, 1999, p. 5.

Assim, 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 (FIGURA 3.22).

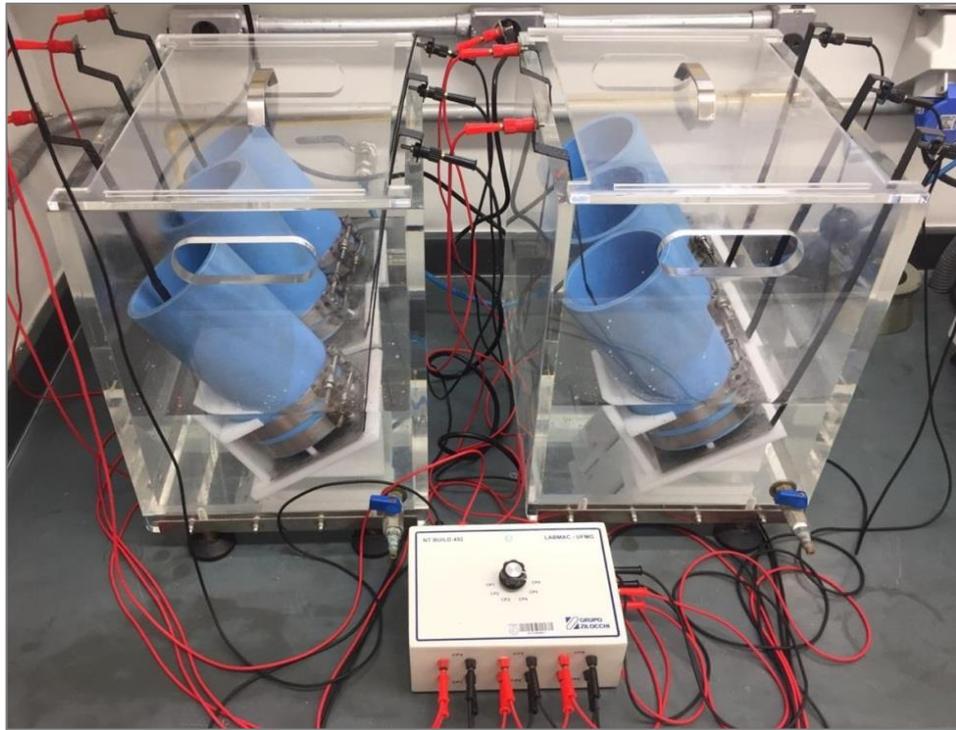


Figura 3.22 - Conjunto de migração conectado à fonte de alimentação

A voltagem elétrica inicial foi então 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 (FIGURA 3.23.a) e de um voltímetro da marca FLUKE 117 TRUE RMS (FIGURA 3.23.b), 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 (FIGURA 3.23.c).

De acordo com os valores medidos para as correntes elétricas passantes nas amostras com a voltagem inicial de 30 V, a voltagem efetiva para a realização do ensaio de acordo com as recomendações da NT BUILD 492 (NORDTEST, 1999) apresentadas na Tabela 3.17 foi ajustada, determinando o tempo total de duração do ensaio.

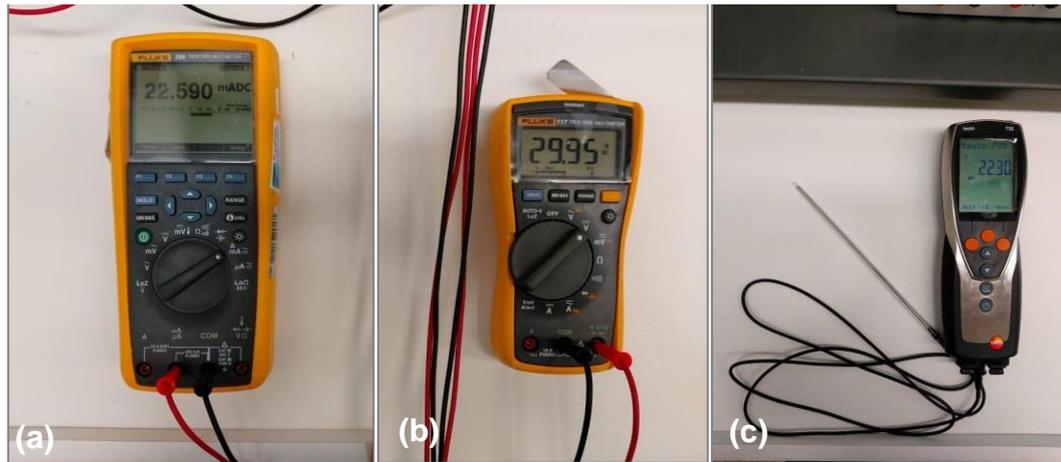


Figura 3.23 - Equipamentos utilizados para medição das correntes elétricas, voltagens aplicadas e temperaturas das amostras

a) amperímetro da marca FLUKE 289 TRUE RMS

b) voltímetro da marca FLUKE 117 TRUE RMS

c) termômetro digital modelo TESTO 735

Tabela 3.17 - 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: NT Build 492 (NORDTEST, 1999), pg. 8.

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 poderia ser desligada e os conjuntos retirados e desmontados.

### 3.3.6.4 Medição da frente de penetração de íons cloreto

Para a realização da medição da frente de penetração de íons cloretos nas amostras o conjunto de migração deveria ser desmontado e as amostras 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 uma prensa eletro-hidráulica (FIGURA 3.24).

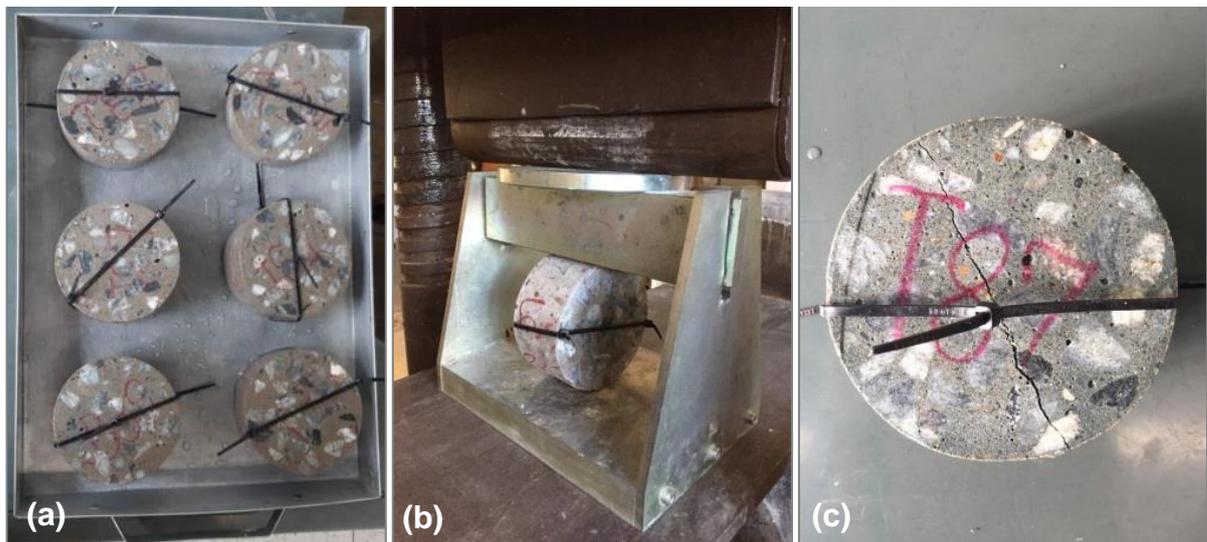


Figura 3.24 - Seccionamento das amostras para medição da frente de penetração

- a) amostras íntegras após o término do processo de migração
- b) aplicação da carga para rompimento diametral das amostras
- c) amostra seccionada diametralmente

Transcorrido o seccionamento das amostras, 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 repartidas de modo a se obter a evidenciação da penetração de cloretos nas amostras. Como pode ser observado na Figura 3.25, após o decorrer de cerca de 10 minutos da aspensão da solução de nitrato de prata, as profundidades de penetração de cloretos, detectadas por meio de um precipitado branco de nitrato de prata claramente visível, eram então medidas.



Figura 3.25 - Aspecto das amostras após aspersão de nitrato de prata  
 a) amostras com profundidade de penetração evidenciada pela aspersão  
 b) marcação das posições de mensuração das alturas de penetração

A medição da profundidade foi efetuada 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. Na Figura 3.26 observa-se um esquema das posições de medida das penetrações.

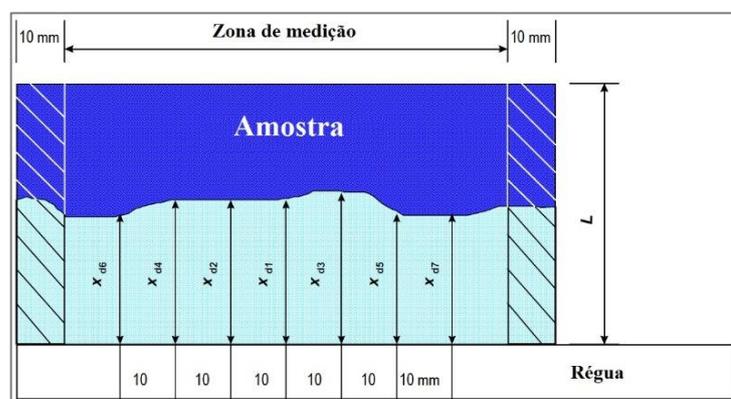


Figura 3.26 - Área de medição da frente de penetração de cloretos  
 Fonte: Adaptado de NT BUILD 492 (NORDTEST, 1999), p.7.

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:

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

$U$  = 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).

### 3.4 Análise estatística dos resultados

Os corpos de prova de concreto produzidos neste estudo representaram as unidades amostrais que foram submetidas aos ensaios propostos e detalhados ao longo deste capítulo. Com o objetivo de investigar a significância e a representatividade dos dados e resultados obtidos com a execução deste plano experimental, realizaram-se as análises estatísticas dos dados.

Para tal, as informações e respostas obtidas nas diferentes idades dos concretos produzidos com a substituição parcial de agregados naturais por agregados reciclados de RCFL em teores de 0%, 30% e 50% bem como a substituição de 0% e 60% em massa de cimento Portland por escória granulada de alto forno, foram correlacionadas e comparadas.

As principais variáveis respostas investigadas foram “resistência à compressão axial”, “resistência à tração por compressão diametral”, “módulo de elasticidade”, “absorção de água”, “índice de vazios”, “massa específica”, “absorção de água por capilaridade” e “migração de íons de cloreto”. A verificação isolada de como cada um dos fatores relatados às influenciou e as comparações múltiplas envolvendo-as foram realizadas com a utilização de técnicas estatísticas de planejamento de experimento.

- Metodologia das análises estatísticas

Com o intuito de investigar os efeitos dos fatores nas variáveis respostas analisadas, foram aplicados diferentes modelos estatísticos fatoriais, tais como os modelos com dois ou três fatores com interações, sendo o modelo de três fatores análogo ao de dois, apenas com um fator a mais. Estes são representados, pelas Equações 3.10 e 3.11, respectivamente.

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + e_{ijk} \quad \text{Eq. 3.10}$$

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

Onde:

Y = variável resposta de interesse;

$\mu$  = média global intrínseca à variável resposta;

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

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

e = erro experimental não controlável associado à variável resposta de interesse e que, por suposição deve ser independente e normalmente distribuído com média igual a 0 e uma variância constante (homocedástico).

Foram gerados gráficos do tipo *boxplot*, onde é possível identificar a variabilidade dos dados e a presença de *outliers*. Também foi gerado o gráfico do tipo *violinplot*, que complementa 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). Os modelos foram aplicados para todos os fatores de interesse e interação.

Para complementar a análise de variância ANOVA, foram feitas comparações múltiplas envolvendo os diversos fatores, testando se há diferença na média da variável resposta entre os níveis do fator de interesse. As comparações múltiplas foram realizadas 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. O teste de normalidade de Shapiro-Wilk foi utilizado para verificar se os pressupostos dos modelos adotados estavam sendo respeitados, ou seja, se os erros experimentais não controláveis associados às variáveis respostas de interesse (resíduos) apresentam hipótese nula de normalidade. Assim como, o teste de Bartlett foi utilizado para testar a homocedasticidade como hipótese nula dos resíduos com a variação dos níveis dos fatores.

As hipóteses de homocedasticidade dos modelos aplicados foram também verificadas por meio de gráficos, sendo estas invalidadas quando houve alguma tendência forte de crescimento, decréscimo ou de parábola. A hipótese de normalidade também foi verificada por meio de gráficos. Quando os erros experimentais não controláveis associados às variáveis respostas de interesse (resíduos) não foram normais ou não apresentaram variância constante, aplicaram-se como transformação na variável resposta de interesse, log, a raiz ou a transformação de Box-Cox. A presença de *outliers* foi verificada por meio da visualização da distância de Cook. A presença de interação foi testada no modelo ANOVA e também visualizada nos gráficos gerados com a resposta média variando os níveis dos fatores, sendo o cruzamento das linhas um indício de interação dos fatores.

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. Deste modo, os modelos ANOVA foram ajustados com a função *aov* da biblioteca padrão *stats*; os gráficos para análise de resíduos foram gerados por meio do pacote *ggplot2* e as comparações múltiplas com o pacote *lsmeans*. Em todos os casos, as diferenças entre as variáveis respostas foram consideradas significativas quando  $p < 0,05$ .

### **3.5 Apresentação das medidas e das incertezas**

Os resultados obtidos com as sucessivas determinações realizadas no desenvolvimento do plano experimental deste estudo 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 3.12, visto que, em todo processo de medida experimental incorporam-se erros estatísticos que afetam desordenadamente as medidas.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad \text{Eq. 3.12}$$

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 3.13, é a média dos módulos das diferenças algébricas entre as medidas sucessivas e a da média aritmética, como mostra a Equação 3.14. O erro médio absoluto é apresentado, ordinariamente, com apenas um algarismo significativo.

$$\Delta\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta x_i| \quad \text{Eq. 3.13}$$

$$\Delta x_i = \bar{x} - x_i \quad \text{Eq. 3.14}$$

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

Este capítulo dedica-se na apresentação, análise e discussão dos resultados obtidos na realização dos ensaios propostos no plano experimental do presente trabalho, bem como acompanham as suas respectivas análises estatísticas. Estas, são apresentadas de forma objetiva neste capítulo sendo a sua visualização complementar disponível nos Apêndices deste estudo.

Os concretos produzidos com substituição parcial de cimento Portland por escória granulada de alto forno em massa em teores de 0% e 60% (CP00 e CP60, respectivamente), bem como com a substituição parcial dos agregados miúdos naturais por agregados reciclados de RCFL em teores de 0%, 30% e 50% foram comparados acerca do desempenho das suas características mecânicas, físicas e de durabilidade. Para tanto, corpos de prova cilíndricos com dimensões de (10 x 20) cm foram submetidos à ensaios de determinação da resistência à compressão axial, tração por compressão diametral e de módulo de elasticidade para apuração das características mecânicas. De mesmo modo, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica com o intuito de investigar características físicas. A durabilidade dos concretos foi avaliada pela determinação da resistência à penetração de íons cloreto por meio de ensaio acelerado de migração em estado não estacionário normatizado pela NT BUILD 492 (NORDTEST, 1999).

Os resultados a serem apresentados no presente capítulo acompanham suas respectivas incertezas, quando aplicável, com o intuito de exteriorizar o desvio possível entre as medidas, evidenciando o seu valor mais provável. Todas as incertezas são aqui apresentadas com apenas um algarismo significativo, forçando o ajuste do número de casas decimais das medidas. As sequências de dados são apresentadas com diferentes casas decimais evidenciando a amplitude da dispersão das medidas encontradas em cada um dos ensaios. Os resultados apresentados foram determinados baseando-se na técnica do erro médio absoluto, esta, apresentada na seção

3.5, por meio da média dos módulos das diferenças entre a medida realizada e a média dessas medidas.

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

Para a realização deste estudo, foi parametrizado que os resultados dos abatimentos de tronco de cone (*slump test*) dos concretos propostos, avaliados por meio do procedimento estabelecido pela NBR NM 67 (ABNT, 1998), deveriam estar compreendidos nos intervalos de  $(12 \pm 1)$  cm. Na Tabela 4.1 observa-se os resultados obtidos.

Tabela 4.1 - Resultados dos ensaios de consistência dos concretos

Traço	Teor de escória de Alto forno (% em massa)	Teor de RCFL (% em massa)	Abatimento de tronco de cone (cm)
CR-00		0	11,0
CAR-00-30	00	30	12,0
CAR-00-50		50	12,0
CR-60		0	12,0
CAR-60-30	60	30	11,5
CAR-60-50		50	12,5

Com a realização do ensaio para a determinação do abatimento do tronco de cone foi constatado que os traços propostos apresentaram consistência dentro dos limites pré-definidos mantendo-se assim a trabalhabilidade esperada para a moldagem adequada dos corpos de prova conservando-se constante a relação água/aglomerante.

#### 4.2 Resistência à compressão axial

O ensaio de determinação da resistência à compressão axial, prescrito pela NBR 5739 (ABNT, 2018) foi realizado com o intuito de verificar a influência da substituição do cimento Portland por escória granulada de alto forno em teores de 0% e 60%, e substituição de agregados miúdos naturais por agregados de RCFL em teores de 0%, 30% e 50% nesta propriedade.

Na Tabela 4.2 e na Figura 4.1 observam-se os resultados apurados pela média de três corpos de prova, por idade, ensaiados à compressão axial aos 3, 7, 28, 63, 91, 126 e 182 dias.

Tabela 4.2 - Resultados do ensaio de resistência à compressão

Traço	fc 3 dias (MPa)	fc 7 dias (MPa)	fc 28 dias (MPa)	fc 63 dias (MPa)	fc 91 dias (MPa)	fc 126 dias (MPa)	fc 182 dias (MPa)
CR-00	30,05 ± 0,7	32,85 ± 0,5	37,43 ± 0,3	38,54 ± 0,6	39,64 ± 0,6	39,89 ± 0,5	41,08 ± 0,1
CAR-00-30	36,84 ± 1,3	39,56 ± 0,4	53,48 ± 0,7	44,56 ± 1,7	48,47 ± 0,6	53,48 ± 0,7	55,51 ± 1,2
CAR-00-50	37,43 ± 0,5	43,71 ± 0,1	43,97 ± 0,6	48,81 ± 0,1	46,18 ± 1,4	49,06 ± 0,8	50,00 ± 0,3
CR-60	12,22 ± 0,2	23,09 ± 0,4	37,35 ± 0,7	39,89 ± 0,6	42,53 ± 0,5	46,09 ± 0,7	48,13 ± 0,3
CAR-60-30	20,71 ± 0,6	37,09 ± 0,8	49,23 ± 1,5	53,73 ± 1,9	55,68 ± 0,6	58,14 ± 0,1	61,46 ± 0,3
CAR-60-50	27,93 ± 0,9	57,72 ± 0,9	63,75 ± 0,7	66,12 ± 3,1	68,08 ± 1,1	72,74 ± 1,4	73,93 ± 1,2

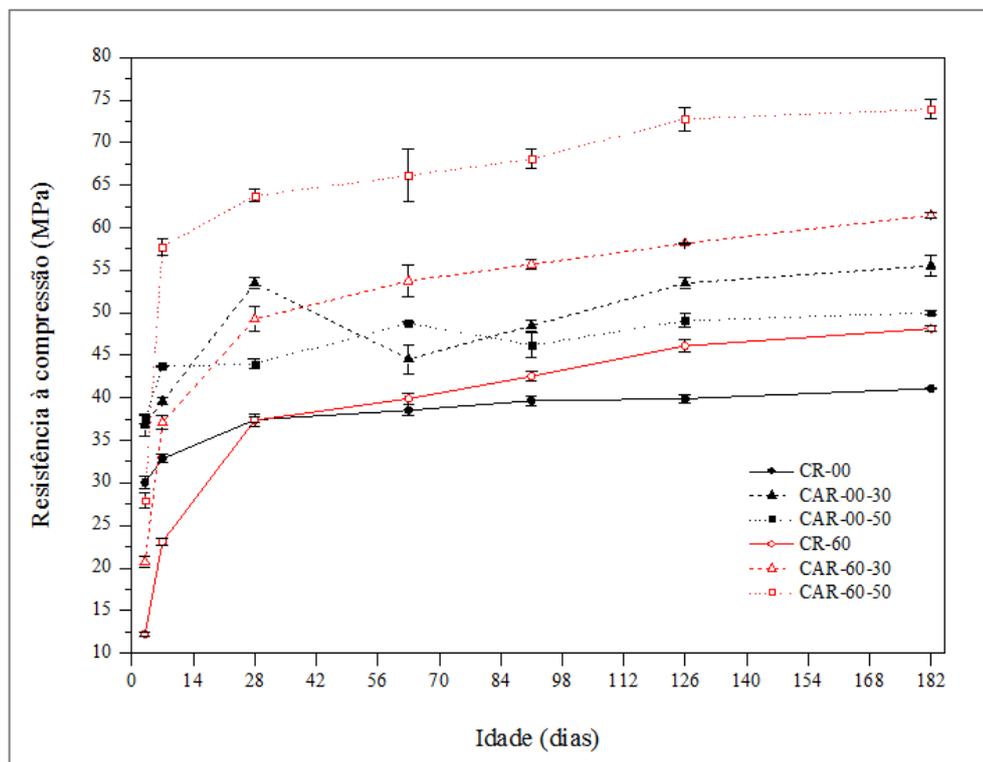


Figura 4.1 - Progresso das resistências à compressão de acordo com a ascensão das idades

A Tabela 4.3 traz, para as sete idades investigadas, os percentuais de aumento de resistência à compressão axial dos concretos produzidos com teores de 0% e 60% de escória (CP00 e CP60,

respectivamente), bem como com teores de RCFL de 30% e 50%, em relação aos traços de referência (CR-00 e CR-60).

Tabela 4.3 - Aumento dos valores médios da resistência à compressão axial em relação aos traços de referência CR-00 e CR-60

<b>Aumento de resistência à compressão axial (%)</b>							
<b>Traço</b>	<b>3 dias</b>	<b>7 dias</b>	<b>28 dias</b>	<b>63 dias</b>	<b>91 dias</b>	<b>126 dias</b>	<b>182 dias</b>
CAR-00-30	23%	20%	43%	16%	22%	34%	35%
CAR-00-50	25%	33%	17%	27%	16%	23%	22%
CAR-60-30	69%	61%	32%	35%	31%	26%	28%
CAR-60-50	128%	150%	71%	66%	60%	58%	54%

De acordo com os resultados médios apurados dos seis traços produzidos foi constatado que o traço CAR-00-30 apresentou aumento da resistência até a idade de 28 dias. Contudo, houve uma queda de 17% no resultado médio constatado deste mesmo traço na idade de 63 dias, voltando a evoluir até a idade de 182 dias. O mesmo ocorreu com o traço CAR-00-50, com aumento da resistência à compressão axial até a idade de 63 dias seguida de redução de 5% no resultado médio na idade de 91 dias, voltando a aumentar com a evolução das idades. Tais reduções dos resultados apurados com o aumento das idades podem ser atribuídas à eventuais divergências no processo de moldagem.

Em relação aos traços produzidos com o cimento CP60, foi observado um aumento da resistência à compressão com o aumento da substituição parcial dos agregados miúdos naturais por agregados reciclados de RCFL para uma mesma idade.

Constatou-se também que estes traços apresentavam ganho de resistência à compressão axial com o avanço das idades. O traço produzido com CP60 e teor de RCFL de 50% (CAR-60-50) foi o traço com maior resistência à compressão axial a partir dos 7 dias de idade em relação a todos os demais traços produzidos. A partir da idade de 63 dias, os traços produzidos com a utilização do cimento CP60 apresentaram resistência à compressão mais elevada que os traços produzidos com cimento CP00. Conforme previamente observado na literatura, a melhoria de desempenho observada nesta propriedade é atribuída à formação de produtos de hidratação mais resistentes e do refinamento da microestrutura dos concretos produzidos com escória de alto

forno. Ademais, em relação à substituição parcial dos agregados miúdos naturais por agregados miúdos de RCFL, observou-se que, para os seis traços produzidos, àqueles com teores de 30% e 50% de RCFL apresentaram resultados médios mais elevados quando comparados aos traços de referência (teor de RCFL de 0%). Sendo assim, sugere-se que a incorporação das partículas finas do agregado miúdo de RCFL implicou no aumento do grau de empacotamento da matriz cimentícia, propiciando condições para o aumento da resistência à compressão. Considerando divergências nas metodologias empregadas, e que, os materiais utilizados poderiam apresentar características distintas, observou-se o oposto na literatura consultada acerca da utilização de agregados reciclados na produção de concretos, onde Correia *et al.* (2009) verificaram resultados de resistência à compressão axial pouco afetados nos concretos produzidos, ao passo que Kou *et al.* (2012a), Sérifou *et al.* (2013), Zega e Di Maio (2011) e Pedro *et al.* (2014) apuraram decréscimo nos resultados obtidos. Sérifou *et al.* (2013) ainda esclareceram que os concretos apresentaram aumentada porosidade na zona de transição entre os agregados reciclados e a nova mistura, o que conduziu, segundo os autores, à redução da resistência à compressão. No Quadro 2.1 deste trabalho pôde ser observada a existência de diferença no tipo de beneficiamento empregado na obtenção dos agregados reciclados entre os estudos consultados. Também foi observada diferença nas estratégias adotadas pelos distintos pesquisadores no desenvolvimento dos trabalhos verificados. Assim sendo, indica-se que estes fatos contribuem para a divergência nos resultados observados na literatura em relação aos resultados observados neste trabalho.

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

As análises estatísticas dos ensaios de resistência à compressão foram realizadas considerando como fatores intervenientes, o teor de escória (0% e 60%), o teor de agregados reciclados de RCFL (0%, 30% e 50%) utilizados na mistura, e as idades de realização dos ensaios (3, 7, 28, 63, 91, 126 e 182 dias) resultando em um banco de dados com um total de 126 observações. Ao relacionar os três fatores, teor de escória, teor de RCFL e idade é observado que nas idades mais prematuras, 3 e 7 dias a diferença nos resultados de resistência à compressão, com a variação dos teores de escória e de RCFL é similar. Contudo, os resultados diferenciam-se aos 28 dias, seguindo com distribuições similares com o avanço das demais idades. Esta distinção entre as idades é um indício de interação entre o fator idade e os demais fatores (FIGURA 4.2).

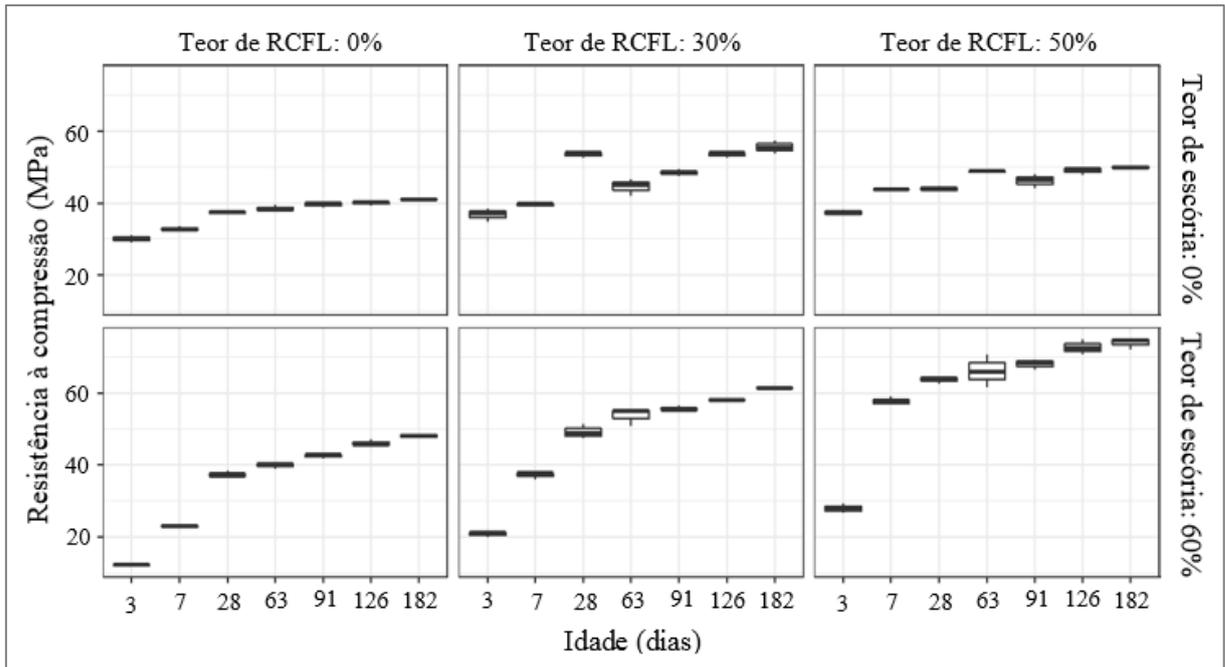


Figura 4.2 - *Boxplots* representando os resultados de resistência à compressão ao relacionar os três fatores

Na Tabela 4.4 pode-se observar a análise de variância ANOVA para o modelo estatístico que foi adotado.

Tabela 4.4 - Resultados do ensaio de resistência à compressão ANOVA

Fator	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Soma dos quadrados médio	F	p-valor
Teor de escória	1	789	789	116,54	< 0,005
Teor de RCFL	2	6420	3210	474,28	< 0,005
Idade (dias)	6	9892	1649	243,59	< 0,005
Interação teor de escória e idade	6	2455	409	60,45	< 0,005
Interação teor de escória e teor de RCFL	2	1883	941	139,09	< 0,005
Resíduos	108	731	7		

Verificou-se que a idade é o fator que melhor explica a variabilidade dos dados, seguida da variação do teor de RCFL e, por fim, o teor de escória. A análise de variância ANOVA permitiu

observar que todos os fatores, bem como as interações, foram considerados significativos a 5% de significância para explicar os valores de resistência à compressão. Deste modo, a ocorrência de interação entre os fatores investigados foi constatada, e por este motivo realizaram-se comparações múltiplas entre os seus níveis, fixando-se os níveis dos demais fatores considerados.

Constatou-se que a variação do teor de escória, de 0% para 60% foi um fator com intervenção significativa para todos os níveis dos demais fatores investigados. Sendo assim, no tocante ao fator teor de escória, atestou-se que, a resistência à compressão axial dos concretos produzidos com a substituição de 60% de cimento Portland por escória de alto forno aumentou em todos os níveis considerados, para todos os fatores de interesse.

Deste modo, a utilização do cimento CP60 associado ao uso de agregados miúdos reciclados provenientes de RCFL, em substituição aos agregados miúdos naturais, proporcionou acréscimo na resistência à compressão axial conforme os teores variavam de 0% para 30% e de 30% para 50%, e, com o avanço das idades. Nos concretos produzidos com teor de 0% de escória observou-se que, para todas as idades investigadas, a substituição de 30% dos agregados miúdos naturais por reciclados de RCFL provocou resultados mais elevados de resistência à compressão axial em relação aos demais teores de RCFL investigados.

Considerando o fator teor de RCFL, foi apurado que a substituição em diferentes teores provocou variações na maioria dos resultados de resistência à compressão axial nos casos considerados e quando os níveis dos demais fatores analisados foram fixados. Para todos os concretos produzidos com teores de 30% ou 50% de substituição houve aumento da resistência à compressão axial quando relacionados aos concretos produzidos com 0% de agregados miúdos de RCFL.

Em relação ao fator idade, verificou-se, na maior parte dos casos, um aumento da resistência à compressão axial com o avanço das idades, nos concretos produzidos com teores de RCFL de 30% e 50%, sendo este aumento potencializado com a substituição de 60% de cimento Portland por escória de alto forno. Na Figura 4.3 observa-se o gráfico de resposta média dos fatores de interesse para a variável resposta resistência à compressão axial.

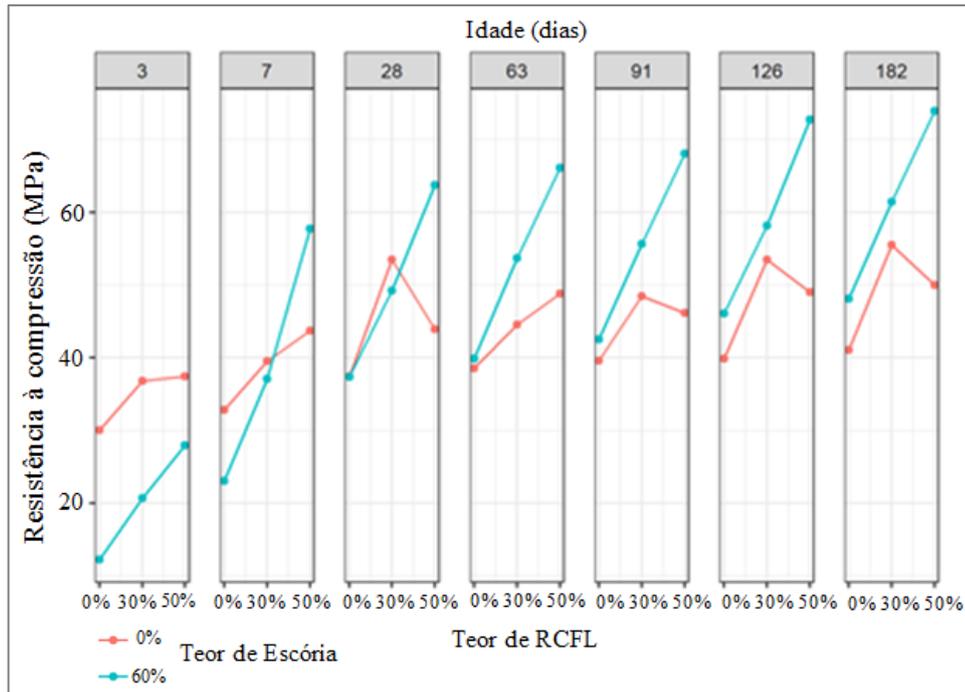


Figura 4.3 - Gráfico representativo da resposta média de resistência à compressão axial

### 4.3 Resistência à tração por compressão diametral

Os corpos de prova foram mantidos em condição de cura submersa até a idade de 28 dias, e, após este período, foram submetidos ao ensaio de tração por compressão diametral baseando-se no procedimento prescrito pela NBR 7222 (ABNT, 2010). Na Tabela 4.5 e na Figura 4.4 podem ser observados os resultados obtidos pela média de três determinações por traço.

Tabela 4.5 - Resultados do ensaio de resistência à tração

Traço	$f_t$ (MPa)
CR-00	$3,4 \pm 0,1$
CAR-00-30	$3,6 \pm 0,1$
CAR-00-50	$3,1 \pm 0,1$
CR-60	$3,0 \pm 0,2$
CAR-60-30	$3,9 \pm 0,5$
CAR-60-50	$4,2 \pm 0,1$

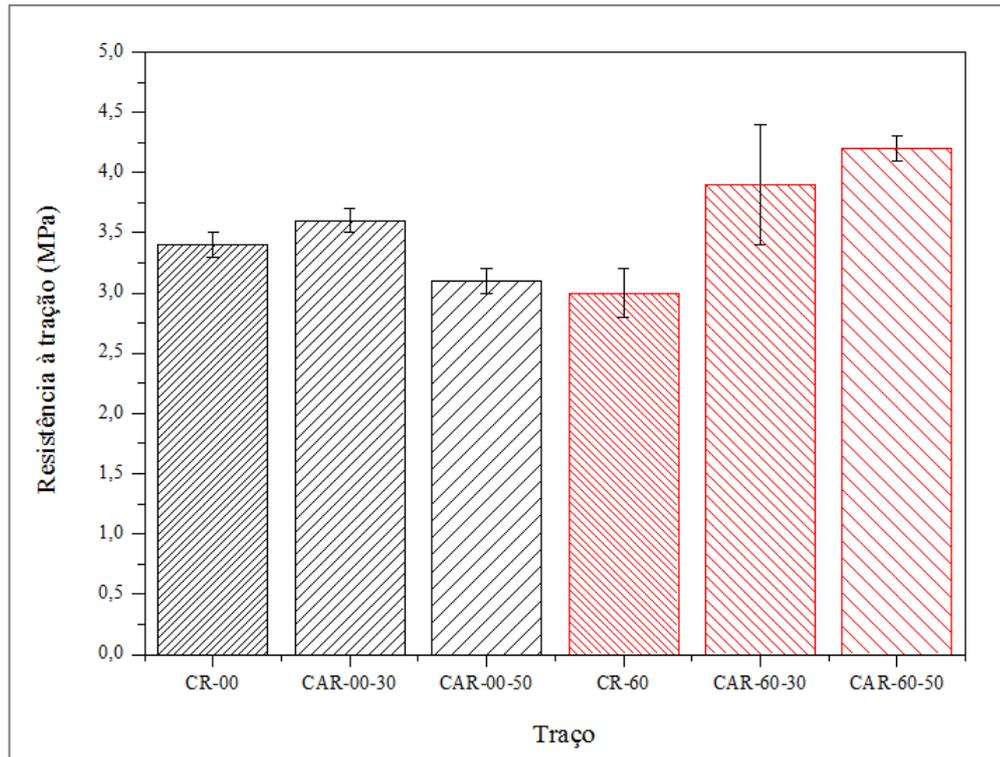


Figura 4.4 - Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Aos 28 dias, foi constatado que o teor de RCFL de 30% provocou aumentos de 9% e 29% nas resistências à tração por compressão diametral, para os traços de concreto produzidos com cimento CP00 e CP60, respectivamente. Com o aumento do teor de RCFL para 50% houve uma redução no resultado médio de resistência de 7% nos traços produzidos com CP00 e um aumento na resistência média apurada de 37% para os traços produzidos com CP60 quando comparados aos respectivos traços de referência. Ao contrário de Kou *et al.* (2012a) e Zega e Di Maio (2011) que identificaram decréscimo nos resultados de resistência à tração dos concretos produzidos em seus estudos, verificou-se uma tendência de melhoria mais significativa nos resultados de resistência à tração nos concretos produzidos com agregados de RCFL e com o cimento CP60. Presume-se que a associação destes dois fatores de interesse contribuiu para a melhoria desta propriedade. Assim sendo mesmo sendo conhecido o fato de que o ensaio de resistência à tração gera mais dispersão de resultado inerente aos métodos de ensaio que o ensaio de resistência à compressão, propõe-se que as razões sugeridas para as melhorias de desempenho verificadas no tocante à resistência à compressão também explicam as melhorias observadas nos resultados do ensaio de resistência à tração. Sendo estas atribuídas à formação de produtos de hidratação mais resistentes e um refinamento da microestrutura dos concretos produzidos com o cimento CP60, associados com o aumento do grau de

empacotamento da matriz cimentícia propiciados a partir da incorporação dos agregados miúdos de RCFL.

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

Para a análise estatística dos resultados de resistência à tração por compressão diametral foi necessária a implementação de um modelo de dois fatores com interação, entre o teor de escória (0% e 60%) e o teor de RCFL (0%, 30% e 50%). Observou-se que a substituição parcial de agregados naturais por agregados reciclados de RCFL proporcionou um aumento significativo na resistência à tração por compressão diametral e na variabilidade dos resultados. Contudo, os resultados pouco diferiram com a variação do teor de 30% para 50%. Ao analisar os fatores teor de escória e teor de RCFL foi constatada uma tendência de crescimento da resistência à tração com a variação dos teores de RCFL de 0% para 30% e de 30% para 50% nos concretos produzidos com cimento CP60. Com o uso do cimento CP00 foi observada uma tendência de parábola dentre os resultados, isto é, há um crescimento da resistência à tração com o aumento do teor de RCFL de 0% para 30% e um decaimento dos resultados de resistência à tração com o aumento do teor de 30% para 50%. Deste modo, com o gráfico *boxplot* apresentado na Figura 4.5 observa-se a possibilidade de interação entre estes fatores. Na Tabela 4.6 pode-se observar a análise de variância ANOVA para o modelo estatístico que foi adotado.

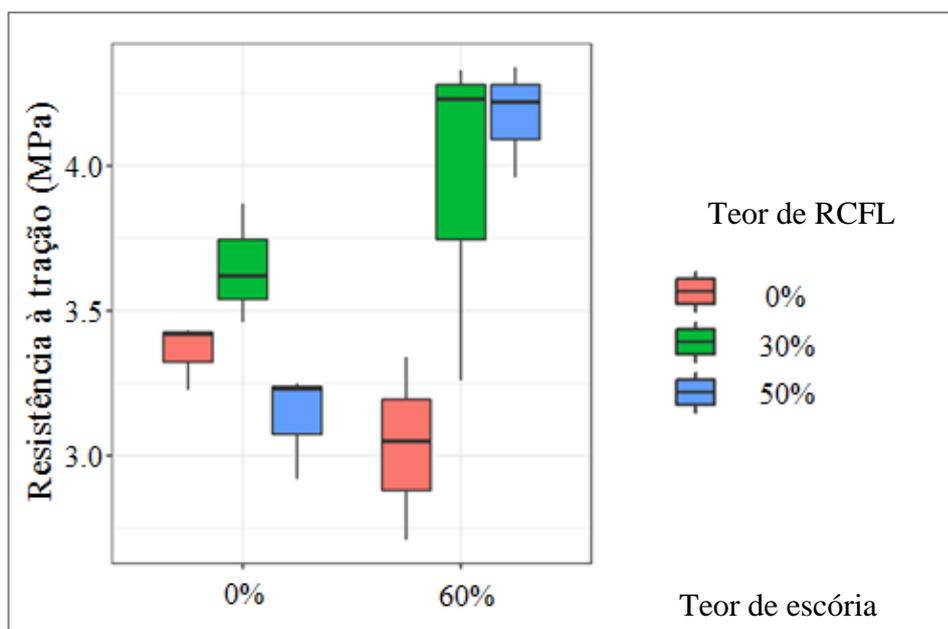


Figura 4.5 - *Boxplots* representando os resultados de resistência à tração ao relacionar os fatores teor de escória e teor de RCFL

Tabela 4.6 - Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão axial ANOVA

Fator	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Soma dos quadrados médio	F	p-valor
Teor de escória	1	0,01	0,01	3,66	0,08
Teor de RCFL	2	0,03	0,01	6,01	0,01
Interação teor de escória e teor de RCFL	2	0,04	0,02	7,61	0,007
Resíduos	12	0,03	0,002		

Verificou-se que apenas o teor de RCFL e a interação deste com o teor de escória foram significativos a 5% de significância, visto que o p-valor apurado no fator teor de escória foi elevado. Deste modo, há indícios de que o fator teor de RCFL influenciou na resistência à tração por compressão diametral, mas o teor de escória, isoladamente, não. Para a idade analisada, quanto maior o teor de RCFL, maiores foram as resistências à tração por compressão diametral apuradas nos concretos produzidos com cimento CP60. Todavia, o mesmo não foi observado nos concretos produzidos com cimento CP00, visto que com a variação de 0% para 30% do teor de RCFL houve aumento expressivo da resistência à tração, mas o aumento do teor de RCFL para 50% provocou decréscimo considerável dos resultados, sendo estes, inferiores, inclusive, aos resultados apurados nos concretos de referência. A interação do modelo é justificada pelo gráfico de resposta média, com linhas não paralelas (FIGURA 4.6).

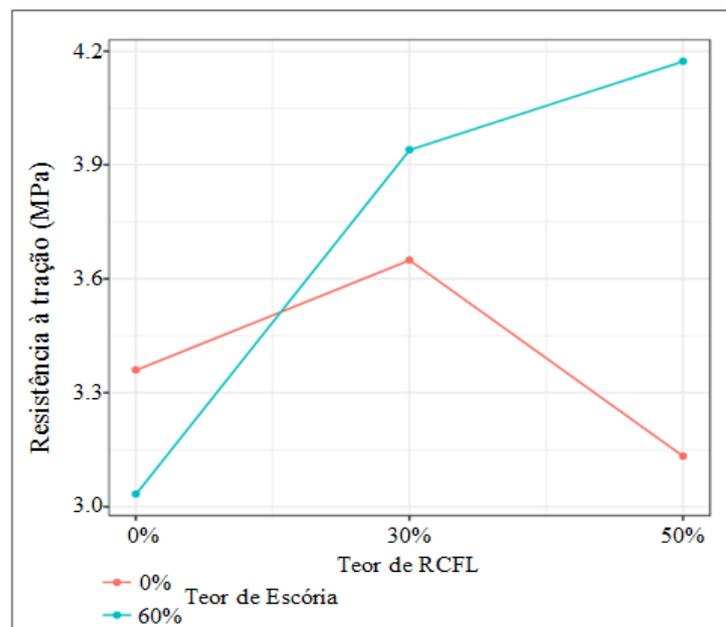


Figura 4.6 - Gráfico da resposta média de resistência à tração

#### 4.4 Módulo de elasticidade

O ensaio de módulo de elasticidade foi realizado utilizando-se o método estático, conforme procedimento estabelecido na NBR 8522 (ABNT, 2017). Três corpos de prova foram retirados da cura submersa na idade de 28 dias e submetidos ao ensaio. Os resultados obtidos da média de três valores podem ser observados na Tabela 4.7 e na Figura 4.7.

Tabela 4.7 - Resultados médios do módulo de elasticidade

Traço	$E_c$ (GPa)
CR-00	$28,9 \pm 1,3$
CAR-00-30	$29,8 \pm 1,4$
CAR-00-50	$27,1 \pm 0,4$
CR-60	$27,2 \pm 0,2$
CAR-60-30	$29,05 \pm 1,0$
CAR-60-50	$31,2 \pm 0,7$

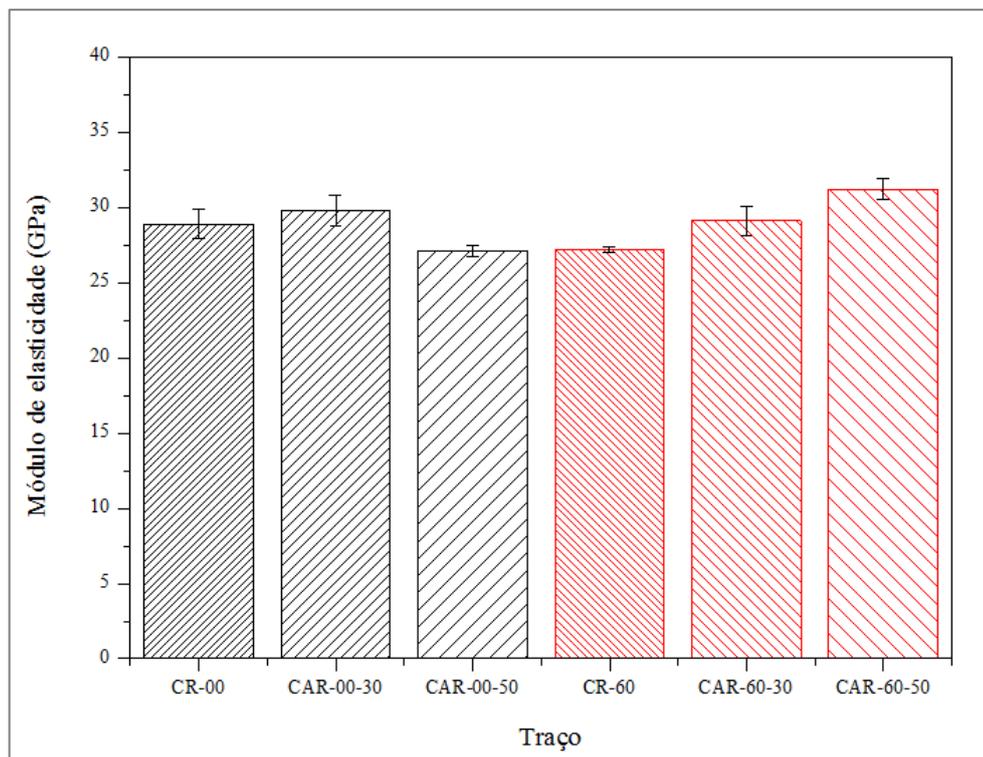


Figura 4.7 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade

Assim como o ensaio de resistência à tração, o ensaio de módulo de elasticidade também apresenta maior dispersão de resultados inerentes aos métodos de ensaio em relação ao ensaio de resistência à compressão. Com a realização do ensaio de módulo de elasticidade na idade de 28 dias, os resultados apurados não apresentaram desvios significativos entre os resultados dos concretos de referência e dos concretos produzidos com variação da composição. Este fato indica que esta propriedade pode não ter sido afetada com a substituição de cimento Portland por escória de alto forno e dos agregados miúdos naturais pelos agregados miúdos reciclados nos teores testados. De forma a contextualizar os resultados ora apurados com os da bibliografia disponível, verificou-se que Kou *et al.* (2012a) e Zega e Di Maio (2011) também testaram esta propriedade, e constataram que a utilização de agregados reciclados provocou decréscimo dos resultados de módulo de elasticidade, fato este, não verificado no presente estudo.

- *Análise estatística dos resultados de módulo de elasticidade*

De modo semelhante à análise estatística desenvolvida para a variável resposta resistência à tração por compressão diametral, a análise dos resultados de módulo de elasticidade consistiu na implementação de um modelo de dois fatores com interação, baseados no teor de escória (0% e 60%) e no teor de RCFL (0%, 30% e 50%). Ao correlacionar os fatores teor de escória e teor de RCFL uma possível interação entre estes fatores foi constatada. Ao considerar os concretos produzidos com cimento CP60, verificou-se um aumento no módulo de elasticidade conforme o aumento do teor de RCFL. Assim, no gráfico *boxplot* apresentado na Figura 4.8 observa-se a possibilidade de interação entre estes fatores.

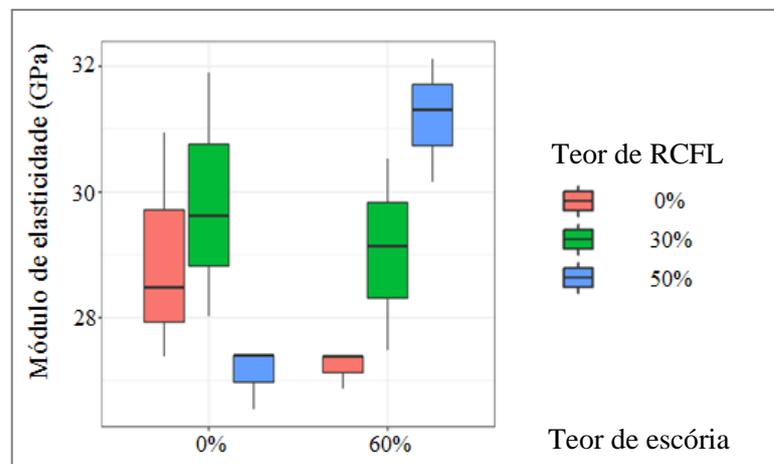


Figura 4.8 - *Boxplots* representando os resultados de módulo de elasticidade ao relacionar os fatores teor de escória e teor de RCFL

Na Tabela 4.8 pode-se observar a análise de variância ANOVA para o modelo estatístico adotado, a qual exibiu que, apesar da interação entre os fatores ser significativa a 5% de significância, o efeito do fator teor de escória e do fator teor de RCFL individuais não são significativos, visto que o p-valor identificado foi elevado. Deste modo, constatou-se que tais fatores não influenciaram no módulo de elasticidade, sendo os resultados apurados independentes destes dois fatores. Uma vez que a análise de variância ANOVA constatou que os fatores teor de escória e teor de RCFL não foram significativos a 5% de significância, 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. Na Figura 4.9 pode ser visto graficamente a resposta média para o módulo de elasticidade, com linhas não paralelas.

Tabela 4.8 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade ANOVA

Fator	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Soma dos quadrados médio	F	p-valor
Teor de escória	1	1,21	1,21	0,67	0,42
Teor de RCFL	2	6,29	3,14	1,75	0,21
Iteração teor de escória e teor de RCFL	2	29,21	14,60	8,13	0,005
Resíduos	12	21,55	1,79		

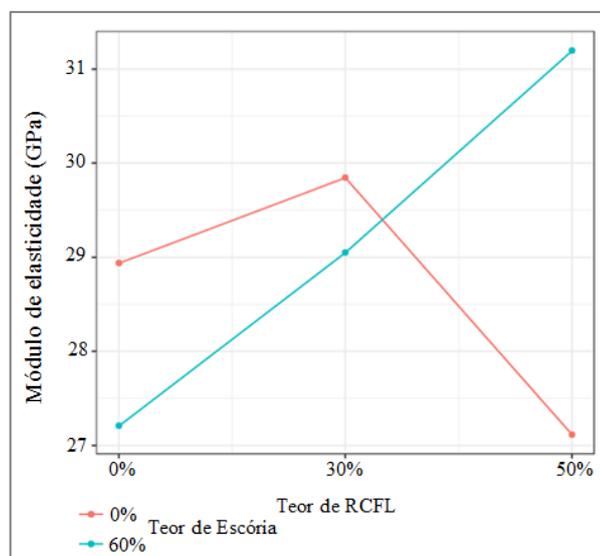


Figura 4.9 - Gráfico representativo da resposta média do módulo de elasticidade

Apesar de a interação existir e ser visível esta é desprezível, visto que, nenhum dos fatores relacionados foram considerados significativos a 5% de significância.

Mesmo que o gráfico mostre uma tendência de evolução nos resultados de módulo de elasticidade com o aumento do teor de RCFL para os concretos produzidos com cimento CP60 e os resultados do módulo de elasticidade dos concretos produzidos com cimento CP00 sofrerem variação com o aumento do teor de RCFL, foi constatado por meio da análise estatística dos dados apurados que não é possível afirmar que essa variável resposta tenha sido afetada pelos fatores analisados.

#### 4.5 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado com a remoção de seis corpos de prova de cada traço da cura submersa na idade de 28 dias e baseou-se nas recomendações prescritas na NBR 9779 (ABNT 2012). Este ensaio consiste em determinar a quantidade de massa de água absorvida por unidade de área em função do período de exposição dos corpos de prova. Na Tabela 4.9 e na Figura 4.10 os resultados apurados são mostrados.

Tabela 4.9 - Média dos resultados apurados no ensaio de absorção de água por capilaridade

Traço	Após 3h (g/cm <sup>2</sup> )	Após 6h (g/cm <sup>2</sup> )	Após 24h (g/cm <sup>2</sup> )	Após 48h (g/cm <sup>2</sup> )	Após 72h (g/cm <sup>2</sup> )
CR-00	0,16 ± 0,06	0,22 ± 0,08	0,45 ± 0,17	0,65 ± 0,22	0,80 ± 0,26
CAR-00-30	0,20 ± 0,05	0,27 ± 0,06	0,55 ± 0,12	0,76 ± 0,15	0,91 ± 0,17
CAR-00-50	0,30 ± 0,04	0,41 ± 0,05	0,82 ± 0,08	1,15 ± 0,10	1,39 ± 0,11
CR-60	0,08 ± 0,01	0,11 ± 0,02	0,24 ± 0,04	0,32 ± 0,05	0,39 ± 0,06
CAR-60-30	0,15 ± 0,02	0,21 ± 0,02	0,39 ± 0,03	0,54 ± 0,03	0,64 ± 0,04
CAR-60-50	0,20 ± 0,01	0,26 ± 0,01	0,41 ± 0,02	0,52 ± 0,04	0,60 ± 0,05

Os resultados dos ensaios de absorção por capilaridade apurados na idade de 28 dias revelaram que os concretos produzidos com teor de escória de 60% e substituição parcial de agregados miúdos naturais por agregados miúdos reciclados de RCFL apresentaram menores absorções em todos os intervalos de tempo quando comparados aos traços de concreto produzidos com

cimento CP00. No decorrer de 72 horas, apurou-se que a utilização do cimento CP60 provocou uma diminuição de 51%, 30% e 57%, respectivamente, das absorções de água por capilaridade nos concretos com teores de RCFL de 0%, 30% e 50% em relação aos concretos produzidos com teor de escória de 0% e mesmos teores de RCFL. Este fato sugere que a substituição de 60% de cimento Portland por escória granulada de alto forno implicou em um refinamento dos poros e na formação de uma matriz cimentícia mais densa.

Tal resultado assemelha-se ao constatado por Magalhães (2019), que ao comparar concretos produzidos com teor de 0% de RCFL, teores de 0% e 60% de escória e a mesma relação a/c que a adotada nesta pesquisa, observou redução da absorção de água por capilaridade em todos os intervalos de tempo ora mencionados para os concretos produzidos com o cimento com a substituição de 60% do cimento Portland por escória granulada de alto forno. De acordo com o autor, em seu estudo, a adição de escória de alto forno acarretou no refinamento da estrutura de poros da pasta de cimento hidratada o que contribui na redução da porosidade dificultando o deslocamento de água no interior do concreto.

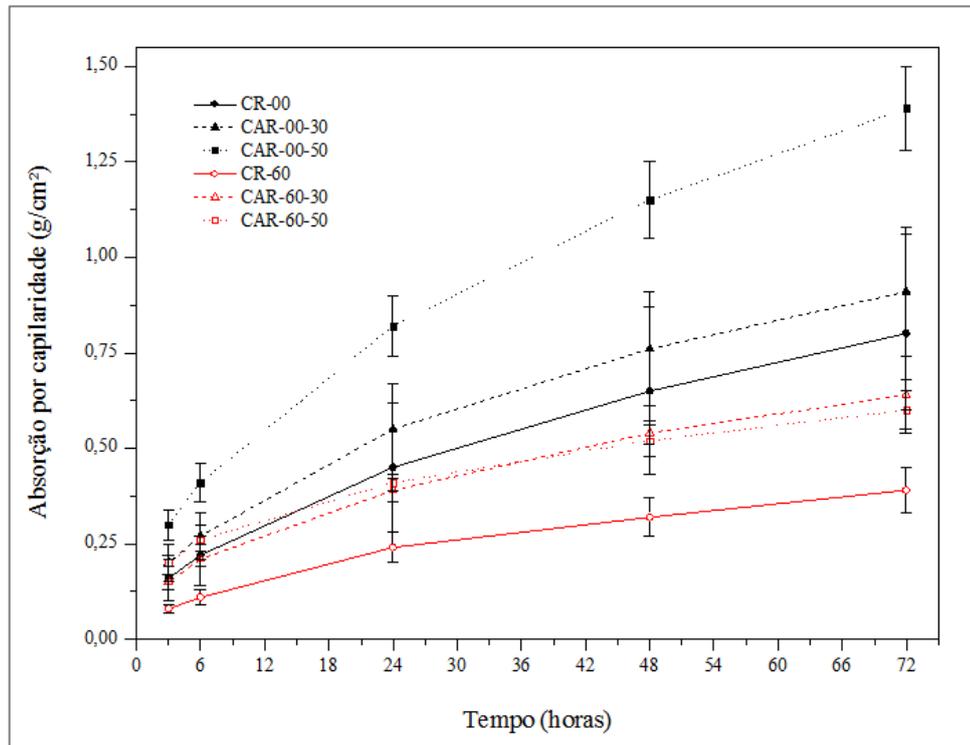


Figura 4.10 - Resultado gráfico do ensaio de absorção de água por capilaridade

Constatou-se ainda que, para ambos os cimentos utilizados (CP00 e CP60) na produção dos seis traços de concreto, a absorção de água por capilaridade aumentou em todos os períodos

investigados de exposição dos corpos de prova à lamina d'água com o aumento do teor de RCFL. Deste modo, o aumento dos teores de agregados miúdos reciclados de RCFL de 0% para 30%, assim como de 30% para 50%, acarretaram em aumento na absorção de água por capilaridade. Após o período de 72 horas, os concretos produzidos com cimento CP00 e com teor de RCFL de 30% e 50% mostraram aumento na absorção de água por capilaridade de 14% e 74%, respectivamente. Os concretos produzidos com o cimento CP60 tiveram aumentos da ordem de 64% e 54%, respectivamente, quando comparados ao concreto de referência (CR-60).

Os resultados apontam que a incorporação do agregado miúdo de RCFL acarretou na formação de concretos com maior permeabilidade, isto é, com uma estrutura de poros menos refinada. Contudo, os concretos produzidos com cimento CP60 associados a utilização de agregados miúdos de RCFL apresentaram resultados de absorção de água por capilaridade inferiores aos observados nos concretos produzidos com cimento CP00. Sugere-se que a substituição de 60% de cimento Portland por escória de alto forno granulada foi responsável pela atenuação da permeabilidade e melhoria no refinamento da estrutura dos poros nos concretos produzidos com agregados miúdos de RCFL.

#### *- Análise estatística dos resultados de absorção de água por capilaridade*

Para a análise estatística dos resultados de absorção de água por capilaridade foram considerados como fatores intervenientes o teor de escória (0% e 60%), o teor de RCFL (0%, 30% e 50%) e o tempo de contato com a lâmina d'água (3, 6, 24, 48 e 72 horas) dos corpos de prova de concreto produzidos. O banco de dados para avaliação desta variável resposta totalizou em 180 observações.

Ao relacionar os três fatores, teor de escória, teor de RCFL e tempo (horas) observou-se que a diferença na absorção de água variando o teor de escória e de RCFL, com exceção da escala de absorção, não se altera significativamente com o avanço das horas, indiciando que os fatores de interesse agem de forma independente na variável resposta (FIGURA 4.11).

Na Tabela 4.10 apresenta-se a análise de variância ANOVA para o modelo estatístico que foi adotado. Constatou-se que os três fatores de interesse foram significativos à 5% de significância, contudo não houve interação significativa entre os fatores.

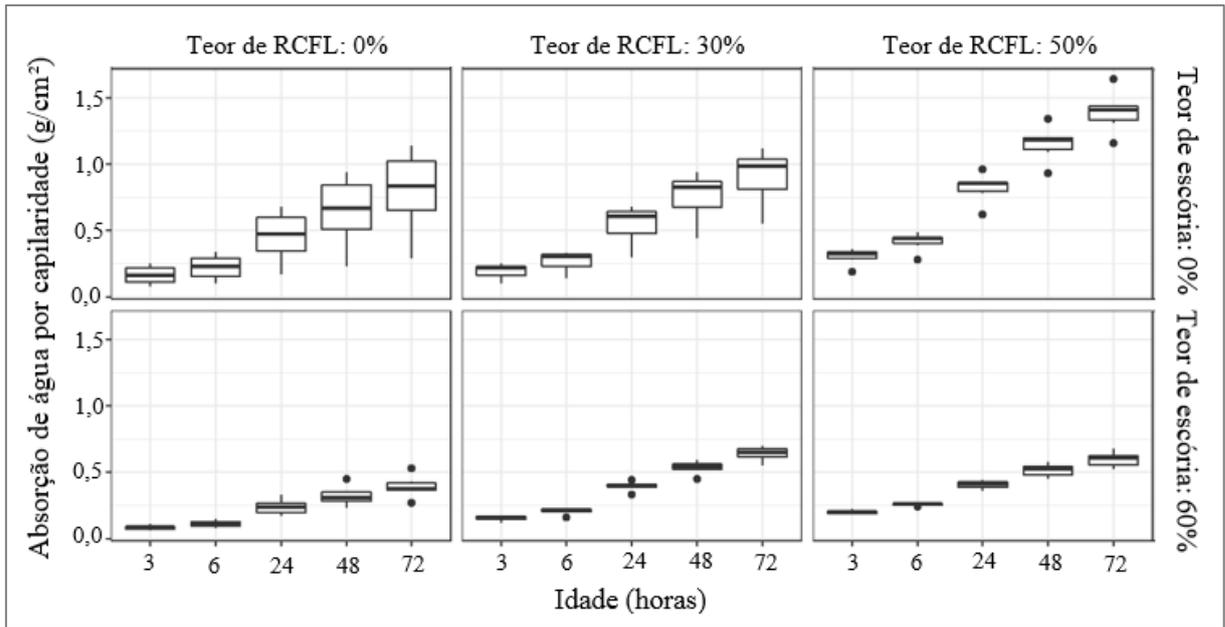


Figura 4.11 - *Boxplots* representando os resultados de absorção de água por capilaridade ao relacionar os três fatores de interesse

Tabela 4.10 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade ANOVA

Fator	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Soma dos quadrados médio	F	p-valor
Teor de escória	1	1,40	1,40	86,75	< 0,005
Teor de RCFL	2	1,14	0,57	35,43	< 0,005
Idade (dias)	2	4,03	2,01	124,95	< 0,005
Resíduos	12	2,80	0,01		

Na Figura 4.12 observa-se a representação da resposta média de interação entre os fatores, ressalta-se que a predominância de retas paralelas expõe a ausência de interação. Deste modo, em relação ao fator teor de escória, a absorção de água por capilaridade diferenciou-se entre os níveis de interesse, sendo esta, mais bem pronunciada nos concretos com 0% de teor de escória. Considerando o fator teor de RCFL, conforme as análises realizadas, observou-se que todas as combinações de comparações resultaram em diferença significativa, indicando que o aumento do teor conduziu ao aumento da absorção de água por capilaridade em todos os concretos produzidos. Por fim, em relação ao fator tempo (horas) observou-se tendência de crescimento da absorção com o avanço das horas. Assim, verificou-se que os concretos produzidos com o nível 60% do fator teor de escória e com os níveis 30% e 50% do fator teor de RCFL

apresentaram menor absorção de água por capilaridade que os concretos produzidos com todos os níveis do fator teor de RCFL com o nível 0% do teor escória. Deste modo, tornou-se evidente que a utilização do cimento CP60 trouxe melhorias em relação a esta propriedade.

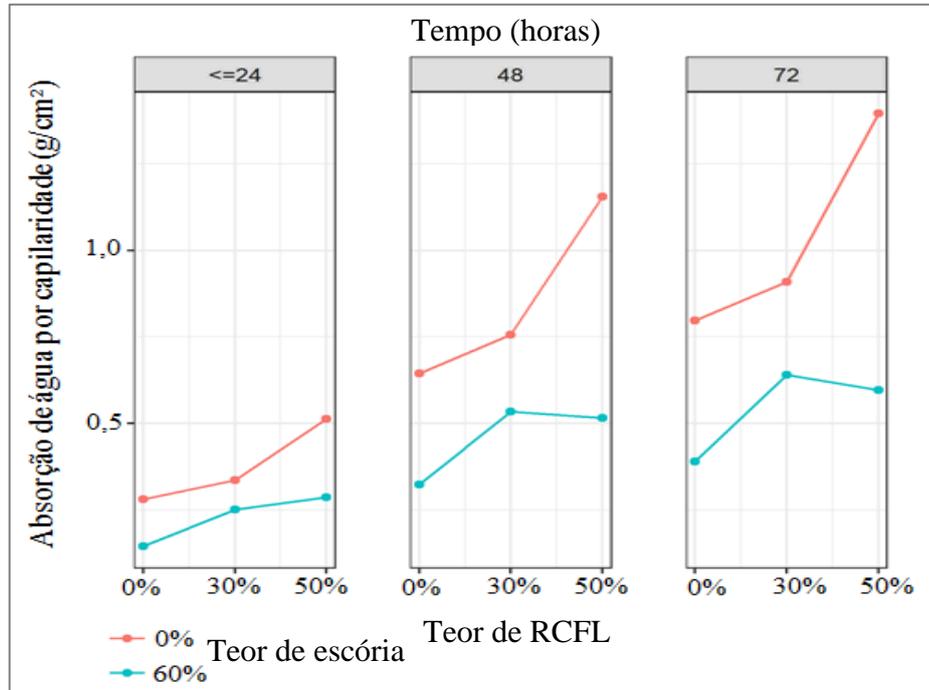


Figura 4.12 - Gráfico representativo da resposta média da absorção de água por capilaridade

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

Os procedimentos especificados na NBR 9778 (ABNT, 2005) permitiram avaliar as propriedades de absorção, índice de vazios por imersão e fervura e massa específica de três corpos de prova de cada um dos traços. Para tanto, estes foram removidos da cura submersa na idade de 28 dias, idade em que os ensaios foram realizados. Os resultados consistem na média de três determinações para cada traço de concreto e podem ser observados na Tabela 4.11 e nas Figuras 4.13 a 4.15.

Baseando-se nos resultados constatou-se que o teor de 30% de RCFL em associação aos teores de escória de 0% e 60% não influenciou consideravelmente na absorção de água por imersão. Todavia a variação dos teores de RCFL de 0% para 50% e de 30% para 50% em associação a utilização do cimento CP00 provocou um aumento de 21% e de 22%, respectivamente. Para os concretos produzidos com a utilização do cimento CP60 observou-se que a variação dos teores

de RCFL de 0% para 50% e de 30% para 50% ocasionou em redução de 19% e de 21%, respectivamente, na absorção de água. Ademais, os resultados indicaram que os traços de concreto produzidos com teor de 60% de escória apresentaram resultados inferiores de absorção de água por imersão para todos os teores de RCFL (0%, 30% e 50%) quando comparados aos concretos produzidos com o cimento CP00.

Tabela 4.11 - Resultados da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica

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> )
CR-00	5,38 ± 0,812	11,46 ± 1,718	2,13 ± 0,009	2,25 ± 0,015	2,41 ± 0,045
CAR-00-30	5,34 ± 0,174	11,84 ± 0,369	2,22 ± 0,003	2,34 ± 0,000	2,52 ± 0,007
CAR-00-50	6,50 ± 0,104	14,01 ± 0,188	2,15 ± 0,006	2,29 ± 0,004	2,50 ± 0,002
CR-60	4,49 ± 0,261	9,51 ± 0,491	2,12 ± 0,013	2,22 ± 0,008	2,34 ± 0,007
CAR-60-30	4,60 ± 0,036	10,26 ± 0,067	2,23 ± 0,005	2,33 ± 0,004	2,48 ± 0,005
CAR-60-50	3,63 ± 0,126	8,25 ± 0,246	2,28 ± 0,011	2,36 ± 0,009	2,48 ± 0,007

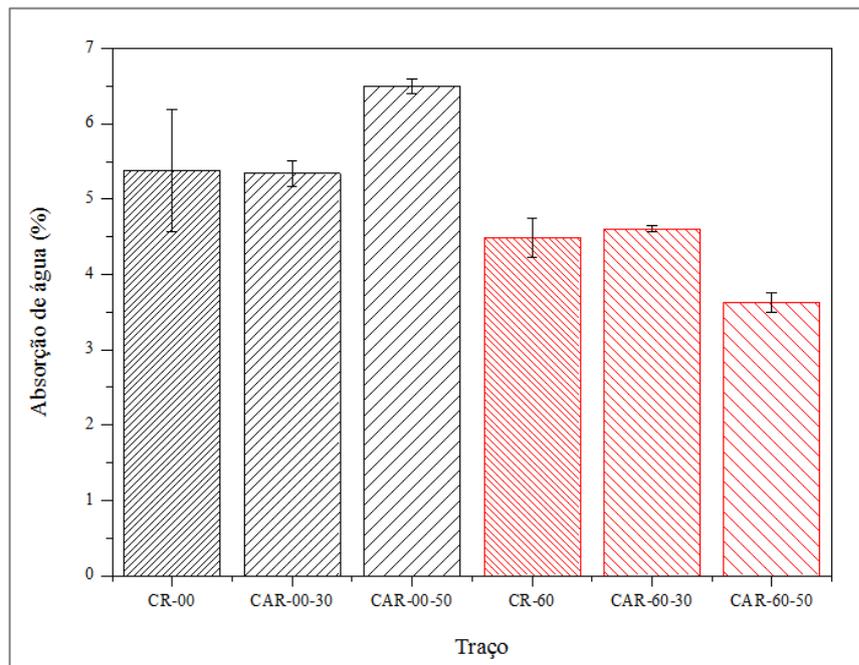


Figura 4.13 - Gráfico que expõe os resultados das absorções de água por imersão

Os resultados de absorção de água por imersão ora apresentados são, em grande maioria, divergentes aos resultados apurados por Correia *et al.* (2009), Kou *et al.* (2012a) e Pedro *et al.*

(2014), que verificaram em seus trabalhos que o aumento do teor de RCFL nos concretos conduzia ao aumento da absorção de água. Nota-se que os resultados obtidos para a absorção de água por imersão não seguiram um padrão de aumento ou redução conforme os teores de RCFL aumentavam.

Os resultados médios apurados para os índices de vazios dos concretos produzidos seguiram a tendência observada nos resultados médios de absorção de água por imersão. Deste modo, observou-se que o teor de 30% de RCFL em associação ao uso dos cimentos CP00 e CP60 não causou variações significativas nos resultados médios obtidos para esta propriedade. Contudo, a variação dos teores de RCFL de 0% para 50% acarretou em um aumento de 22% nos concretos produzidos com o cimento CP00 e uma redução de 13% para os concretos produzidos com a substituição no teor de 60% de cimento Portland por escória de alto forno nos resultados médios para os índices de vazios. Observou-se ainda que a variação entre os teores de RCFL de 30% para 50% acarretou em aumento de 18% para os concretos produzidos com o cimento CP00 e em decréscimo de 19% para os concretos produzidos com o cimento CP60.

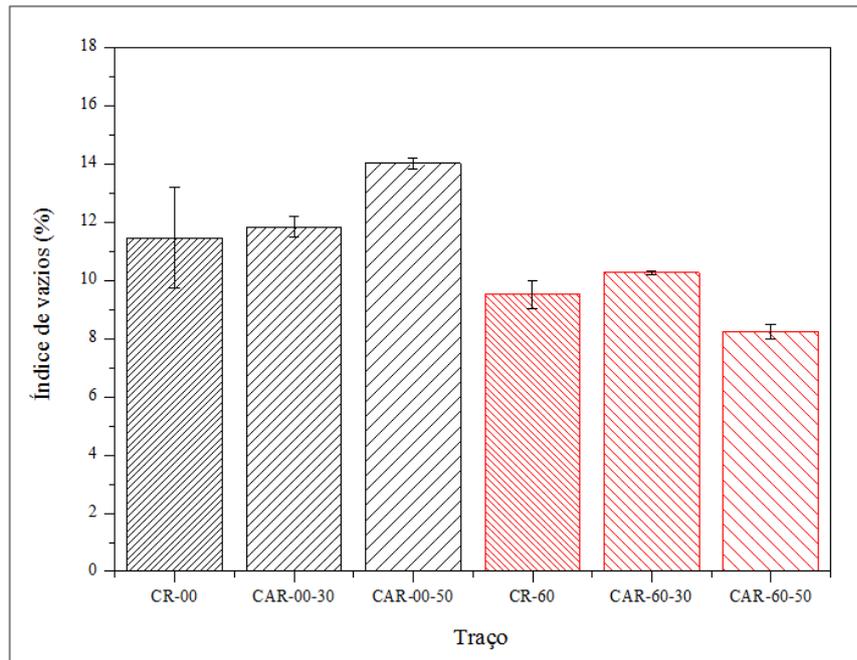


Figura 4.14 - Gráfico que expõe os resultados dos índices de vazios

Observou-se ainda que os concretos produzidos com a utilização do cimento CP60 exibiram redução do índice de vazios para todos os teores de RCFL (0%, 30% e 50%) quando comparados aos traços de concreto produzidos com o cimento CP00. Deste modo, diante dos

resultados obtidos em relação à absorção de água por imersão e ao índice de vazios propõe-se que a substituição de 60% de cimento Portland por escória granulada de alto forno implicou em uma redução da porosidade interconectada e na formação de uma matriz cimentícia mais densa, principalmente quando o cimento CP60 foi associado a substituição de 50% dos agregados miúdos naturais por agregados de RCFL.

Em relação aos resultados obtidos para a massa específica dos traços analisados, observou-se que os traços de referência não apresentaram variação significativa nos resultados médios das massas específicas seca, saturada e real entre si. Contudo, a substituição parcial de agregados miúdos naturais por agregados miúdos de RCFL nos teores de 30% e 50% ocasionou em um singelo aumento dos resultados de massa específica seca, saturada e real nos concretos produzidos, indicando que os agregados miúdos de RCFL podem ter contribuído no refinamento da estrutura porosa conduzindo à uma matriz cimentícia mais densa.

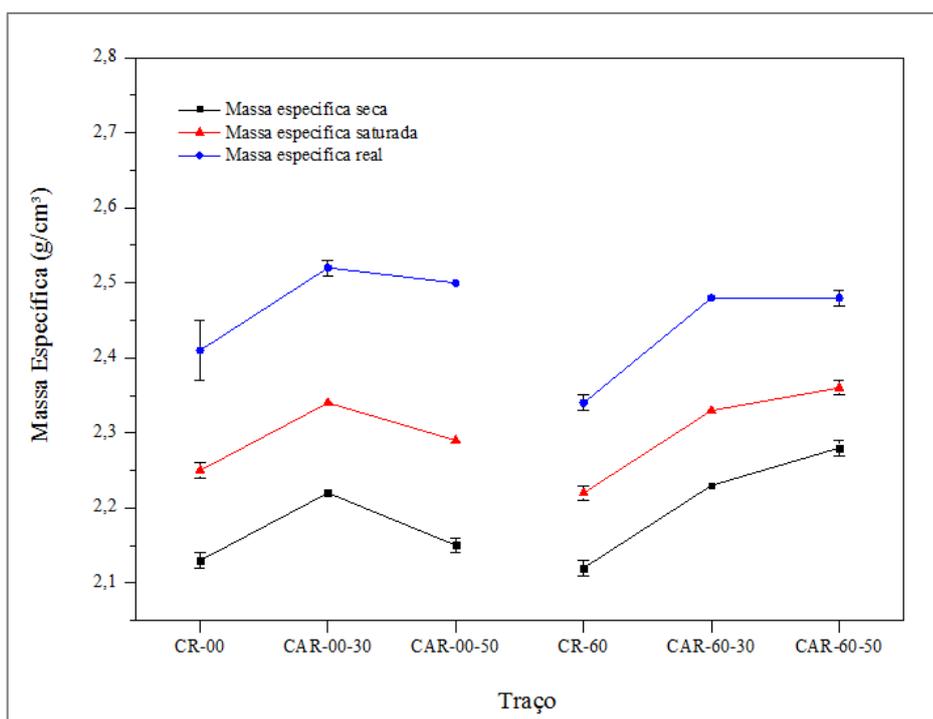


Figura 4.15 - Resultados das massas específicas seca, saturada e real

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

Para as análises estatísticas dos resultados obtidos por meio dos ensaios de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica, foram considerados como fatores

intervenientes o teor de escória (0% e 60%) e o teor de RCFL (0%, 30% e 50%), compondo um banco de dados composto por um total 18 observações para cada variável resposta.

#### *Absorção de água por imersão*

Ao relacionar ambos os fatores de interesse (FIGURA 4.16), observou-se que conforme o aumento do teor de RCFL, a tendência de crescimento dos resultados médios é evidenciada para os concretos produzidos com teor de 0% de escória. Uma quebra na tendência é observada para os concretos produzidos com o uso do cimento CP60 sendo constatada uma tendência de parábola dentre os resultados, com aumento da absorção com o aumento do teor de RCFL de 0% para 30% e um decaimento acentuado dos resultados com o teor de RCFL de 50%.

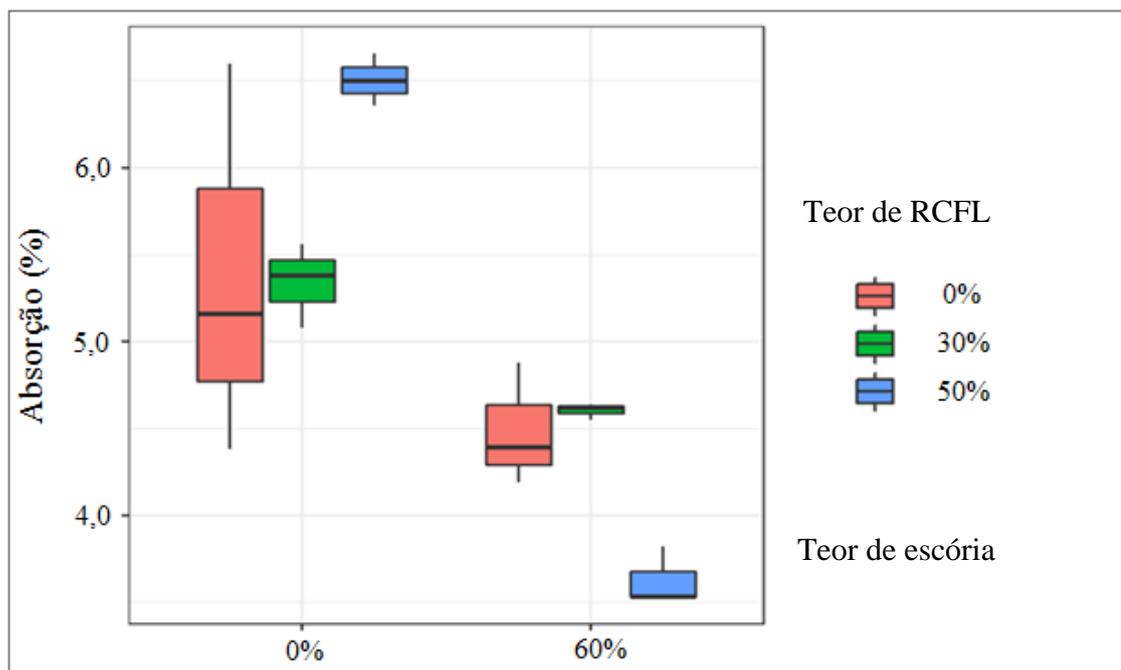


Figura 4.16 - *Boxplots* representando os resultados de absorção de água por imersão ao relacionar os fatores teor de escória e teor de RCFL

Na Tabela 4.12 pode ser observada a análise de variância ANOVA para o modelo estatístico que foi adotado. Após diversos modelos terem sido testados, o apresentado é o mais adequado para explicar a interveniência dos fatores de interesse sobre a variável resposta absorção de água por imersão. Sendo, para o modelo adotado, desconsiderado o fator teor de RCFL, visto que, a inclusão deste conduzia a um modelo que não respeitava os pressupostos. O fator teor de escória foi considerado significativo à 5% de significância.

Tabela 4.12 - Resultados do ensaio de absorção de água por imersão ANOVA

Fator	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Soma dos quadrados médio	F	p-valor
Teor de escória	1	10,17	10,17	22,14	< 0,0001
Resíduos	16	7,351	0,459		

Com a observação do gráfico de resposta média da Figura 4.17 é possível constatar que a variação dos níveis de 0% para 30% do fator teor de RCFL não causa diferença significativa nos resultados. Contudo a variação de 0% para 50% e de 30% para 50% do teor de RCFL causa variação acentuada dos resultados, com aumento significativo da absorção de água para os concretos produzidos com o cimento CP00 e decréscimo acentuado da absorção para os concretos produzidos com o cimento CP60.

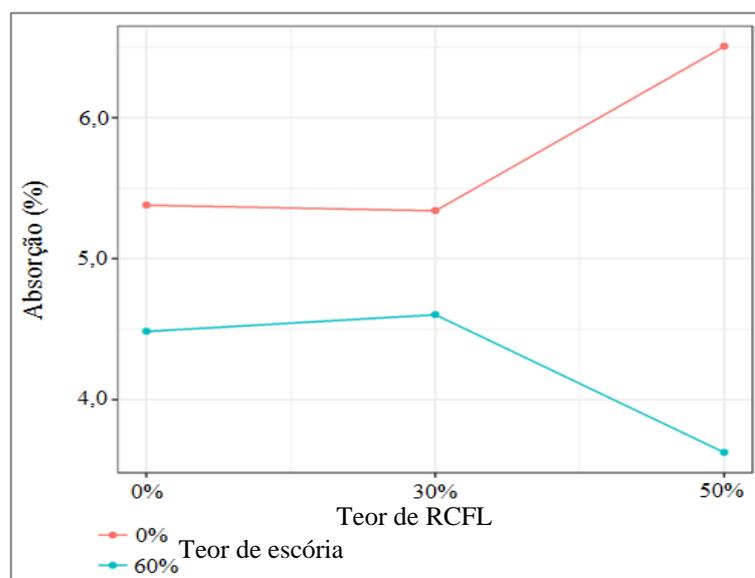


Figura 4.17 - Gráfico da resposta média de absorção de água por imersão

### Índice de vazios

Constatou-se que o comportamento da variável resposta índice de vazios é semelhante aos de absorção de água por imersão, alterando-se apenas a escala dos resultados. A relação entre os fatores teor de escória e teor de RCFL pode ser observada por meio do gráfico *boxplot* apresentado na Figura 4.18.

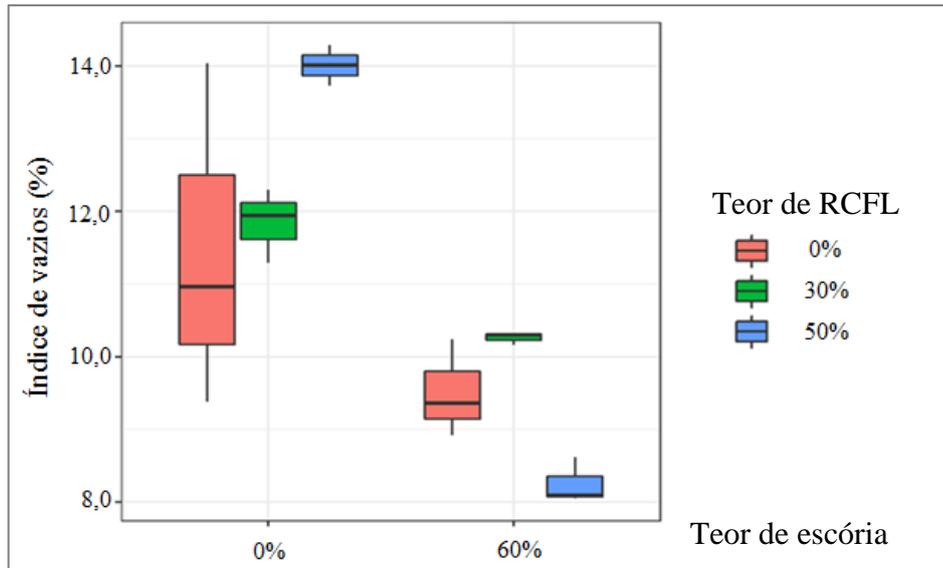


Figura 4.18 - *Boxplots* representando os resultados de índice de vazios ao relacionar os fatores teor de escória e teor de RCFL

Na Tabela 4.13 observa-se a análise de variância ANOVA para o modelo estatístico que foi adotado.

Tabela 4.13 - Resultados do ensaio de índice de vazios ANOVA

Fator	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Soma dos quadrados médio	F	p-valor
Teor de escória	1	43,18	43,18	22,62	< 0,0001
Resíduos	16	30,54	1,91		

Conforme mencionado anteriormente a variável resposta índice de vazios apresentou comportamento semelhante à variável resposta absorção de água por imersão e após diversos modelos terem sido testados, foi necessária a desconsideração do fator teor de RCFL, visto que, a inclusão deste conduzia a um modelo que não respeitava os pressupostos. O fator teor de escória foi considerado significativo à 5% de significância. A comparação múltipla para o fator teor de escória foi executada de forma semelhante à variável resposta absorção de água por imersão. Apurou-se que os níveis do fator teor de escória são significativamente distintos entre si. Indicando que 0% de teor de escória apresenta maior índice de vazios. Com a observação do gráfico de resposta média apresentado na Figura 4.19 a mesma tendência de resultados da

variável resposta absorção de água por imersão foi observada, com a variação do teor de escória foi observada uma diferença clara na média dos resultados. Ademais foi observada baixa diferença na média dos resultados entre os teores de RCFL de 0% para 30%. Apesar de uma intensificação da diferença entre 0% e 50% e 30% e 50%, como o fator não foi considerado adequado para o modelo, esta resposta observada nas análises não pode ser considerada relevante.

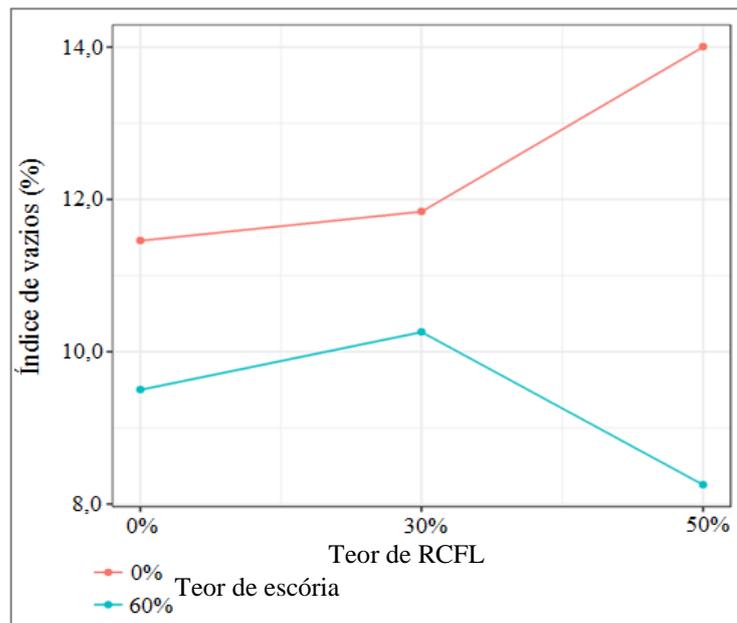


Figura 4.19 - Gráfico da resposta média de índice de vazios

### *Massa específica real*

Ao relacionar ambos os fatores, conforme apresentado na Figura 4.20, não foram constatadas mudanças drásticas nas distribuições da variável resposta quando os níveis do fator teor de RCFL são fixados, havendo apenas uma sutil diminuição da massa específica real nos concretos produzidos com cimento CP60 em relação aos concretos produzidos com CP00, não sendo possível afirmar que esta diminuição é significativa.

Na Tabela 4.14 pode ser observada a análise de variância ANOVA para o modelo estatístico adotado. O modelo com melhor adequação apresentou os dois fatores de interesse significativos à 5% de significância e sem interação, isto é, os fatores interferiram na variável resposta de forma independente.

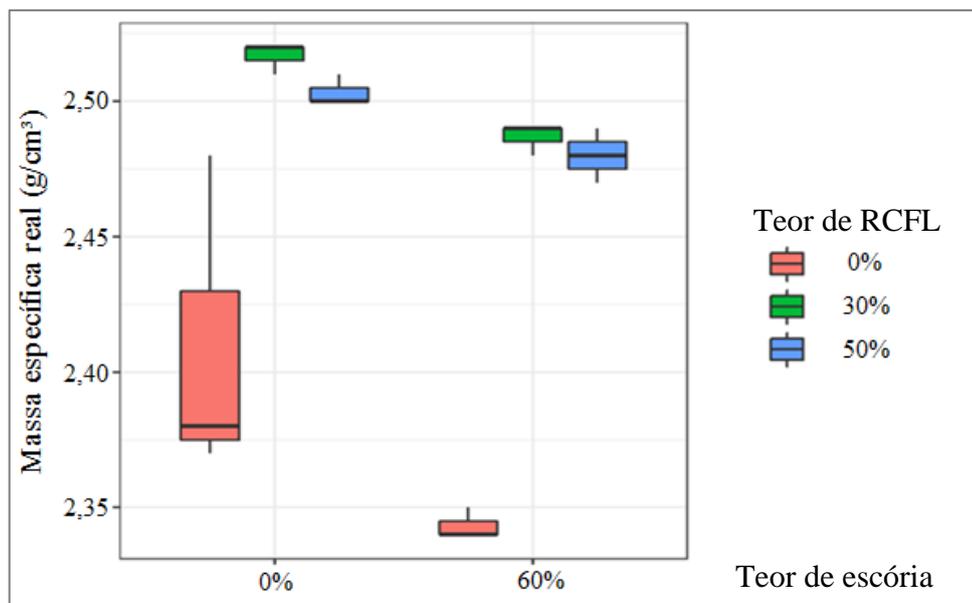


Figura 4.20 - *Boxplots* representando os resultados de massa específica real ao relacionar os fatores teor de escória e teor de RCFL

Tabela 4.14 - Resultados do ensaio de massa específica real ANOVA

Fator	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Soma dos quadrados médio	F	p-valor
Teor de escória	1	0,006	0,006	151	< 0,0001
Teor de RCFL	2	0,066	0,034	760	< 0,0001
Resíduos	13	0,0005	0,00004		

Com o gráfico de resposta média apresentado na Figura 4.21 observa-se falta de interação entre os fatores, sendo evidente pelo posicionamento paralelo entre as linhas. Deste modo, as comparações múltiplas foram realizadas sem a fixação do nível do outro fator, visto que não houve interação entre os fatores.

Em relação ao fator teor de escória observou-se baixa diferença na massa específica real com a variação dos teores. Para o fator teor de RCFL foi constatada diferença entre os níveis 0% e 30% e 0% e 50%, mas não foram observadas grandes alterações entre os níveis 30% e 50%, indicando um aumento da massa específica real a partir de 30% de substituição dos agregados miúdos naturais por agregados miúdos de RCFL.

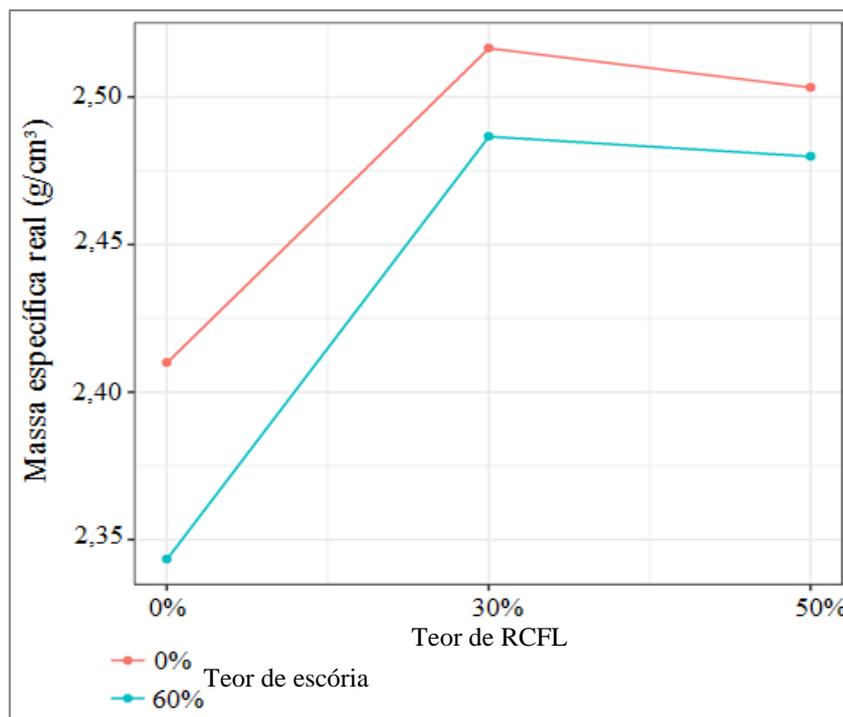


Figura 4.21 - Gráfico representativo da resposta média da massa específica real

#### 4.7 Migração de íons cloreto

A resistência à penetração de íons cloreto nos concretos produzidos foi determinada nas idades de 28, 63, 91, 126 e 182 dias com a realização de ensaios de migração, em estado não estacionário conforme procedimentos prescritos na norma NT BUILD 492 (NORDTEST, 1999).

Na Tabela 4.15 e no Quadro 4.1 podem ser observados os valores parciais médios aferidos durante a condução dos ensaios para os traços de concretos produzidos com o cimento CP00 e com o cimento CP60, respectivamente. O ensaio é baseado no procedimento pormenorizado na seção 3.3.6, todos os valores apurados nesta etapa fundamentam o cálculo dos coeficientes de migração e especificam e mostram indiretamente a capacidade de resistência dos concretos à penetração de íons cloreto.

A mensuração da profundidade de penetração de íons cloreto após as amostras serem submetidas à aspersão de nitrato de prata constitui outro dado fundamental na avaliação da resistência à penetração de íons cloreto das amostras. O aspecto das profundidades mensuradas

pode ser observado na Tabela 4.16 e no Quadro 4.2. Deste modo, o cálculo dos coeficientes de migração de íons cloreto, em estado não estacionário, das amostras foi realizado considerando os valores apurados durante a condução do ensaio, por meio da fórmula empírica detalhada na Equação 3.9 e estão apresentados na Tabela 4.17 e na Figura 4.22.

De acordo com os resultados obtidos constatou-se que a utilização de agregados reciclados em substituição parcial aos agregados naturais nos concretos impactou significativamente os traços produzidos com o cimento CP00. Para todas as idades investigadas, os coeficientes de difusão médios dos concretos produzidos com teor de 30% de RCFL foram inferiores aos do traço de referência, ao passo que, o aumento do teor de RCFL para 50% provocou aumento dos coeficientes. Apurou-se que aos 182 dias, os concretos produzidos com teor de 30% de RCFL exibiram redução do coeficiente de difusão médio de 24% ao passo que, o aumento do teor para 50% provocou um aumento de 24% quando relacionados ao traço de referência.

Tabela 4.15 – Valores médios obtidos com a realização do ensaio de penetração de íons cloreto (CP00)

Traço	Idade (dias)	Corrente inicial $I_{30}$ (mA)	Voltagem elétrica (V)	Profundidade de penetração (mm)
CR-00	28	96,1 ± 4	20	30 ± 1
	63	80,5 ± 6	25	33,5 ± 1
	91	81,2 ± 5	25	31,9 ± 1
	126	80,9 ± 3	25	35 ± 1
	182	83,6 ± 5	25	38,9 ± 2
CAR-00-30	28	80,7 ± 4		29,6 ± 2
	63	77,1 ± 3		26,3 ± 1
	91	71,3 ± 2	25	26,1 ± 1
	126	73 ± 2		28 ± 1
	182	74,3 ± 4		30,3 ± 2
CAR-00-50	28	121,3 ± 8		33,5 ± 0,6
	63	111,5 ± 6		34 ± 1
	91	105,8 ± 4	20	31,8 ± 1
	126	115,1 ± 2		34,7 ± 2
	182	108,6 ± 3		38,6 ± 1

Quadro 4.1 - Aspecto das penetrações nas amostras dos traços produzidos com cimento CP00 por idade

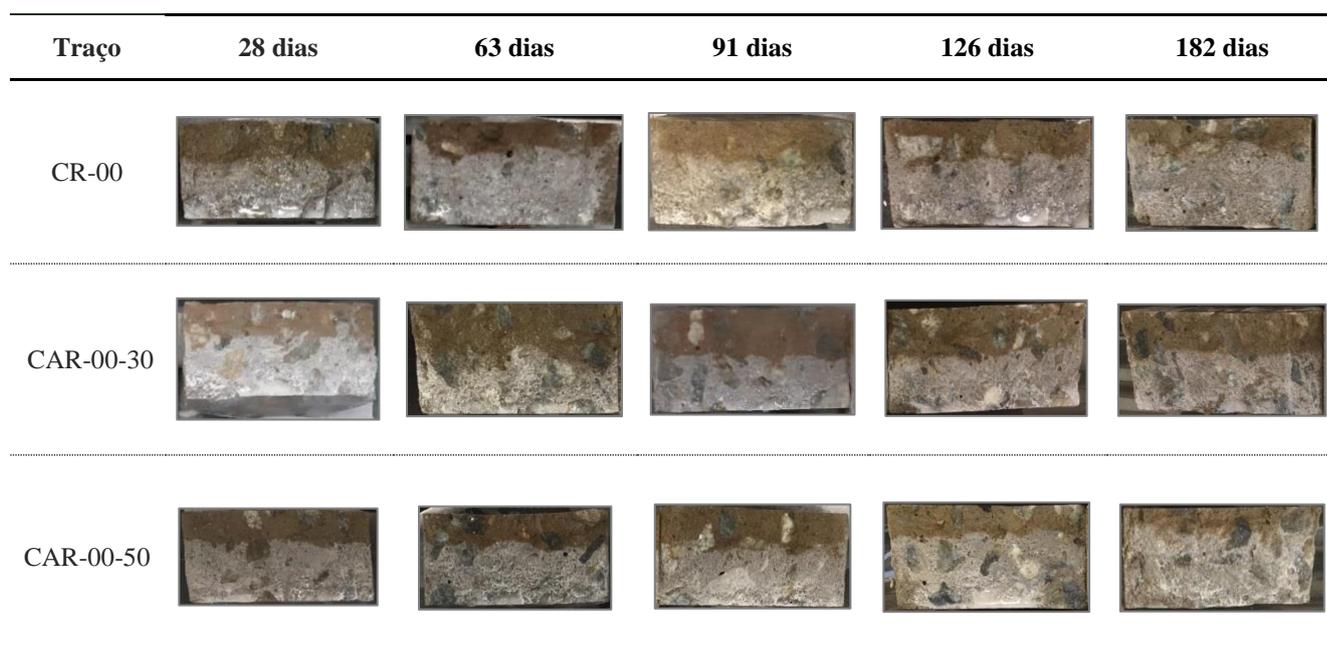


Tabela 4.16 - Valores médios obtidos com a realização do ensaio de penetração de íons cloreto (CP60)

Traço	Idade (dias)	Corrente inicial $I_{30}$ (mA)	Voltagem elétrica (V)	Profundidade de penetração (mm)
CR-60	28	$16,2 \pm 1$	50	$9,7 \pm 1$
	63	$13,2 \pm 1$	60	$11,4 \pm 1$
	91	$11,3 \pm 1$	60	$11,1 \pm 1$
	126	$10,7 \pm 0,4$	60	$4,6 \pm 1$
	182	$9,3 \pm 0,5$	60	$14,7 \pm 1$
CAR-60-30	28	$13,7 \pm 0,3$		$10,8 \pm 1$
	63	$11,4 \pm 0,4$		$9,4 \pm 1$
	91	$11,1 \pm 1$	60	$13,2 \pm 2$
	126	$10,1 \pm 0,2$		$14,9 \pm 2$
	182	$8,1 \pm 0,3$		$15,9 \pm 3$
CAR-60-50	28	$13,3 \pm 0,3$		$11,9 \pm 1$
	63	$10,6 \pm 0,2$		$8,6 \pm 2$
	91	$9,7 \pm 0,2$	60	$19 \pm 3$
	126	$8,7 \pm 0,3$		$14,9 \pm 3$
	182	$8,5 \pm 0,2$		$13,6 \pm 1$

Quadro 4.2 - Aspecto das penetrações nas amostras dos traços produzidos com cimento CP60 por idade

Traço	28 dias	63 dias	91 dias	126 dias	182 dias
CR-60					
CAR-60-30					
CAR-60-50					

Tabela 4.17 - Resultados dos coeficientes de migração de íons cloretos

Traço	Coeficiente médio de difusão ( $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ )				
	28 dias	63 dias	91 dias	126 dias	182 dias
CR-00	$21,85 \pm 1,1$	$19,54 \pm 0,6$	$18,48 \pm 0,7$	$20,48 \pm 0,8$	$23,38 \pm 1,4$
CAR-00-30	$16,98 \pm 0,9$	$14,97 \pm 0,3$	$15,11 \pm 0,7$	$16,39 \pm 0,5$	$17,69 \pm 0,9$
CAR-00-50	$24,63 \pm 0,4$	$24,97 \pm 0,5$	$23,11 \pm 0,9$	$25,90 \pm 1,9$	$29,05 \pm 1,2$
CR-60	$2,62 \pm 0,4$	$2,60 \pm 0,2$	$2,56 \pm 0,3$	$0,98 \pm 0,3$	$1,70 \pm 0,2$
CAR-60-30	$2,49 \pm 0,3$	$2,15 \pm 0,2$	$3,08 \pm 0,6$	$1,71 \pm 0,3$	$1,85 \pm 0,3$
CAR-60-50	$2,72 \pm 0,3$	$1,94 \pm 0,4$	$2,28 \pm 0,3$	$1,74 \pm 0,3$	$1,57 \pm 0,09$

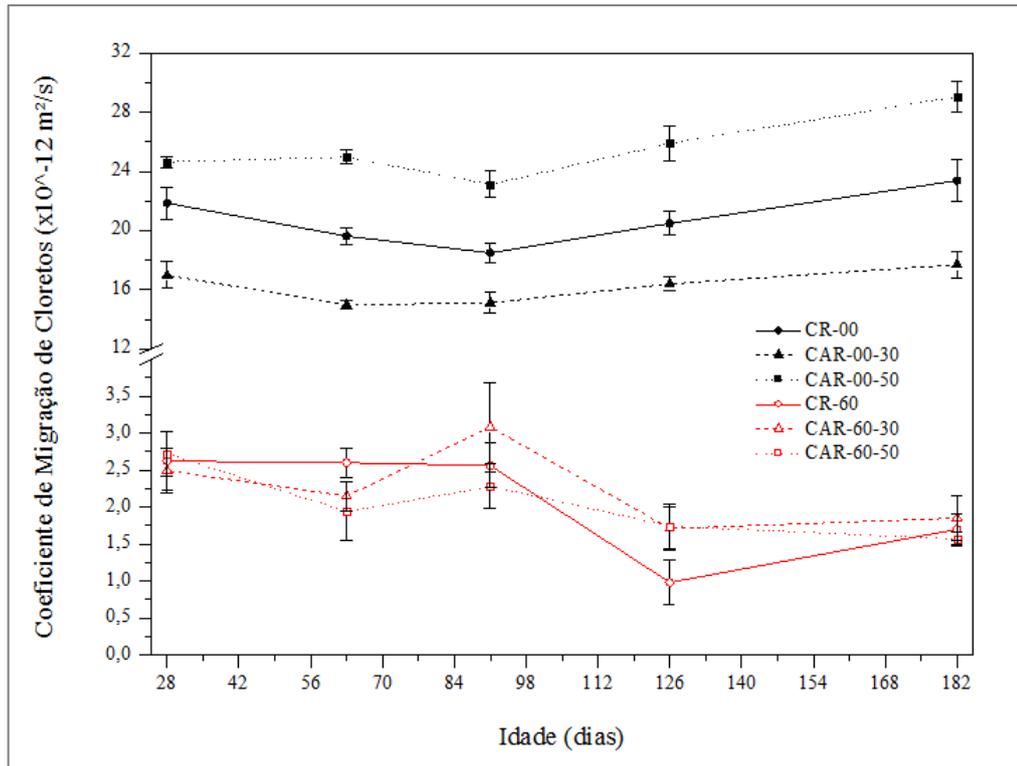


Figura 4.22 - Evolução dos coeficientes de migração de íons cloreto nos concretos em função do tempo

Na Tabela 4.18 pode-se observar, para as cinco idades investigadas, os percentuais de variação dos coeficientes médios de difusão, em relação aos traços de referência dos concretos produzidos.

Tabela 4.18 - Variação dos coeficientes médios de difusão em relação aos traços de referência

Variação dos coeficientes médios de difusão por idade (%)					
Traço	28 dias	63 dias	91 dias	126 dias	182 dias
CAR-00-30	-22%	-24%	-18%	-20%	-24%
CAR-00-50	+13%	+27%	+25%	+26%	+24%
CAR-60-30	-5%	-17%	+20%	+74%	+9%
CAR-60-50	+4%	-25%	-11%	+76%	-8%

Com a obtenção dos resultados foi constatado que o uso do CP60 provocou uma redução significativa dos coeficientes de difusão dos concretos produzidos com os teores de 0%, 30% e 50% de RCFL indicando menor permeabilidade nestes traços em relação aos traços produzidos

com o cimento CP00. Na Tabela 4.19 observa-se os percentuais de redução observados com a utilização do cimento CP60 em relação aos respectivos traços produzidos com o cimento CP00.

Tabela 4.19 - Redução dos coeficientes médios de difusão dos concretos produzidos com CP60 em relação aos respectivos traços produzidos com CP00

<b>Percentuais de redução dos coeficientes médios de difusão por idade</b>					
<b>Teor de RCFL</b>	<b>28 dias</b>	<b>63 dias</b>	<b>91 dias</b>	<b>126 dias</b>	<b>182 dias</b>
0%	88%	87%	86%	95%	93%
30%	85%	86%	80%	90%	90%
50%	89%	92%	90%	93%	95%

No tocante ao desempenho com o avanço do tempo, uma tendência de aumento dos coeficientes foi observada da idade de 91 dias para 126 dias e para 182 dias, para os traços produzidos com o cimento CP00. Os resultados são coerentes aos relatados por ÅRSKOG *et al.* (2007) *apud* GJØRV, (2014) que também verificaram um singelo aumento dos coeficientes com o passar do tempo, conforme pôde ser observado na Figura 2.13 do Capítulo 2 deste trabalho. Sugere-se que essas variações são atribuídas às condições de cura as quais os corpos de prova foram submetidos. A utilização de água potável com a ausência de cal pode ter propiciado um processo de lixiviação dos corpos de prova, onde ocorreu a perda de hidróxido de cálcio, conduzindo ao aumento dos coeficientes de migração de íons cloreto nas idades mais avançadas conforme o observado.

Ademais, ao contrário do verificado nos concretos produzidos com o cimento CP00, observou-se que os concretos produzidos com o cimento CP60 apresentaram melhoria da resistência frente à penetração de íons cloreto com o avanço das idades. Tal fato justifica-se devido à escória de alto forno ser menos reativa que o cimento Portland. Ademais, o aumento dos teores de RCFL acarretou em diferenças entre os resultados dos coeficientes de migração quando mantidos o teor de escória e a idade dos concretos, sendo este um fator interveniente relevante. Tais diferenças foram mais expressivas quando provenientes dos resultados relacionados aos concretos produzidos com cimento CP00. Estes apresentaram menor resistência à penetração de íons cloreto. Tal comportamento, já era condizente com a literatura e esperado em decorrência do uso deste cimento.

Baseando-se nos valores de referência observados na Tabela 2.3 do presente trabalho, que classificam os resultados dos coeficientes de difusão apurados para o ensaio de migração por íons cloretos, para os concretos produzidos com o cimento CP00, mesmo que a substituição de 30% de agregados miúdos naturais por agregados de RCFL tenha provocado redução dos coeficientes de difusão apurados, esta não foi suficiente para classificar os concretos produzidos ao menos como de resistência moderada, em praticamente nenhuma idade investigada. Já para os concretos produzidos com o cimento CP60, todos os traços testados, independente do teor de RCFL, ocasionaram em coeficientes de difusão, na idade de 28 dias, que se enquadravam na classificação de resistência muito alta e de resistência extremamente alta nas idades mais avançadas.

Em relação aos estudos disponibilizados na literatura, Kou *et al.* (2012a) indicaram redução do desempenho dos concretos produzidos frente à penetração por íons cloreto com o aumento do teor de agregados reciclados nas misturas. Já Pedro *et al.* (2014) observaram resultados de resistência à penetração por íons cloretos dos concretos produzidos com classe de resistência mais elevada equiparados aos resultados observados nos concretos de referência. Provavelmente, os resultados obtidos são divergentes aos constatados neste estudo em função da diferença do sistema de beneficiamento do agregado reciclado e pela estratégia de aplicação adotada.

#### *- Análise estatística dos resultados de resistência à penetração de íons cloreto*

As análises estatísticas dos resultados de resistência à penetração de íons cloreto foram realizadas considerando como fatores intervenientes, o teor de escória (0% e 60%), o teor de RCFL (0%, 30% e 50%) e as idades de realização dos ensaios (28, 63, 91, 126 e 182 dias) resultando em um banco de dados com um total de 180 observações. Ao relacionar os três fatores (FIGURA 4.22), teor de escória, teor de RCFL e idade identificou-se que a distribuição dos resultados de resistência à penetração de íons cloreto mantém um padrão semelhante, variando-se unicamente a escala dos resultados. O modelo mais adequado para esta variável resposta foi o modelo com todos os fatores e suas respectivas interações. Foi necessária a aplicação de uma transformação do tipo raiz quadrada na variável resposta para reparar a falta de normalidade dos resíduos e variância constante. Na Tabela 4.19 pode ser observada a análise de variância ANOVA para o modelo estatístico que foi adotado.

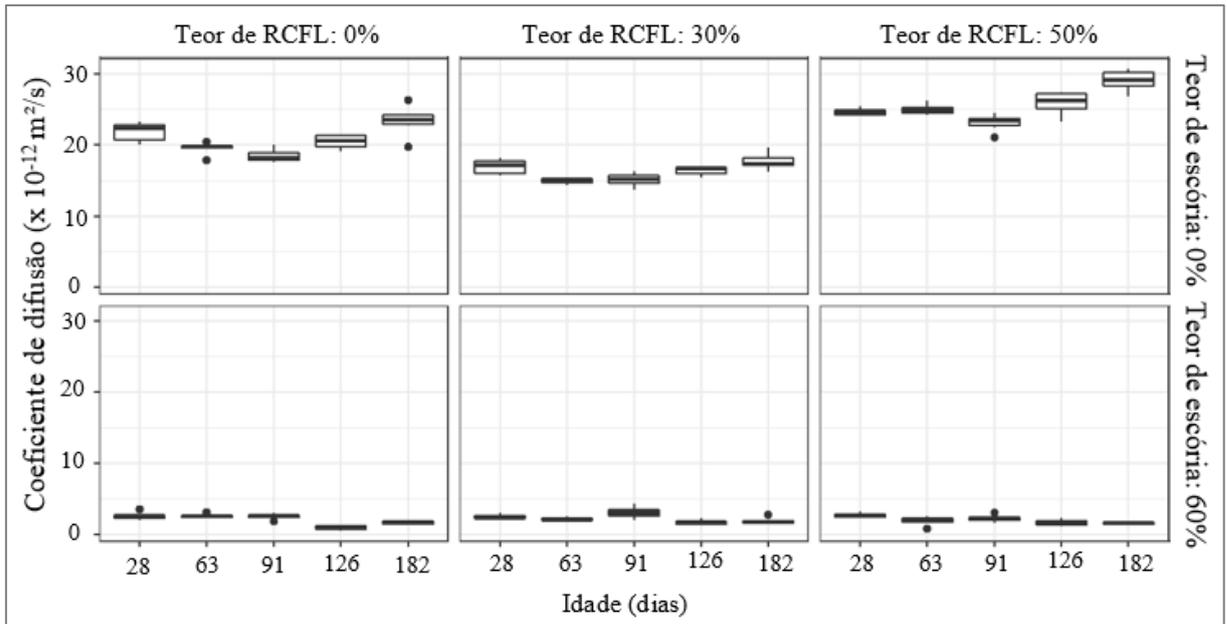


Figura 4.23 - *Boxplots* representando os resultados de migração de íons cloreto relacionar os três fatores

Tabela 4.20 - Resultados do ensaio de resistência à penetração de íons cloreto ANOVA

Fator	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Soma dos quadrados médio	F	p-valor
Teor de escória	1	432,2	432,2	23290,126	< 0,005
Teor de RCFL	2	6,8	3,4	183,666	< 0,005
Idade (dias)	4	1,1	0,3	14,859	< 0,005
Interação teor de escória e teor de RCFL	2	9,0	4,5	241,976	< 0,005
Interação entre teor de escória e idade	4	3,7	0,9	50,466	< 0,005
Interação entre teor de RCFL e idade	8	0,5	0,1	3,666	< 0,005
Interação entre os três fatores	8	0,5	0,1	4,408	< 0,005
Resíduos	150	2,8	0		

A análise de variância ANOVA permitiu observar que todos os fatores, bem como as interações, foram considerados significativos a 5% de significância. Deste modo, a ocorrência de interação entre os fatores investigados foi constatada, e por este motivo realizaram-se comparações múltiplas entre os seus níveis, fixando-se os níveis dos demais fatores considerados.

Com a fixação dos fatores teor de RCFL e do fator idade, o aumento do teor de substituição de cimento Portland por escória de alto forno de 0% para 60% implicou em diferenças expressivas nos resultados dos coeficientes de migração de íons cloreto. Minorações dos valores dos coeficientes de migração e baixa diferença dos resultados com o avanço das idades foram observadas em todos os concretos avaliados, indicando maior resistência à penetração de íons cloreto para todos os concretos produzidos com cimento CP60 quando comparados aos concretos produzidos com o cimento CP00.

O avanço dos níveis do fator idade implicou em diferenças entre os valores dos coeficientes de migração entre os níveis dos fatores teor de escória e teor de RCFL investigados, contudo um padrão não foi observado. A Figura 4.23 apresenta o gráfico de resposta média para a variável resposta resistência à penetração de íons cloreto.

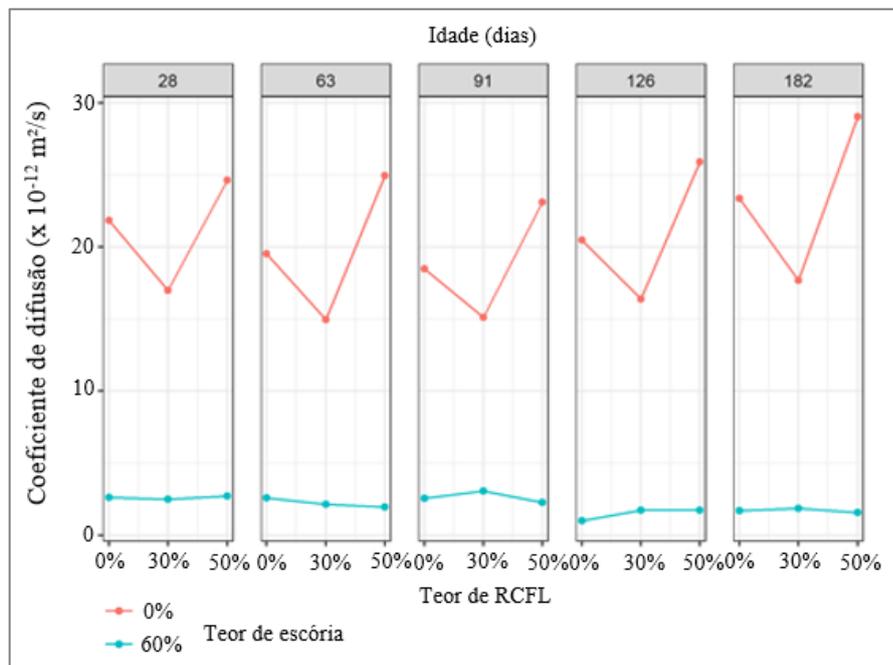


Figura 4.24 - Gráfico da resposta média dos resultados de migração de íons cloreto

Em geral, identificou-se correlação nos resultados obtidos no que tange ao desempenho dos concretos produzidos em relação às propriedades testadas e em relação às características observadas nos materiais empregados na produção dos concretos. Observou-se a ocorrência de maior variabilidade entre os resultados de resistência mecânica, para os concretos produzidos com o cimento com escória e com agregados miúdos de RCFL. Observou-se também alta variabilidade nos resultados de todos os demais ensaios realizados para os concretos produzidos

com agregados reciclados de RCFL. Provavelmente, devido à maior heterogeneidade destes materiais em relação ao cimento CPV ARI e às areias naturais. Adicionalmente, constatou-se que o desempenho dos concretos produzidos neste estudo diferenciou-se do observado na literatura, fato este que, justifica-se na diferença das estratégias adotadas e dos materiais empregados pelos distintos pesquisadores no desenvolvimento dos trabalhos verificados.

Com a realização dos ensaios de resistência à compressão axial, de resistência à tração por compressão diametral e de migração de íons cloretos constatou-se que o uso concomitante dos agregados reciclados de RCFL na substituição dos agregados naturais em diferentes teores, e do cimento com escória, propiciou a formação de produtos de hidratação mais resistentes. Os resultados obtidos levam a crer, que houve um refinamento da microestrutura dos concretos produzidos, o que conduziu ao aumento do grau de empacotamento da matriz cimentícia. Tais características podem ter sido responsáveis pelo melhor desempenho observado nos concretos produzidos com agregados reciclados de RCFL em diferentes teores em conjunto com o cimento com escória.

Como os agregados miúdos reciclados de RCFL apresentaram massa específica inferior à massa específica dos agregados miúdos naturais, esperava-se que os concretos produzidos com os agregados reciclados apresentassem massa específica real inferior aos traços de referência, fato constatado no estudo desenvolvido por Kou *et al.* (2012a). Contudo, isto não foi observado, reforçando a possibilidade de ocorrência do aumento do grau de empacotamento da matriz cimentícia nos concretos produzidos com a substituição parcial de agregados miúdos naturais por agregados miúdos de RCFL, acentuando-se nos traços produzidos com cimento com escória. Esta suposição condiz com os resultados observados em relação à finura dos grãos de agregados miúdos naturais, dos agregados miúdos de RCFL e das composições, além de ser condizente com os resultados de finura dos cimentos CP00 e CP60 empregados na produção dos concretos.

Os resultados apurados nos ensaios de absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão e índice de vazios, indicaram também a ocorrência de menor porosidade aberta acarretando em redução da permeabilidade. Em observância aos resultados obtidos na caracterização da escória de alto forno granulada utilizada para substituir parcialmente o cimento Portland empregado na produção dos concretos desta pesquisa, presume-se que a escória de alto forno atuou quimicamente e fisicamente na redução da porosidade dos concretos

produzidos. Conforme mencionado, observou-se diferenças nos resultados obtidos em relação a literatura consultada acerca da utilização de agregados reciclados na produção de concretos. Ao passo que este estudo indicou que os concretos produzidos apresentaram a formação de produtos de hidratação mais resistentes, um maior refinamento da microestrutura e um aumento do grau de empacotamento conduzindo a concretos menos permeáveis e mais resistentes, alguns pesquisadores obtiveram conclusões diferentes.

Zega e Di Maio (2011) sugerem que os agregados reciclados apresentavam maior porosidade e menor rigidez em relação aos agregados naturais devido à presença de argamassa em sua constituição. Todavia os concretos produzidos com o uso destes apresentaram melhoria na zona de transição entre o agregado reciclado e a argamassa. Os resultados obtidos em relação à resistência mecânica e durabilidade foram inferiores aos apurados nos concretos de referência, contudo, segundo os autores, aceitáveis. Kou *et al.* (2012a) constataram em seus estudos que os agregados reciclados de RCFL eram menos resistentes, com menor densidade, mais porosos e com alta absorção de água em relação aos agregados naturais. Tal fato conduziu à resultados inferiores de resistência mecânica e à penetração de íons cloreto nos concretos produzidos com agregados reciclados em relação aos concretos de referência. Entretanto os concretos foram classificados como resistentes à ambientes de agressividade moderada de acordo com a C 1202 (ASTM, 2009). Sérifou *et al.* (2013) esclareceram que os concretos produzidos em seus estudos apresentaram aumentada porosidade na zona de transição entre os agregados reciclados e a nova mistura, o que conduziu, segundo os autores, à redução da resistência mecânica e aumento da permeabilidade. Em relação à substituição parcial de Cimento Portland por escória de alto forno o desempenho observado neste estudo é comparável ao verificado por Magalhães (2019) no que diz respeito à absorção de água. O autor constatou que o uso deste material acarretou no refinamento da estrutura de poros da pasta de cimento hidratada o que contribuiu na redução da porosidade dos concretos produzidos.

Tendo em vista os resultados apurados com a realização dos ensaios, propõe-se que, considerando todos os materiais empregados nesta pesquisa e suas respectivas proporções apuradas por meio da etapa de dosagem, dentre os teores pesquisados, os concretos com a substituição parcial de 50% de agregados miúdos naturais por agregados miúdos de RCFL conjuntamente com o teor de 60% de substituição de cimento Portland por escória de alto forno apresentaram o melhor desempenho.

# 5

## CONCLUSÃO

Este capítulo dedica-se à apresentação das conclusões finais baseadas nos resultados obtidos a partir da execução do plano experimental relatado neste estudo.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios realizados de caracterização física dos agregados miúdos de RCFL, observou-se que, apesar de, isoladamente, apresentarem características que diferem dos teores estabelecidos nos requisitos normativos no que se refere a granulometria, ao módulo de finura e ao teor de materiais pulverulentos, as composições estudadas neste estudo atendem à estes requisitos, apresentando teores dentro dos indicados nas respectivas normas. Quanto a caracterização química dos agregados miúdos de RCFL utilizados nesta pesquisa os resultados indicaram uma prevalência de areia gnáissica, pasta de cimento residual e cimento anidro na composição das amostras ensaiadas.

A consistência dos concretos produzidos ficou dentro dos intervalos estabelecidos para este trabalho. A utilização de aditivo superplastificante foi requerida para ajustar a trabalhabilidade que se apresentou prejudicada com a alta absorção de água dos agregados miúdos de RCFL, cenário igualmente verificado por Sérifou *et al.* (2013) em seus estudos. Esta condição poderia ocasionar na necessidade de aumento da quantidade de água necessária à moldagem dos corpos de prova. Tal característica poderia acarretar em concretos com alta absorção de água e elevada porosidade conforme identificado por Correia *et al.* (2009), Kou *et al.* (2012a), Pedro *et al.* (2014) e Sérifou *et al.* (2013) em seus estudos. Nos diferentes traços de concreto, a porção de aditivo utilizada sofreu maior variação em função dos teores de RCFL do que em função dos teores de escória, indicando que o tipo de cimento, por si só, não influenciou significativamente na trabalhabilidade.

A resistência característica à compressão, de todos os traços produzidos, atenderam às exigências da NBR 6118 (ABNT, 2014) para concretos da classe de agressividade III, proposta

para este trabalho, que exige resistência à compressão, aos 28 dias, maior ou igual a 30 MPa, para uma relação água/cimento, em massa, menor ou igual a 0,55 e consumo mínimo de cimento Portland de pelo menos 320 kg/m<sup>3</sup> (neste estudo fixou-se um consumo de 340 kg/m<sup>3</sup>).

Esperava-se que os concretos produzidos com cimento Portland puro (CP00), com hidratação mais rápida, obtivessem resistências à compressão iniciais mais elevadas e um reduzido incremento destas com o avanço do tempo, quando comparados com os concretos produzidos com cimento com escória (CP60). Esta situação foi verificada no traço de referência e no traço de teor de RCFL de 30% (CR-00 e CAR-00-30).

O aumento do teor de RCFL de 30% para 50% implicou, nos concretos produzidos com cimento com escória, em um aumento expressivo dos resultados de resistência à compressão já na idade de 3 dias. Apesar da escória de alto forno ser um material de menor reatividade em relação ao cimento Portland puro, a presença de um teor mais elevado de RCFL contribuiu no aumento das resistências nestas idades. Deste modo, a associação de 60% de substituição de cimento Portland por escória de alto forno e da substituição de 50% de agregados naturais por RCFL propiciou a obtenção das mais elevadas resistências à compressão observadas no plano experimental. Sugere-se que a melhoria de desempenho desta propriedade é proveniente do refinamento da microestrutura dos concretos produzidos com cimento Portland de escória de alto forno associado à incorporação das partículas finas do agregado miúdo de RCFL, que implicou no aumento do grau de empacotamento da matriz cimentícia, propiciando condições para o aumento da resistência à compressão.

Do mesmo modo que os resultados observados para a resistência à compressão axial, a análise dos resultados de resistência à tração indicou uma tendência de aumento das resistências com o aumento do teor de RCFL nos concretos produzidos utilizando-se cimento com escória. Para os concretos produzidos com cimento Portland puro houve um aumento seguido de decréscimo com a variação dos teores de RCFL. Deste modo, a substituição parcial de agregados naturais por agregados de RCFL se comportou como um fator de interveniência relevante, assim como a sua associação à substituição de 60% do cimento Portland por escória granulada de alto forno nos concretos produzidos. Propõe-se que as razões sugeridas para as melhorias de desempenho observadas no tocante à resistência à compressão também explicam as melhorias observadas nos resultados de resistência à tração.

Em relação ao módulo de elasticidade, apesar de pequenas variações terem sido observadas entre os resultados dos diferentes traços de concreto produzidos, a análise estatística não apurou interveniência nos resultados da variação dos teores de RCFL e de escória, evidenciando que nenhum efeito foi constatado nesta propriedade com a substituição dos agregados de RCFL tampouco para a substituição parcial de cimento Portland por escória de alto forno.

A utilização do cimento com escória (CP60) provocou minoração expressiva da absorção de água por capilaridade indicando que a substituição de 60% de cimento Portland por escória de alto forno ocasionou em menor porosidade aberta e no refinamento da microestrutura. A substituição parcial de agregados naturais por agregados de RCFL ocasionou no aumento da absorção de água por capilaridade conforme o aumento do teor. Em geral, os aumentos são atribuídos à característica de maior porosidade e absorção de água dos agregados reciclados utilizados nas misturas. Ainda assim, os traços produzidos com cimento de escória (CP60) e teores de 30% e 50% de RCFL (CAR-60-30 e CAR-60-50) resultaram em concretos com menor absorção de água por capilaridade do que os respectivos traços (CAR-00-30 e CAR-00-50) produzidos com cimento Portland puro (CP00).

Em relação ao desempenho dos concretos quanto a resistência à absorção de água por imersão e ao índice de vazios as análises estatísticas apontaram que o fator interveniente mais efetivo foi a variação do teor de escória. Observou-se correlação direta entre estas propriedades sendo evidenciado que os concretos produzidos com cimento de escória (CP60) apresentavam menores percentuais de absorção de água e índice de vazios do que os cimentos puros (CP00) para todos os teores de RCFL verificados. Tais resultados reforçam as conclusões observadas no ensaio de absorção de água por capilaridade.

A caracterização física apresentada no capítulo 3 deste estudo, apontou que a massa específica dos agregados reciclados de RCFL é inferior à massa específica apurada dos agregados reciclados naturais. Deste modo, em relação à esta propriedade, esperava-se que, com o aumento do teor de RCFL, os concretos apresentassem diminuição da massa específica real o que não foi observado. Presume-se que a ocorrência de melhor empacotamento na matriz dos concretos produzidos possa ter sido responsável pelos resultados obtidos.

A associação da substituição parcial do cimento Portland por 60% de escória de alto forno e a substituição parcial de 50% dos agregados miúdos naturais por agregados reciclados de RCFL

resultou em concretos com melhores propriedades mecânicas, menor absorção de água e índice de vazios e menor coeficiente de migração de íons cloretos quando comparados aos demais concretos. Este fato reforça os conceitos expostos na literatura consultada de que a formação de produtos de hidratação mais resistentes, um maior refinamento da microestrutura dos concretos produzidos e o aumento do grau de empacotamento da matriz cimentícia acarreta na redução da permeabilidade. Assim, a associação da substituição parcial de cimento Portland por escória granulada de alto forno e o uso de agregados miúdos de RCFL se mostrou benéfica na redução da penetração de íons cloretos nos concretos nos teores investigados. Ademais, de acordo com os resultados observados, a utilização do cimento CP60 implicou em reduções mais significativas dos coeficientes em relação ao uso do cimento CP00. Tais constatações sugerem que a escória de alto forno atuou quimicamente e fisicamente na redução da porosidade dos concretos produzidos.

Constatou-se ainda que, apesar da substituição de 30% de agregados naturais por agregados reciclados ter aumentado a resistência à penetração de íons cloretos em relação ao traço de referência (CR-00), esta não foi capaz de produzir uma melhoria que os classificasse ao menos como pertencentes a uma classe de resistência moderada, tanto na idade de 28 dias, quanto em praticamente nenhuma das demais idades investigadas. Já para os concretos produzidos com cimento com escória, todos apresentaram coeficientes de difusão classificados como de resistência muito alta, na idade de 28 dias, e de resistência extremamente alta nas idades mais avançadas.

Por meio das análises dos resultados verificados neste estudo, observou-se, em um contexto geral, correlação entre os parâmetros de qualidade investigados. Considerando as idades mais avançadas, observou-se que a substituição parcial de agregados naturais por agregados de RCFL e de cimento Portland por escória de alto forno implicaram simultaneamente no aumento da resistência mecânica e na melhoria das propriedades físicas e de durabilidade dos concretos. Deste modo, com base nos resultados ora apresentados, verificou-se que, os concretos produzidos apresentaram condições satisfatórias para serem utilizados com finalidade estrutural.

# 6

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO - AMERICAN ASSOCIATION OF STATE AND HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS - T-259-02: *Standard Method of Test for resistance of concrete to Chloride Ion penetration*. Washington, DC. American Association of State and Highway Transportation Officials, 2017. 4p.

AASHTO - AMERICAN ASSOCIATION OF STATE AND HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS - T-277-15: *Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. Washington, DC. American Association of State and Highway Transportation Officials, 2017. 14p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 12655: *Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento*. Rio de Janeiro ABNT - Associação Brasileira de Normas técnicas, 2015. 23p.

\_\_\_\_\_. NBR 14724: *Informação e documentação - Trabalhos acadêmicos – Apresentação*. Rio de Janeiro ABNT - Associação Brasileira de Normas técnicas, 2011. 11p.

\_\_\_\_\_. NBR 15116: *Agregados reciclados de resíduos da construção civil- Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos*. Rio de Janeiro ABNT - Associação Brasileira de Normas técnicas, 2004. 12p.

\_\_\_\_\_. NBR 15900-1: *Água para amassamento do concreto - Parte 1: Requisitos*. Rio de Janeiro ABNT - Associação Brasileira de Normas técnicas, 2009. 15p.

\_\_\_\_\_. NBR 16697: *Cimento Portland - Requisitos*. Rio de Janeiro ABNT - Associação Brasileira de Normas técnicas, 2018. 12p.

\_\_\_\_\_. NBR 5738: *Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro ABNT - Associação Brasileira de Normas técnicas, 2015. 9p.

\_\_\_\_\_. NBR 5739: *Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro ABNT - Associação Brasileira de Normas técnicas, 2018. 9p.

\_\_\_\_\_. NBR 6118: *Projeto de estrutura de concreto - Procedimento*. Rio de Janeiro ABNT - Associação Brasileira de Normas técnicas, 2014. 238p.

\_\_\_\_\_. NBR 7211: *Agregados para concreto - Especificação*. Rio de Janeiro ABNT - Associação Brasileira de Normas técnicas, 2009. 11p.

\_\_\_\_\_. NBR 7222: *Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro ABNT - Associação Brasileira de Normas técnicas, 2011. 5p.

\_\_\_\_\_. NBR 7389-1: *Agregados: Análise petrográfica de agregado para concreto - Parte 1: Agregado miúdo*. Rio de Janeiro ABNT - Associação Brasileira de Normas técnicas, 2009.

\_\_\_\_\_. NBR 8522: *Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão*. Rio de Janeiro ABNT - Associação Brasileira de Normas técnicas, 2017. 16p.

\_\_\_\_\_. NBR 9778: *Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro ABNT - Associação Brasileira de Normas técnicas, 2005. 4p.

\_\_\_\_\_. NBR 9779: *Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade*. Rio de Janeiro ABNT - Associação Brasileira de Normas técnicas, 2012. 3p.

\_\_\_\_\_. NBR NM 45: *Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro ABNT - Associação Brasileira de Normas técnicas, 2006. 8p.

\_\_\_\_\_. NBR NM 46: *Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem*. Rio de Janeiro ABNT - Associação Brasileira de Normas técnicas, 2003. 6p.

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

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

ABREU, F. S. *Análise da durabilidade de concreto leve de argila expandida com camada protetora submetida a meio agressivo ácido*. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014, 57p.

ABREU, I. L. R. *Contribuição ao estudo da influência da utilização de agregados miúdos reciclados provenientes de usinas concreteiras na carbonatação do concreto*. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014, 94p.

ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 222: *Protection of Metals in Concrete Against Corrosion*. Farmington Hills. American Concrete Institute, 2002.

ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 318: *Building Code Requirements for Structural Concrete*. Farmington Hills. American Concrete Institute, 2008.

AHMARUZZAMAN, M. *A review on the utilization of fly ash*. Progress in Energy and Combustion Science. v. 36, p. 327-363, December. 2010.

ÅRSKOG, V.; FERREIRA, M.; LIU, G.; GJØRV, O. E. Effect of cement type on the resistance of concrete against Chloride Penetration. In: *proceedings, fifty International Conference on Concrete under Severe Conditions - Environment and Loading*. Editors: TOUTLEMOUNT, F.; SAKAI, K.; GJØRV, O. E.; BANTHIA, N. Paris, v.1, p. 367-374, 2007 *apud* GJØRV, O. E. *Durability Design of Concrete Structures in Severe Environments*. 2ª Edição. CRC Press, 2014.

ASADOLLAHFARDI, G.; ASADI, M.; JAFARI, H.; MORADI, A.; ASADOLLAHFARDI, R. *Experimental and statistical studies of using wash water from ready-mix concrete trucks and a batching plant in the production of fresh concrete*. Construction and Building Materials, Canada. v. 98, p. 305-314, July. 2015.

ASTM - AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS - C 1202-19: *Standart test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration*. West Conshohocken, USA. ASTM International, 2019.

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.

AUDO, M.; MAHIEUX, P. Y.; TURCRY, P.; CHATEAU, L.; CHURLAUD, C. *Characterization of ready-mixed concrete plants sludge and incorporation into mortars: Origin of pollutants, environmental characterization and impacts on mortars characteristics*. Journal of Clean Production, France. v.183, p. 153-161, February. 2018.

BAKKER, R. Initiation period. In: SCHIESSL, P. (Ed.) *Corrosion of steel in concrete*. New York: Chapman and Hall, p. 22-55, 1988.

BAROGHEL-BOUNY, V.; CAPRA, B.; LAURENS, S. A durabilidade das armaduras e do concreto de cobertura. 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.

BISWAS, A.; ADAVI, P. R. *Analysis of sludge formed in R.M.C plant*. Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara. India, 2012.

BUTTLER, A. M. *Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto: Influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Universidade de São Paulo, 2003, 199 p.

CAPMAS, A. Prólogo: Concreto e desenvolvimento sustentável. In: OLLIVIER, Jean-Pierre; VICHOT, Angélique (ed.). *Durabilidade do concreto: Bases científicas para formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente*. Ed. Tradução: ISAIA, G. C. Cap. 1. São Paulo: IBRACON, p. 3-13, 2014.

CASCUDO, O. O controle da corrosão de armaduras em concreto: Inspeção e Técnicas Eletroquímicas. São Paulo: Ed. PINI, 1997.

CASCUDO, O. *Influência das características do aço carbon destinado ao uso como armadura para concreto armado no comportamento frente à corrosão*. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2000.

CORREIA, S. L.; SOUZA, F. L.; DIENSTMANN, G.; SEGADÃES, A. M. *Assessment of the recycling potential of fresh concrete waste using a factorial design of experiments*. Waste Management, Brazil. v. 29, p 2886-2891, July. 2009.

CPH - COMISIÓN PERMANENTE DEL HORMIGÓN. EHE 08: *Instrucción de hormigón estructural*. Madrid. Centro de Publicaciones del Ministerio de Fomento de España, 2011. 804p.

ECS - EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 206-1: *Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity*. Bruxelas. European Committee for Standardization, 2000. 70p.

FERREIRA, R. B. *Influência das adições minerais nas características do concreto de cobertura e seu efeito na corrosão da armadura induzida por cloretos*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2003.

FIB - FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. Bulletin n° 34: *Model code for Service Life Design*. Lausana, Suíça. International Federation for Structural Concrete, 2006. 116p.

FIGUEIREDO, E. P. Efeitos da Carbonatação e de Cloretos no Concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.). *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. Vol. 2. Cap. 27. São Paulo: IBRACON, p. 829-855, 2005.

FIGUEIREDO, P. O.; EL HAJJ, T. M.; MACEDO, R. S.; ULSEN, C. *Influência dos métodos de britagem nas propriedades do agregado reciclado de concreto*. Ambiente Construído, v. 20, p. 99-111, Jun. 2020.

GJØRV, O. E. *Durability Design of Concrete Structures in Severe Environments*. 2ª Edição. CRC Press, 2014.

GJØRV, O. E. e VENNESLAND, Ø. *Effect of water/cement ratio on the porosity of a concrete based on pure Portland cement*. Cement and Concrete Research, v.9, p. 229-238, 1979 *apud* GJØRV, O. E. *Durability Design of Concrete Structures in Severe Environments*. 2ª Edição. CRC Press, 2014.

GURZEL, A. P.; MASANET, E.; HORVAT A.; STADEL, A. *Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review*. Cement and Concrete Composites,

USA. v. 51, p. 38-48, 2014.

HELENE, P. R. L. *A nova ABNT NBR 6118 e a vida útil das estruturas de concreto*. Congresso Ibero Americano de Patologia da Construção, 4, Porto Alegre, v.1, p. 1-30, 1997.

HELENE, P. R. L. *A nova NBR/2003 e a vida útil das estruturas de concreto*. 2º Seminário de Patologia de Edificações do Leme/ UFRGS, v.1, p. 1-30, 2004.

HELENE, P. R. L. *Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado*. Tese (Professor Livre Docente) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 248, fev. 1993.

HELENE, P. R. L. *Corrosão em armaduras para concreto armado*. 1ª ed. São Paulo: Pini, 1986.

HKBD - HONG KONG BUILDING DEPARTMENT. *Code of practice for precast concrete construction*. Hong Kong. Buildings Department, 2016. 85p.

HAUSMANN, D. A. *Steel corrosion in concrete: how does it occur?* Materials Protection, p. 19-23, 1967.

HOSSAIN, M. U.; XUAN, D.; POON, C. S. *Sustainable management and utilization of concrete slurry waste: A case study in Hong Kong*. Waste Management. v. 61, p.397-404, Feb. 2017.

KAZAZ, A.; ULUBEYLI, S.; ER, B.; ARSLAN, V.; ARSLAN, A.; ATICI, M. *Fresh ready-mixed concrete waste in construction projects: a planning approach*. Organization, Technology and management in construction, Turkey. v.7(2) p. 1280-1288, 2015.

KIM, H.; GOULIAS, D. G. *Shrinkage of sustainable concrete with crushed returned concrete aggregate*. Journal of materials in civil engineering. v. 27, p. 04014204, July. 2015.

KOU, S.; ZHAN, B.; POON, C. *Feasibility study of using recycled fresh concrete waste as coarse aggregates in concrete*. Construction and Building Materials, v. 28, p. 549-556, 2012a.

KOU, S.; ZHAN, B.; POON, C. *Properties of partition wall blocks prepared with fresh concrete wastes*. Construction and Building Materials, China. v. 36, p. 566-571, July. 2012b.

LA SENNA H. A.; RESENDE M. M. *Agregados para Construção Civil*. Departamento Nacional de Produção Mineral, São Paulo, 2013.

MAGALHÃES, T. A. *Análise da penetração de íons cloreto em compósitos cimentícios contendo diferentes teores de escória de alto-forno*. 183 p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2019.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais*. Coordenador HASPARYK, N. P. Tradução BORBA, C. 2ª Edição. Ibracon, 2014, 751p.

MEIRA, G. R. *Corrosão de armaduras em estruturas de concreto: Fundamentos, diagnóstico e prevenção*. João Pessoa: Editora IFPB, 2017. 127 p.

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.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do Concreto*, Tradução GIAMMUSSO, S. E. 2ª edição. Pini, 1997, 828 p.

NEVILLE, A. M.; BROOKS J. J. *Tecnologia do Concreto*, Tradução CREMONI, R. A. 2ª edição. Bookman, 2013. 448p.

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.

NT – NORDTEST - BUILD 443: *Concrete hardened: accelerated chloride penetration*. Espoo, Nordtest, 1995. 5p.

NT - NORDTEST - BUILD 492: *Concrete, mortar, and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments*. Finland NT - Nordtest, 1999.

NZS - NEW ZEALAND STANDARDS. NZS 3101: *Concrete structures standard - part 1. The design of concrete structures*. Wellington, New Zealand Standard. 2006. 309p.

OLLIVIER, J. P.; TORRENTI, J.M. 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.

ÖZBAY, E.; ERDEMIR, M.; DURMUS, H. I. *Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties - A review*. Construction and Building Materials, Turkey, v. 105, p. 423-434, December, 2015.

PEDRO, D.; DE BRITO, J.; EVANGELISTA L. *Influence of the use of recycled aggregates from different sources on structural concrete*. Construction and Building Materials, Brasil, v. 71, p. 141-151, 2014.

POLESELLO, E.; ROHDEN A. B.; MOLIN, D. C. D.; MASUERO, A. B. *Proposta para utilização total dos resíduos gerados por usinas dosadoras de concreto*. XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Canela: ENTAC, 2010.

REIS, F. J. L. *Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados provenientes de cerâmicas vermelhas com diferentes taxas de pré-saturação*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Pará, 2013, 141 p.

RUGHOOPUTH, R.; RANA, J. O.; JOORAWON, K. *Possibility of using fresh concrete waste in concrete for non-structural civil engineering works as a waste management strategy*. KSCE Journal of Civil Engineering, Korea, v. 21, p. 94-99, March. 2016.

SAGOE-CRENTSIL, K.; GLASSER, F. Analysis of the steel: concrete interface, Corrosion of Steel in Concrete. Threadaway WJ, 1990 apud CASCUDO, O. *Influência das características do aço carbon destinado ao uso como armadura para concreto armado no comportamento frente à corrosão*. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2000.

SANTOS, L. *Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto*. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil). Universidade de Brasília, 2006, 161 p.

SCHOON, J.; BUYSSER, K. D.; DRIESSCHE, I. V.; BELIE, N. D. *Feasibility study of the use of concrete sludge as alternative raw material for Portland clinker production*. Journal of Materials in Civil Engineering, Belgium. v. 27, p. 1-12, May. 2015.

SCHWING STETTER, Disponível em: <[www.schwingstetter.com.br](http://www.schwingstetter.com.br)> acesso em: 2 de janeiro de 2019, 16:30.

SENGUL, Ö. e GJØRV, O. E. Effect of blast furnace slag for increased concrete sustainability. In: *Proceedings, International Symposium on Sustainability in the Cement and Concrete Industry*. Editors: JACOBSEN S.; JAHREN, P.; KJELLEN, K. O. Norwegian Concrete Association, Oslo, p. 248-256, 2007 apud GJØRV, O. E. *Durability Design of Concrete Structures in Severe Environments*. 2ª Edição. CRC Press, 2014.

SÉRIFOU, M.; SBARTAÏ, Z. M.; YOTTE, S.; BOFFOUÉ, M. O.; EMERUWA, E.; BOS, F. *A Study of Concrete Made with Fine and Coarse Aggregates Recycled from Fresh Concrete Waste*. Journal of Construction Engineering, v. 2013, p. 1-5, 2013.

SILVA, G. A. O. *Avaliação da durabilidade de concretos contendo agregados reciclados de resíduos de construção civil (RCC)*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2017, 185 p.

SILVA, F. G. da. *Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos*. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006, p 220.

SISOMPHON K.; COPUROGLU, O.; FRAAIJ, A.L.A. *Development of blast furnace slag mixtures against frost salt attack*. Cement and Concrete Composites, Netherlands. v. 32, p. 630-638, June. 2010.

TESSARI, R. *Estudo da capacidade de proteção de alguns tipos de cimentos nacionais, em relação à corrosão de armaduras sob a ação de íons cloreto*. 89p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

TROIAN, A. *Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de íons cloreto*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2010, 127 p.

TUUTTI, K. *Corrosion of steel in concrete*. Swedish Cement and Concrete Research Institute. N1 F04. Estocolmo, Suécia: 1982. 469 p.

VIEIRA L. B. P.; FIGUEIREDO, A. D.; *Evaluation of concrete recycling system efficiency for ready-mix concrete plants*. Waste Management, Brasil. v. 56, p. 337-351, July. 2016.

XUAN, D.; POON, C. S.; ZHENG, W. *Management and sustainable utilization of processing wastes from ready-mixed concrete plants in construction: A review*. Resources, Conservation & Recycling, China. v. 136, p. 238-247, May. 2018.

XUAN, D.; ZHAN, B.; POON, C. S.; ZHENG, W. *Carbon dioxide sequestration of concrete slurry waste and its valorization in construction products*. Construction and Building Materials, China. v. 113, p. 664-672, March. 2016a.

XUAN, D.; ZHAN, B.; POON, C. S.; ZHENG, W. *Innovative reuse of concrete slurry waste from ready-mixed concrete plants in construction products*. Journal of Hazardous Materials, China. v. 312, p.65-72, March. 2016b.

ZEGA, C. J.; DI MAIO, A. A. *Recycled concretes made with waste ready-mix concrete as coarse aggregate*. Journal of materials in civil engineering. v. 23, p. 281-286, March. 2011.

ZERVAKI, M.; LEPTOKARIDIS, C.; TSIMAS, S. *Reuse of by-products form. Ready-mixed concrete plants for the production of cement mortars*. Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, v.1, p.152-162, 2013.

## APÊNDICE A

Conforme mencionado no capítulo 4, este apêndice dedica-se na apresentação complementar da análise estatística referente aos resultados do ensaio de resistência à compressão axial dos concretos produzidos para este estudo. Para expor as análises estatísticas descritivas realizadas para os ensaios de resistência à compressão nos níveis de cada um dos fatores considerados foram utilizados gráficos do tipo *boxplot* e do tipo *violinplots* (FIGURAS A.1 e A.2) conforme mencionado no item 3.4.

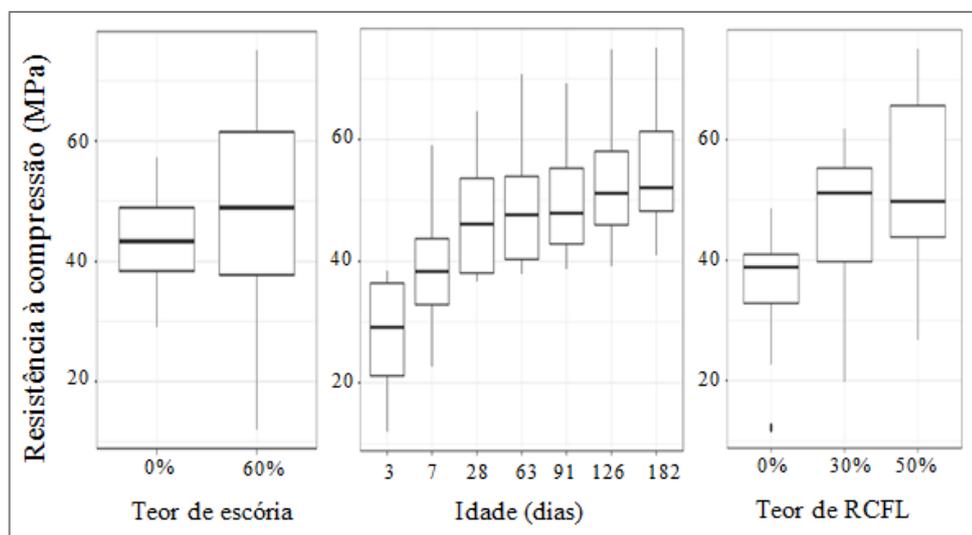


Figura A.1 - *Boxplots*, nos níveis dos fatores dos resultados de resistência à compressão axial

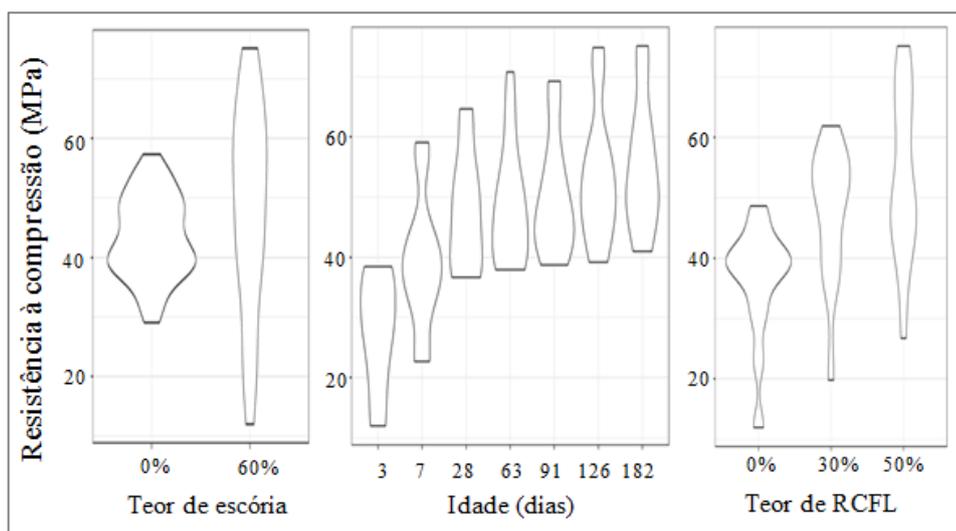


Figura A.2 - *Violinplots*, nos níveis dos fatores dos resultados de resistência à compressão axial

A substituição de 60% de cimento Portland por escória de alto forno provocou um aumento na resistência média nos concretos produzidos. Outrossim, observou-se uma maior variabilidade nos dados apurados em relação aos resultados com 0% de substituição.

No que se refere ao teor de RCFL, observou-se o mesmo comportamento, ou seja, um acréscimo da variabilidade e dos valores médios de resistência à compressão axial com a variação dos teores de 0% para 30% e de 30% para 50%.

Considerando o fator idade, a variabilidade dos resultados é sutilmente constante e observa-se uma tendência de crescimento da resistência com o avanço do tempo. Ressalta-se semelhança nos resultados das idades de 63 e 91 dias e de 126 e 182 dias.

Ao relacionar os fatores teor de escória e teor de RCFL notou-se que a utilização de 60% de escória em substituição ao cimento Portland intensificou a estratificação dos resultados de resistência à compressão axial entre os diferentes teores de RCFL (FIGURA A.3).

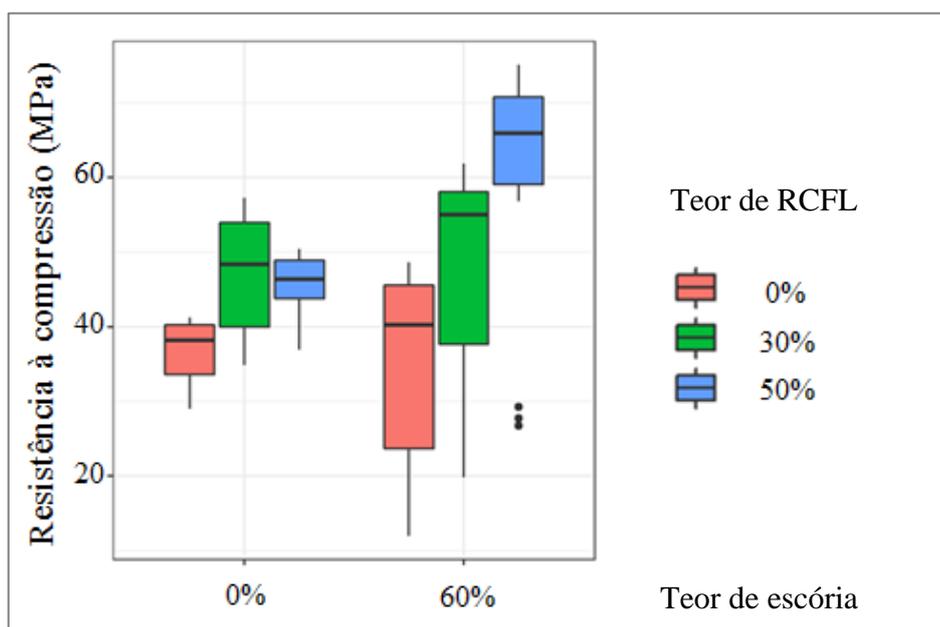


Figura A.3 - *Boxplot* representando os resultados de resistência à compressão ao relacionar os fatores teor de escória e teor de RCFL

Mesmo com a presença de alguns outliers nas análises, estes não influenciaram no modelo adotado para esta variável resposta (distância de Cook sempre abaixo de 1). A hipótese de normalidade dos resíduos foi atestada pelo teste de Shapiro-Wilk ( $p$ -valor = 0,31), como

apresentado na Figura A.4. Os indícios visuais apresentam hipótese de normalidade moderada, com os pontos observados razoavelmente próximos à linha teórica. A hipótese de homocedasticidade foi testada com o teste de Barlett e, apesar de não ser perfeita, não deixa de ser plausível, com baixa tendência nos gráficos. O p-valor para o fator teor de RCFL foi de 0,03, para o fator teor de escória foi de 0,47 e de 0 para o fator idade.

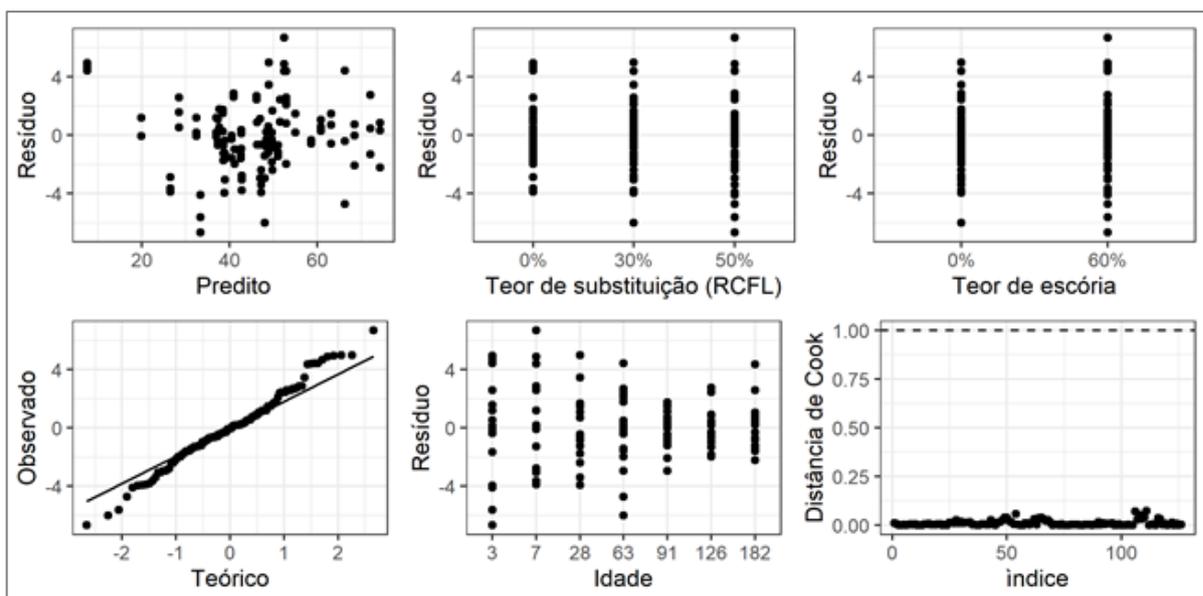


Figura A.4 - Análise de resíduos do modelo estatístico dos resultados de resistência à compressão

As comparações múltiplas entre os fatores considerados na análise estatística do ensaio de resistência à compressão axial se encontram apresentadas por meio das Tabelas A.1 a A.3. Estas foram obtidas por meio da correção de Tukey, consideraram-se os bancos de dados gerados pela realização dos ensaios laboratoriais propostos. Ressalta-se que para os níveis do fator teor de escória as comparações múltiplas foram omitidas, pois há interação com os demais fatores, sendo necessária a estratificação por idade, conduzindo a um número grande de comparações com pouca interpretação prática.

As comparações múltiplas que avaliaram a interação entre os fatores teor de escória e teor de RCFL constataram que apesar da diferença entre os resultados de resistência à compressão axial ser significativa em todos os níveis investigados, esta é mais nítida nos níveis com substituição de 60% do cimento Portland por escória de alto forno. O mesmo é observado nos resultados obtidos para as comparações múltiplas que analisaram a interação entre o teor de escória e a idade dos concretos produzidos.

Tabela A.1 - Resistência à compressão - Comparações entre as idades fixando-se os níveis do teor de escória em 0%

<b>Comparação</b>	<b>Diferença</b>	<b>p-valor</b>
3 dias - 7 dias	-3,93	0,02
3 dias - 28 dias	-10,18	< 0,005
3 dias - 63 dias	-9,19	< 0,005
3 dias - 91 dias	-9,98	< 0,005
3 dias - 126 dias	-12,70	< 0,005
3 dias - 182 dias	-14,09	< 0,005
7 dias - 28 dias	-6,25	< 0,005
7 dias - 63 dias	-5,26	< 0,005
7 dias - 91 dias	-6,05	< 0,005
7 dias - 126 dias	-8,77	< 0,005
7 dias - 182 dias	-10,15	< 0,005
28 dias - 63 dias	0,99	0,98
28 dias - 91 dias	0,19	1,00
28 dias - 126 dias	-2,51	0,38
28 dias - 182 dias	-3,90	0,03
63 dias - 91 dias	-0,79	0,99
63 dias - 126 dias	-3,50	0,07
63 dias - 182 dias	-4,89	0,002
91 dias - 126 dias	-2,71	0,29
91 dias - 182 dias	-4,10	0,01
126 dias - 182 dias	-1,38	0,91

Tabela A.2 - Resistência à compressão - Comparações entre as idades fixando-se os níveis do teor de escória em 60%

<b>Comparação</b>	<b>Diferença</b>	<b>p-valor</b>
3 dias - 7 dias	-19,01	< 0,005
3 dias - 28 dias	-29,82	< 0,005
3 dias - 63 dias	-32,96	< 0,005
3 dias - 91 dias	-35,14	< 0,005
3 dias - 126 dias	-38,70	< 0,005
3 dias - 182 dias	-40,88	< 0,005
7 dias - 28 dias	-10,80	< 0,005
7 dias - 63 dias	-13,94	< 0,005
7 dias - 91 dias	-16,12	< 0,005
7 dias - 126 dias	-19,69	< 0,005
7 dias - 182 dias	-21,87	< 0,005
28 dias - 63 dias	-3,14	0,14
28 dias - 91 dias	-5,31	< 0,005
28 dias - 126 dias	-8,88	< 0,005
28 dias - 182 dias	-11,06	< 0,005
63 dias - 91 dias	-2,17	0,56
63 dias - 126 dias	-5,74	< 0,005
63 dias - 182 dias	-7,92	< 0,005
91 dias - 126 dias	-3,56	< 0,005
91 dias - 182 dias	-5,74	< 0,005
126 dias - 182 dias	-2,179	0,56

Tabela A.3 - Resistência à compressão - Comparações entre os teores de RCFL fixando-se os níveis do teor de escória

<b>Comparação</b>	<b>Nível</b>	<b>Diferença</b>	<b>p-valor</b>
0% - 30%		-10,34	< 0,005
0% - 50%	0%	-8,52	< 0,005
30% - 50%		1,82	0,065
0% - 30%		-12,39	< 0,005
0% - 50%	60%	-25,85	< 0,005
30% - 50%		-13,46	< 0,005

## APÊNDICE B

Este apêndice dedica-se na apresentação complementar da análise estatística referente aos resultados do ensaio de resistência à tração dos concretos produzidos para este estudo. Nas Figuras B.1 e B.2 observam-se, por meio de gráficos *boxplots* e *violinplots*, as análises dos resultados apurados nos ensaios nos níveis dos fatores considerados.

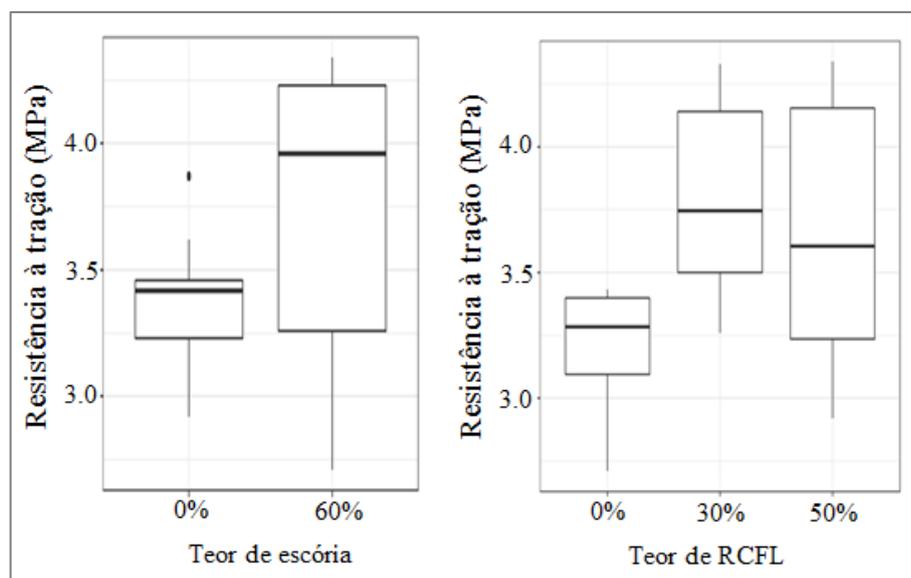


Figura B.1 - *Boxplots*, nos níveis dos fatores teor de escória e de RCFL dos resultados de resistência à tração por compressão diametral

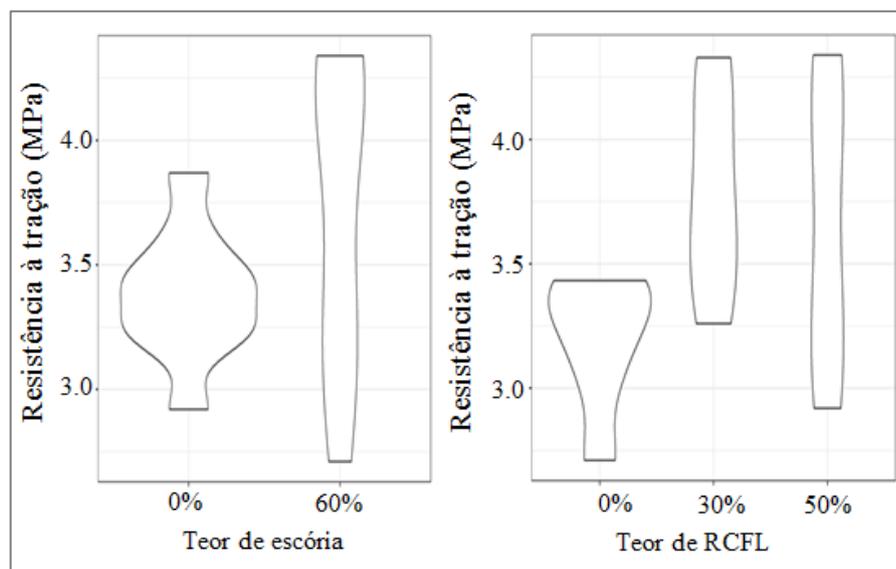


Figura B.2 - *Violinplots*, nos níveis dos fatores teor de escória e de RCFL dos resultados de resistência à tração por compressão diametral

Em relação ao fator teor de escória foi observada sutil diferença entre as distribuições. Os resultados médios apurados nos ensaios conduzidos não variaram significativamente. Contudo, a variabilidade foi melhor evidenciada com o aumento de 0% para 60% no teor de escória. Constatou-se a existência de um possível ponto discrepante dentre os resultados apurados para os concretos produzidos com teor de 0% de escória para esta variável resposta.

A presença de um outlier nas análises não influenciou no modelo adotado para esta variável resposta. A hipótese de normalidade dos resíduos não foi rejeitada por meio do teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância ( $p$ -valor = 0,41), como apresentado na Figura B.3. Os indícios visuais atestam a hipótese de normalidade, com os pontos do gráfico apresentados bem próximos à linha teórica. A hipótese de homocedasticidade é um pouco afetada, sendo possível perceber uma tendência de crescimento da variabilidade com a alternância dos teores de escória. Contudo, baseando-se no teste de Barlett a hipótese de homocedasticidade não ficou comprometida, visto que, o  $p$ -valor para o fator teor de RCFL foi de 0,29 e de 0,04 para o fator teor de escória. Para o modelo implementado foi necessária à aplicação de uma transformação do tipo Box-cox na variável resposta com o intuito de melhorar a normalidade dos resíduos.

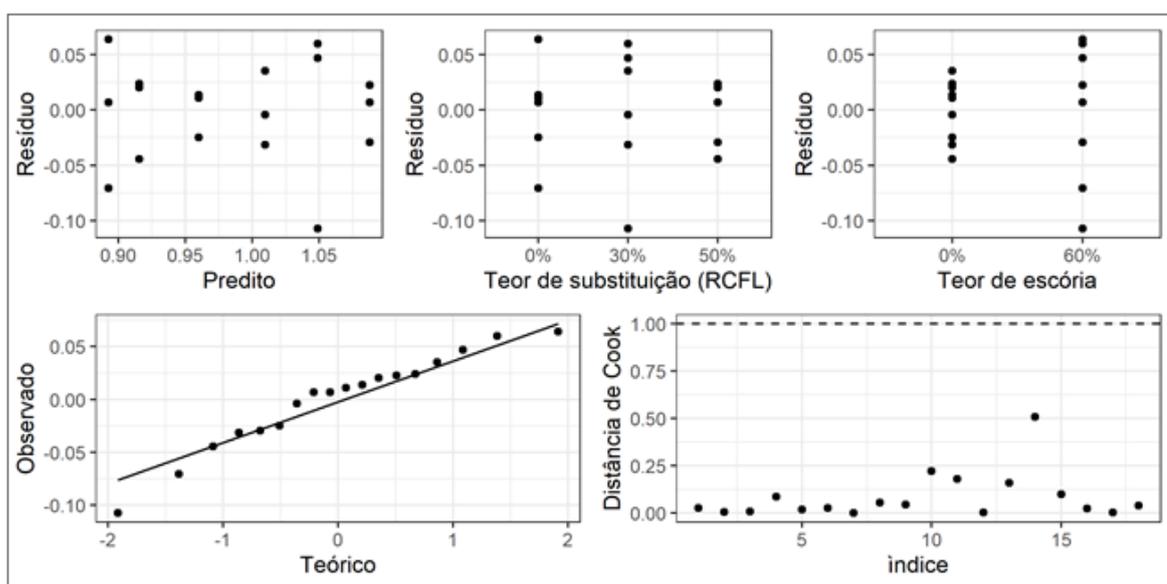


Figura B.3 - Análise de resíduos do modelo estatístico dos resultados de resistência à tração

Como o fator teor de RCFL foi considerado significativo, são apresentadas as comparações múltiplas dos teores estratificadas pelos níveis do fator teor de escória, visto que a interação entre estes fatores também foi significativa, por meio das Tabelas B.1 e B.2. Estas foram obtidas por meio da correção de Tukey, consideraram-se os bancos de dados gerados pela realização

dos ensaios laboratoriais propostos. Com a fixação do nível 0% do fator teor de escória, não foi apurada interveniência significativa nos resultados da variável resposta com a variação dos níveis do teor de RCFL (0%, 30% e 50%). Contudo, com a fixação do fator teor de escória no nível de 60%, os resultados da variável resposta se diferenciaram significativamente com a variação dos níveis de 0% e 30% e de 0% e 50%. Indicando que um teor de RCFL de 30% já foi considerado suficiente para aumentar significativamente a resistência à tração dos concretos produzidos com o cimento CP60.

Com a fixação dos níveis do fator teor de RCFL não foram observados indícios de interveniência do tipo de cimento utilizado para os teores de 0% e 30% de RCFL. Logo, a utilização do CP00 ou do CP60 conduzia a resultados semelhantes, denotando falta de interveniência deste fator sobre a variável resposta investigada. Todavia, considerando o nível 50% do fator teor de RCFL e o nível 60% do fator teor de escória, observou-se que, além de haver indícios de diferenciação, houve aumento da resistência à tração em relação aos demais níveis do fator teor de RCFL (0% e 30%).

Tabela B.1 - Resistência à tração - Comparações entre os teores de RCFL fixando-se níveis do teor de escória

<b>Comparação</b>	<b>Nível</b>	<b>Diferença</b>	<b>p-valor</b>
0% - 30%		-0,049	0,507
0% - 50%	0%	-0,044	0,579
30% - 50%		-0,094	0,118
0% - 30%		-0,156	0,009
0% - 50%	60%	-0,194	0,002
30% - 50%		-0,038	0,653

Tabela B.2 - Resistência à tração - Comparações entre os teores de escória fixando-se níveis do teor de RCFL

<b>Comparação</b>	<b>Nível</b>	<b>Diferença</b>	<b>p-valor</b>
0% - 60%	0%	0,067	0,148
0% - 60%	30%	-0,039	0,384
0% - 60%	50%	-0,172	< 0,005

## APÊNDICE C

Este apêndice objetiva-se na apresentação complementar da análise estatística referente aos resultados do ensaio de módulo de elasticidade dos concretos produzidos para este estudo. Nas Figuras C.1 e C.2 observam-se, respectivamente, os gráficos *boxplots* e *violinplots*, sendo apresentados os dados apurados nos ensaios nos níveis dos fatores considerados.

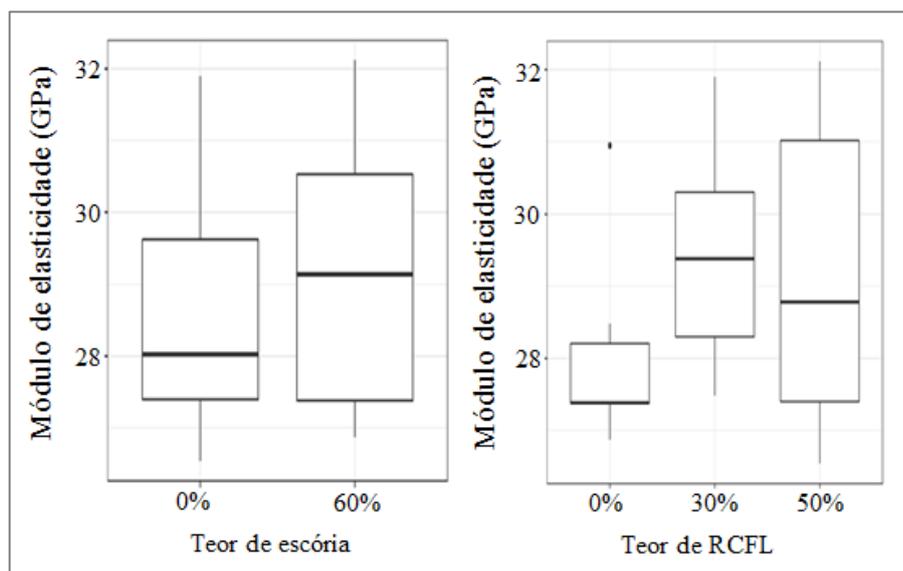


Figura C.1 - *Boxplots*, nos níveis dos fatores teor de escória e teor de RCFL dos resultados de módulo de elasticidade

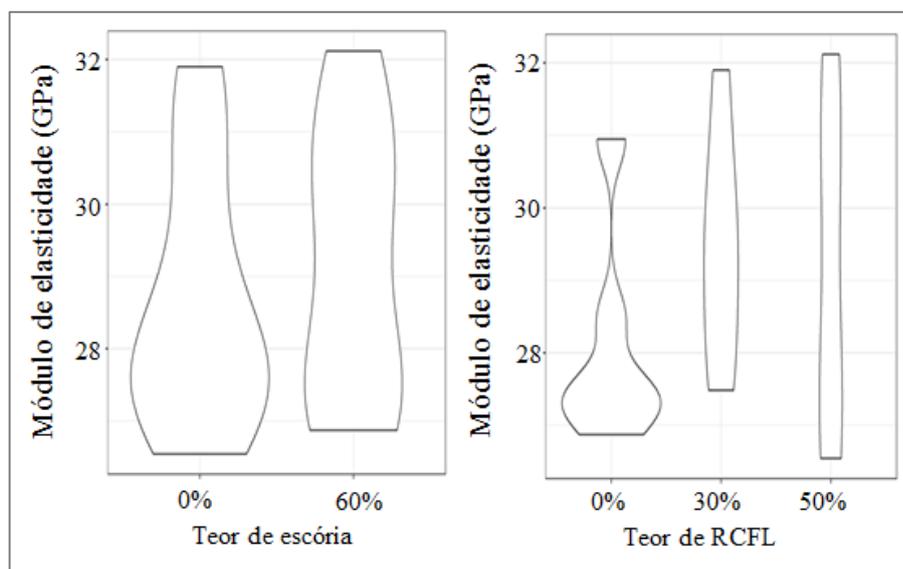


Figura C.2 - *Violinplots*, nos níveis dos fatores teor de escória e teor de RCFL dos resultados de módulo de elasticidade

Baseando-se nas análises apresentadas, constatou-se que o aumento dos teores de escória e de RCFL, provocou aumento da variabilidade dos dados apurados e distinção pouco expressiva entre as distribuições. Um possível ponto discrepante para a variável resposta ora analisada foi observado dentre os resultados obtidos para os concretos produzidos com teor de 0% de RCFL. O outlier identificado nas análises não influenciou no modelo adotado para avaliar o módulo de elasticidade.

Com a análise dos resíduos do modelo, a hipótese de normalidade não foi rejeitada por meio do teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância ( $p$ -valor = 0,39), conforme apresentado na Figura C.3. Os indícios visuais evidenciam sutil comprometimento da hipótese de normalidade, visto que alguns pontos do gráfico se encontram distantes da linha teórica. A hipótese de homocedasticidade foi testada com o teste de Barlett e, apesar de não ser perfeita, não deixa de ser plausível, com baixa tendência nos gráficos. Para o teor de escória o  $p$ -valor constatado foi de 0.29 e de 0.25 para o teor de RCFL.

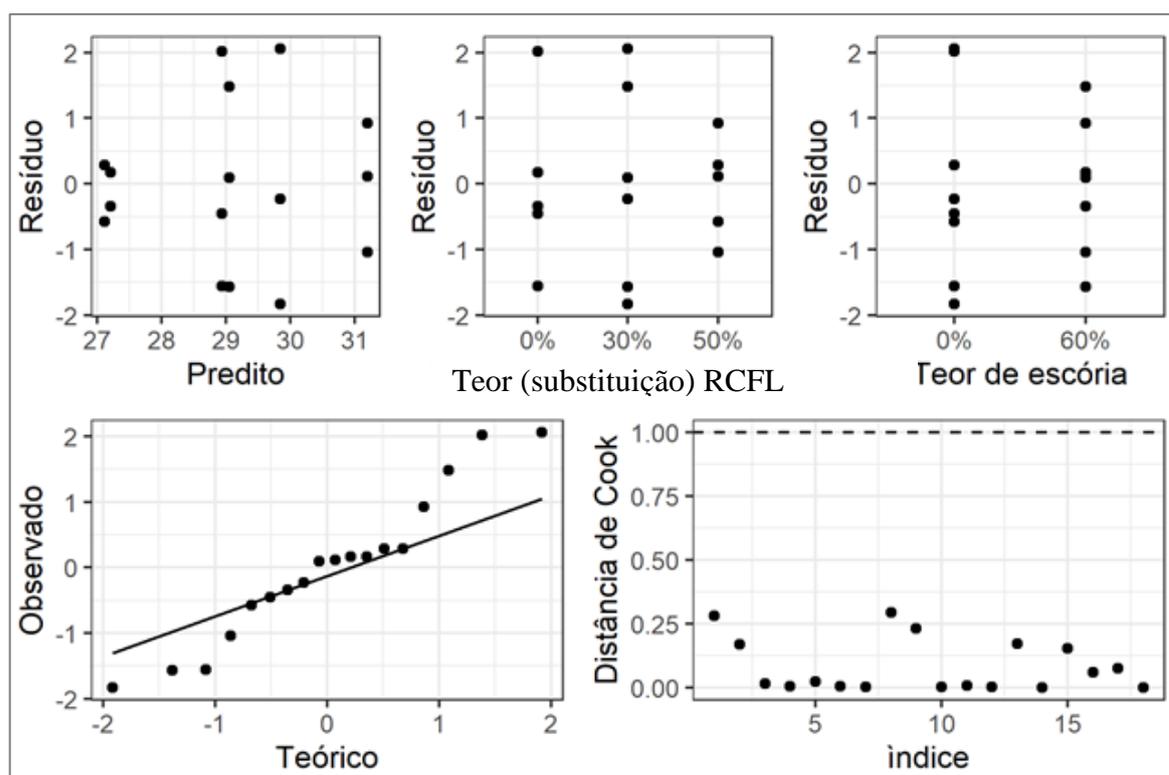


Figura C.3 - Análise de resíduos do modelo estatístico dos resultados de módulo de elasticidade

## APÊNDICE D

Neste apêndice é apresentada, de forma complementar, a análise estatística referente aos resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade dos concretos produzidos para este estudo. Nas Figuras D.1 e D.2 são apresentados, respectivamente, as análises realizadas nos níveis dos fatores considerados por meio de gráficos *boxplots* e *violinplots*.

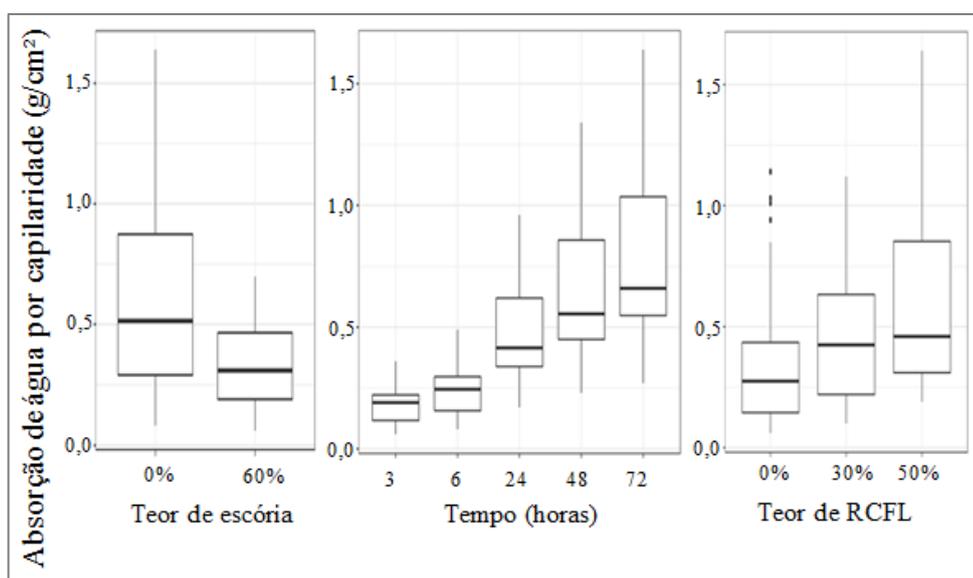


Figura D.1 - *Boxplots*, nos níveis dos fatores dos resultados de absorção de água por capilaridade

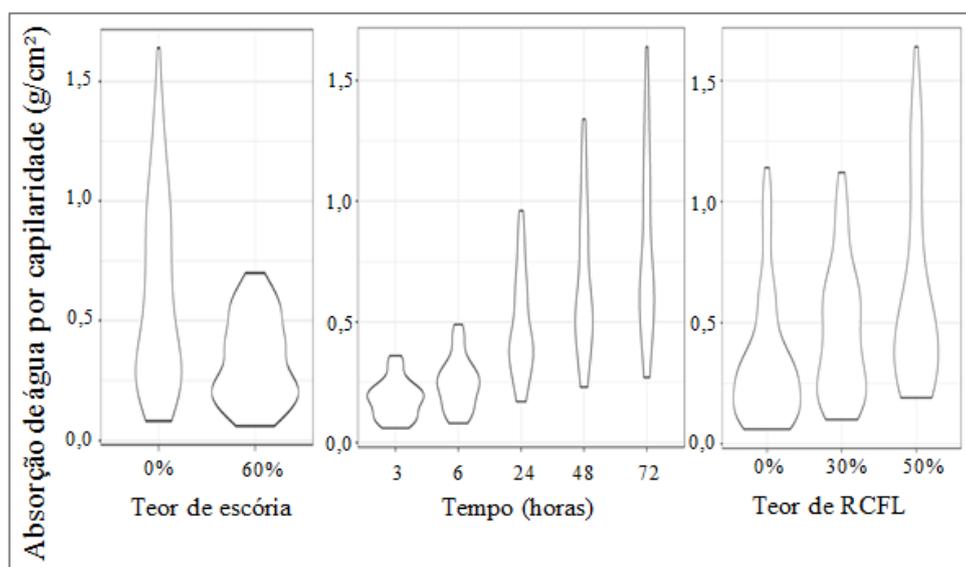


Figura D.2 - *Violinplots*, nos níveis dos fatores dos resultados de absorção de água por capilaridade

Ao analisar a variável resposta em questão, observou-se um decaimento da variabilidade dos resultados de absorção de água por capilaridade com o aumento do teor de escória. Em relação ao teor de RCFL, verificou-se aumento da absorção com o aumento do teor de substituição verificando-se que a variabilidade dos resultados apurados se manteve constante. Alguns pontos discrepantes são observados nos concretos produzidos com teor de 0% de RCFL. Apesar de ser possível perceber uma tendência de crescimento da absorção com o avanço das horas, um padrão não foi observado.

Ao correlacionar os fatores teor de escória e teor de RCFL, evidenciou-se uma tendência de crescimento da absorção de água com o aumento do teor de RCFL independente do teor de escória (FIGURA D.3).

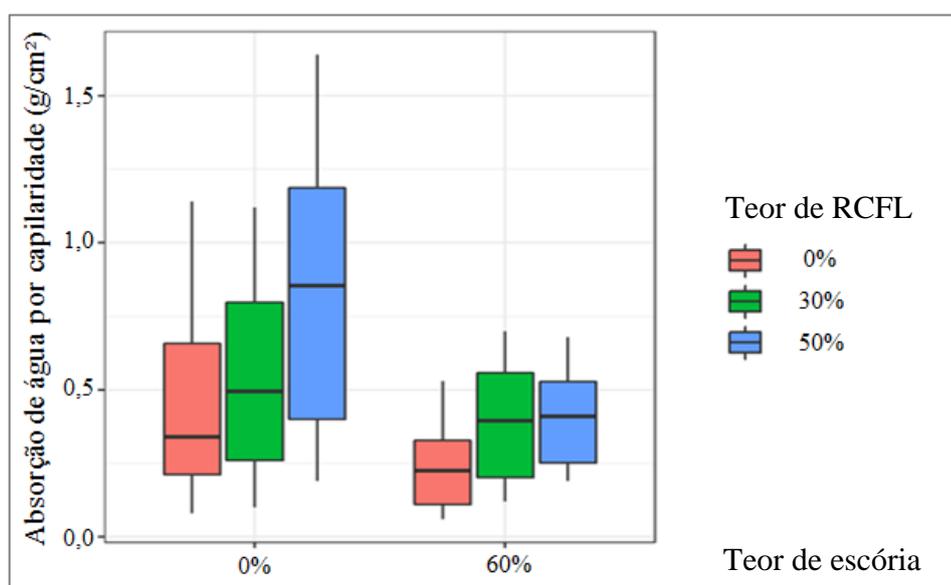


Figura D.3 - *Boxplots* representando os resultados de absorção de água por capilaridade ao relacionar os fatores teor de escória e teor de RCFL

A presença de outliers nas análises não influenciou no modelo adotado para esta variável resposta. A hipótese de normalidade dos resíduos não foi rejeitada por meio do teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância ( $p$ -valor = 0,1457), como apresentado na Figura D.4. De acordo com indícios visuais a hipótese de homocedasticidade parece plausível, a hipótese de normalidade também é considerada, com os pontos observados bem próximos à linha teórica. Conforme o teste de Barlett o  $p$ -valor para o fator teor de RCFL foi de 0,67, de aproximadamente 0,0 para o fator teor de escória e de 0,29 para o fator tempo (horas de absorção). Deste modo, a hipótese de homocedasticidade não ficou comprometida, e apenas o

fator teor de escória apresentou variância não constante. O modelo que apresentou o ajuste mais adequado para a variável resposta absorção de água por capilaridade foi o modelo sem interação entre os fatores, com transformação raiz quadrada na variável resposta e com agregação do fator tempo (horas). Os níveis deste fator, 3, 6 e 24 horas, foram agregados em um único nível, os níveis 48 e 72 horas foram mantidos.

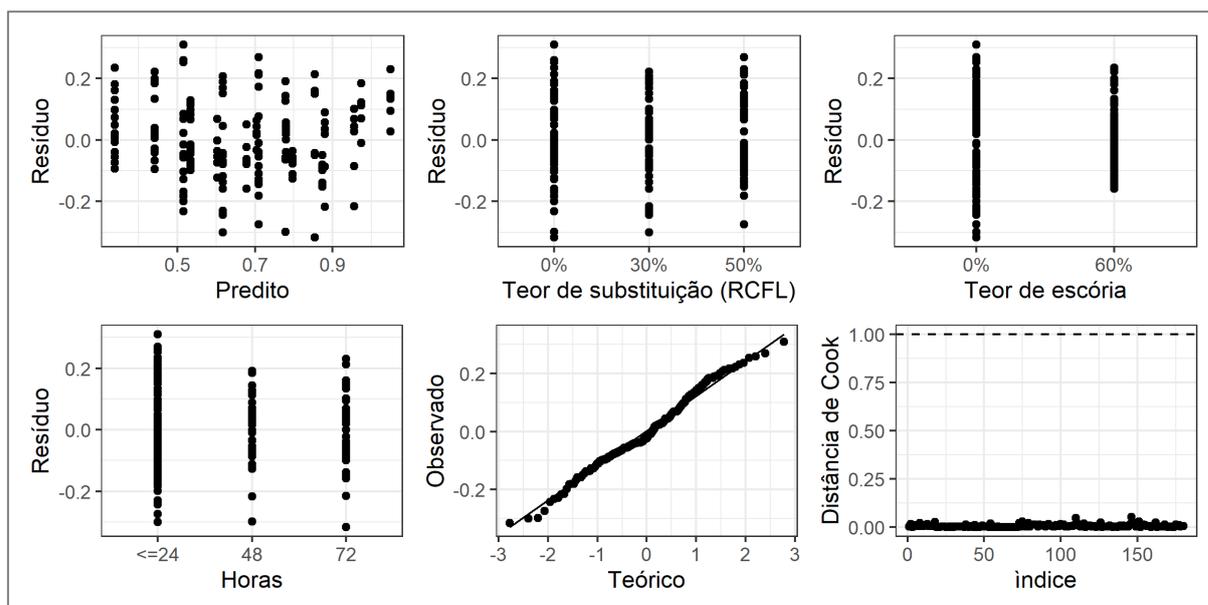


Figura D.4 - Análise de resíduos do modelo estatístico dos resultados de absorção de água por capilaridade

As comparações múltiplas entre os fatores considerados na análise estatística da variável respostas absorção de água por capilaridade se encontram apresentadas por meio das Tabelas D.1 a D.3.

Estas foram obtidas por meio da correção de Tukey, consideraram-se os bancos de dados gerados pela realização dos ensaios laboratoriais propostos. Visto que não houve interação entre os fatores, as comparações múltiplas foram realizadas sem a fixação do nível dos demais fatores. Tais comparações permitiram apurar que todos os níveis dos fatores de interesse são significativamente distintos entre si.

Tabela D.1 - Absorção de água por capilaridade - Comparações entre os teores de escória

Comparação	Diferença	p-valor
0% - 60%	0,17	< 0,005

Tabela D.2 - Absorção de água por capilaridade - Comparações entre os teores de RCFL

<b>Comparação</b>	<b>Diferença</b>	<b>p-valor</b>
0% - 30%	-0,10	< 0,005
0% - 50%	-0,20	< 0,005
30% - 50%	-0,10	< 0,005

Tabela D.3 - Absorção de água por capilaridade - Comparações entre o tempo (horas)

<b>Comparação</b>	<b>Diferença</b>	<b>p-valor</b>
≤ 24 - 48 horas	-0,26	< 0,005
≤ 24 - 72 horas	-0,33	< 0,005
48 - 72 horas	-0,07	0,03

## APÊNDICE E

Conforme mencionado no capítulo 4, este apêndice dedica-se na apresentação complementar da análise estatística referente aos resultados de absorção de água por imersão dos concretos produzidos para este estudo. As Figuras E.1 e E.2 representam, respectivamente, os gráficos *boxplots* e *violinplots* das análises dos resultados obtidos para a variável resposta absorção de água por imersão.

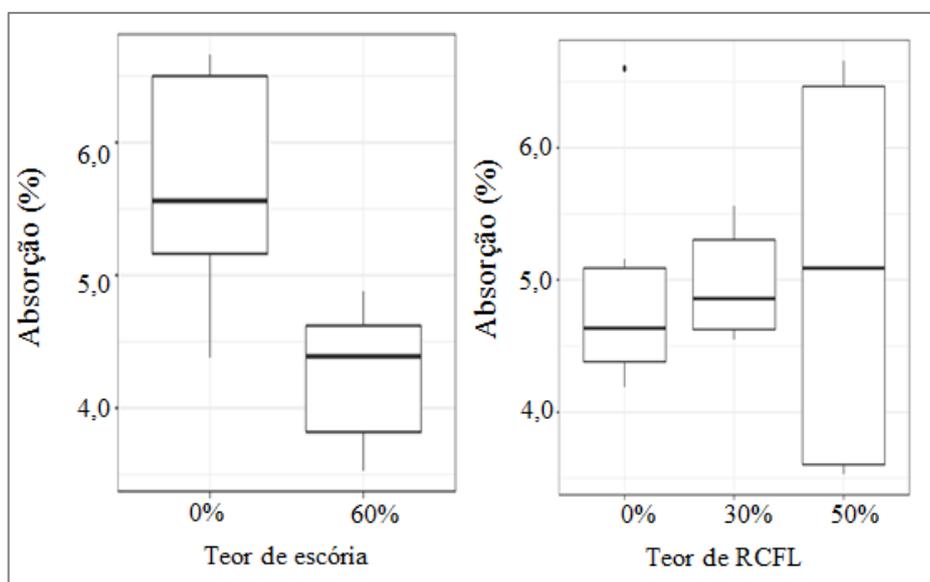


Figura E.1 - *Boxplots*, nos níveis dos fatores dos resultados de absorção de água por imersão

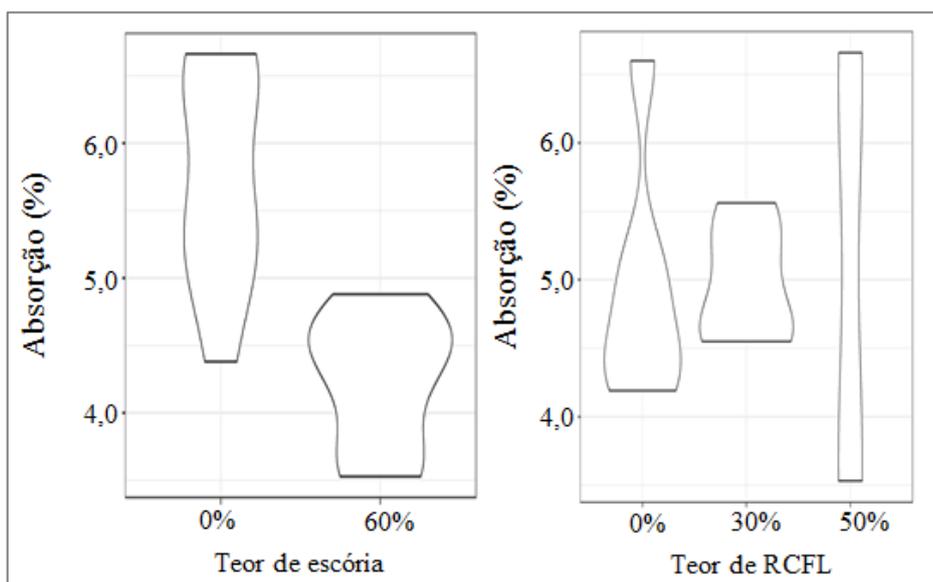


Figura E.2 - *Violinplots*, nos níveis dos fatores dos resultados de absorção de água por imersão

A presença de um outlier nas análises não influenciou no modelo adotado para esta variável resposta. A hipótese de normalidade dos resíduos não foi rejeitada por meio do teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância ( $p$ -valor = 0,40), como apresentado na Figura E.3. Graficamente a hipótese de normalidade é plausível, com os pontos observados bem próximos à linha teórica. Sem uma tendência muito visível nos resíduos, a hipótese de homocedasticidade também parece possível. Sendo o seu não comprometimento atestado pelo teste de Barlett com o  $p$ -valor para o fator teor de escória de 0,19.

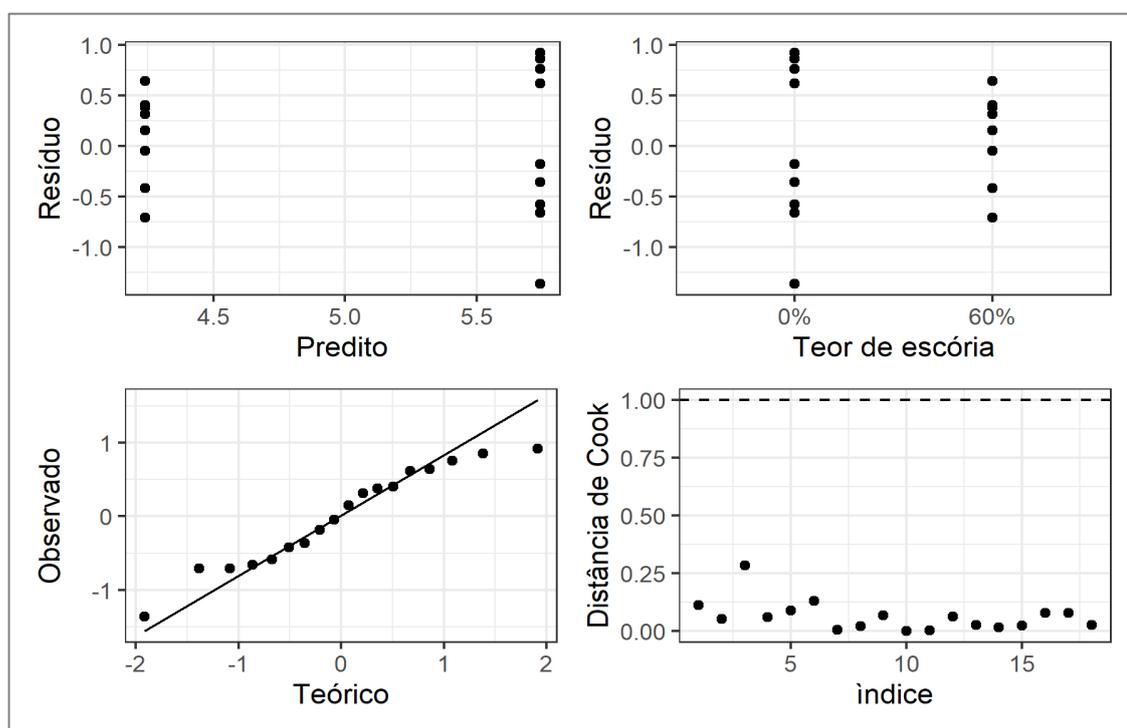


Figura E.3 - Análise de resíduos do modelo estatístico dos resultados de absorção de água por imersão

As comparações múltiplas entre os fatores considerados na análise estatística da variável resposta absorção de água por imersão se encontram apresentadas nesta seção por meio da Tabela E.1. Estas foram obtidas por meio da correção de Tukey, consideraram-se os bancos de dados gerados pela realização dos ensaios laboratoriais propostos.

Visto que não houve interação entre fatores, a comparação múltipla foi realizada sem a fixação dos níveis do fator teor de RCFL. Tal comparação permitiu apurar que os níveis do fator teor de escória são significativamente distintos entre si. Indicando que 0% de teor de escória apresenta maior absorção.

Tabela E.1 - Absorção de água por imersão - Comparações entre os teores de escória

<b>Comparação</b>	<b>Diferença</b>	<b>p-valor</b>
0% - 60%	1,15	< 0,005

## APÊNDICE F

Este apêndice objetiva-se na apresentação complementar da análise estatística referente aos resultados de índice de vazios dos concretos produzidos para este estudo. Nas Figuras F.1 e F.2 apresentam-se, respectivamente, os gráficos *boxplots* e *violinplots* das análises dos resultados obtidos para a variável resposta índice de vazios.

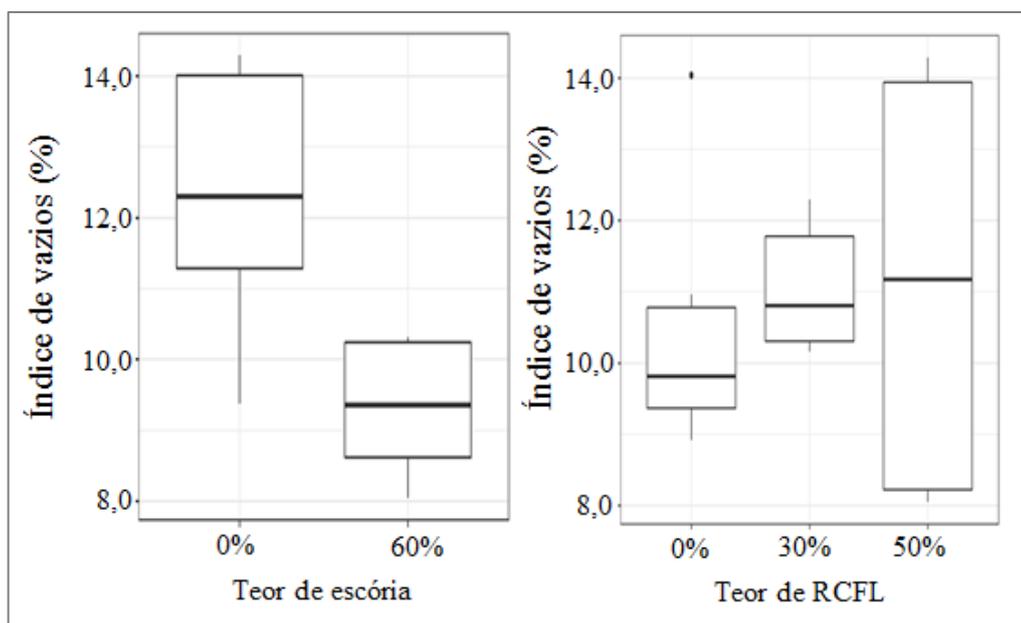


Figura F.1 - *Boxplots*, nos níveis dos fatores dos resultados de índice de vazios

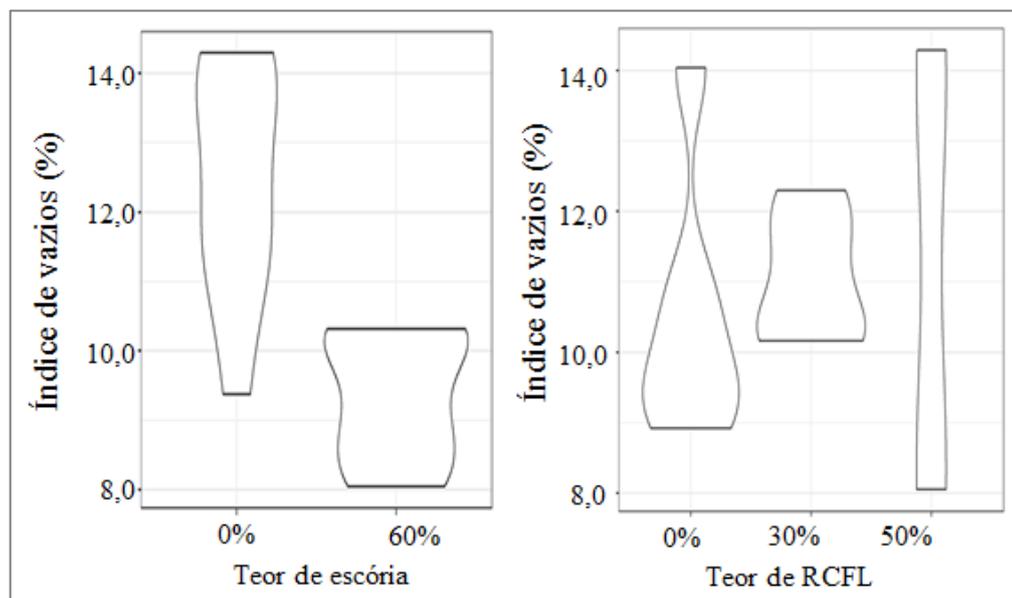


Figura F.2 - *Violinplots*, nos níveis dos fatores dos resultados de índice de vazios

A hipótese de normalidade dos resíduos não foi rejeitada por meio do teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância ( $p$ -valor = 0,32), como apresentado na Figura F.3. Os indícios visuais indicam que a hipótese de normalidade é plausível, com os pontos observados bem próximos à linha teórica. Sem uma tendência muito visível nos resíduos, a hipótese de homocedasticidade também parece possível. Sendo o seu não comprometimento atestado pelo teste de Barlett com o  $p$ -valor para o fator teor de escória de 0,12.

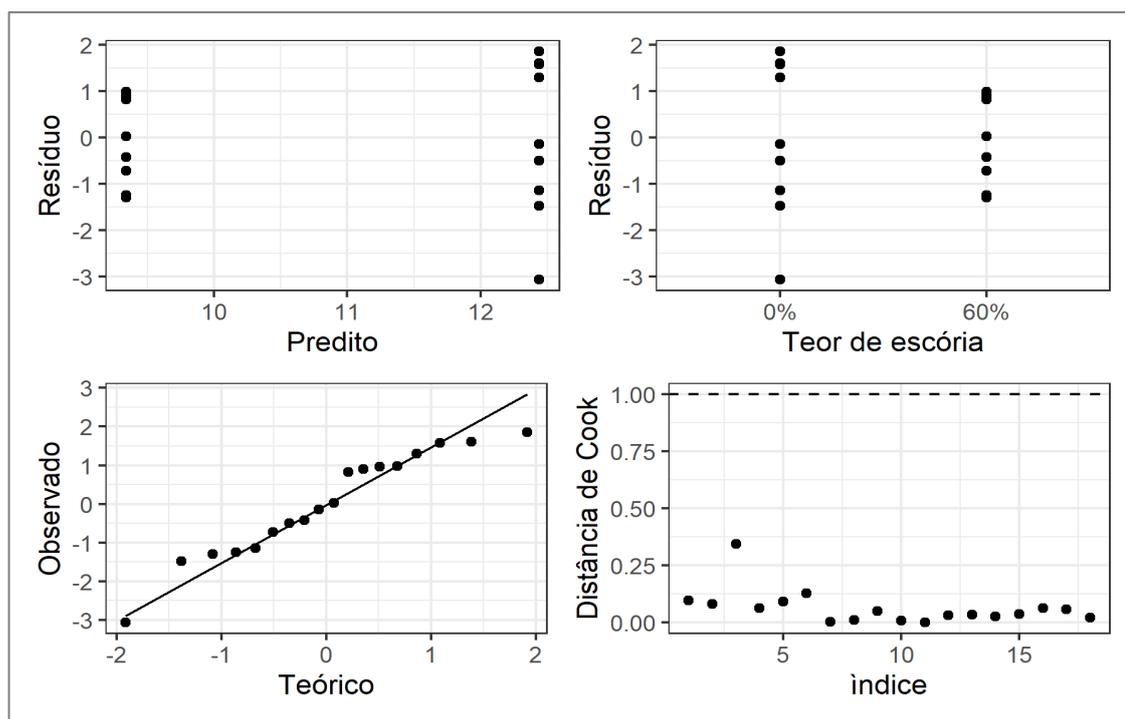


Figura F.3 - Análise de resíduos do modelo estatístico dos resultados de índice de vazios

As comparações múltiplas entre os fatores considerados na análise estatística da variável respostas índice de vazios se encontram apresentadas por meio da Tabela F.1. Estas foram obtidas por meio da correção de Tukey, consideraram-se os bancos de dados gerados pela realização dos ensaios laboratoriais propostos.

Tabela F.1 - Índice de vazios - Comparações entre os teores de escória

Comparação	Diferença	$p$ -valor
0% - 60%	3,1	< 0,005

## APÊNDICE G

Neste apêndice apresenta-se, de forma complementar, a análise estatística referente aos resultados de massa específica real dos concretos produzidos para este estudo. Nas Figuras G.1 e G.2 observam-se, respectivamente, os gráficos *boxplots* e *violinplots* das análises dos resultados obtidos para a variável resposta massa específica real.

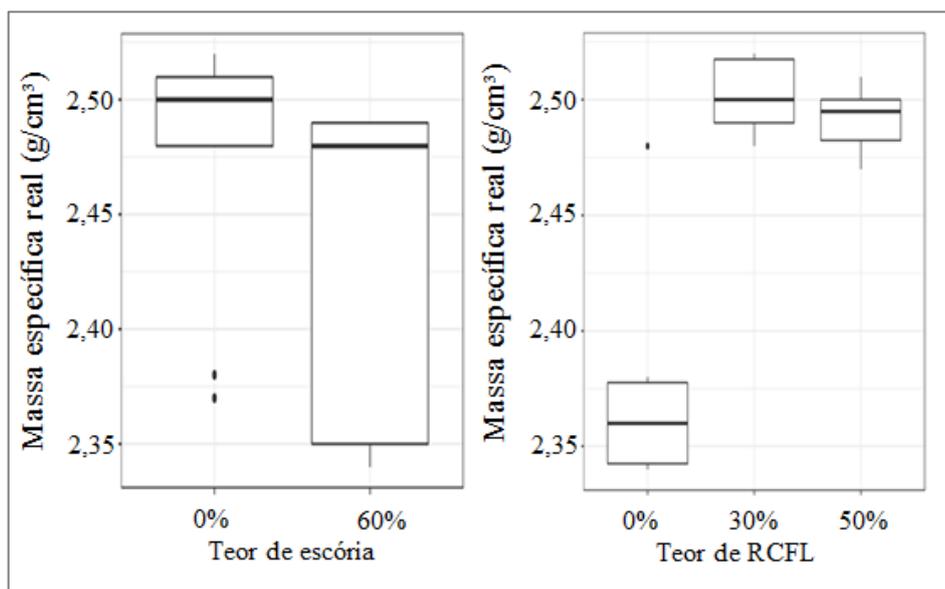


Figura G.1 - *Boxplots*, nos níveis dos fatores dos resultados de massa específica real

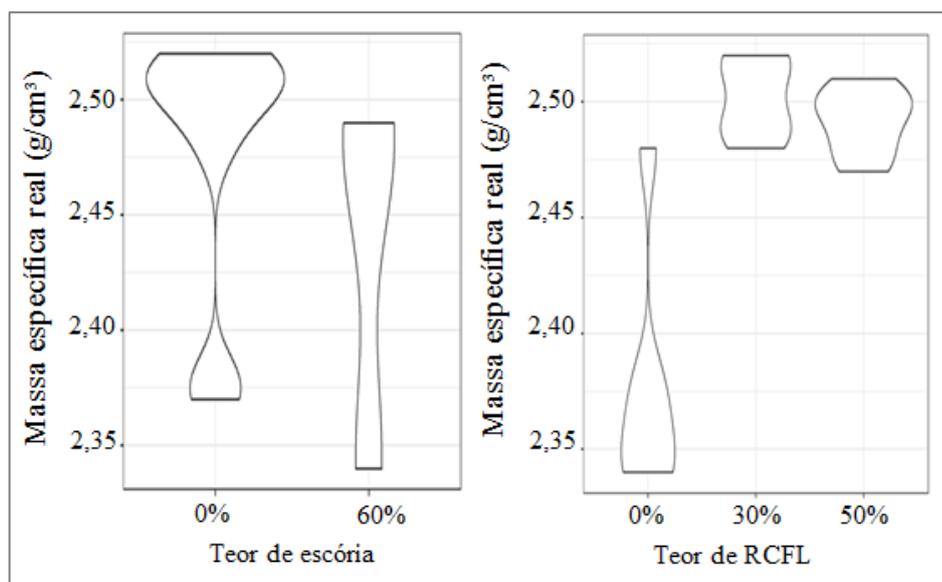


Figura G.2 - *Violinplots*, nos níveis dos fatores dos resultados de massa específica real

Baseando-se nas análises dos dados apurados, ao considerar o fator teor de escória, verifica-se que as distribuições entre os níveis de interesse são divergentes. Tal diferença é um pouco ocultada nas análises pela presença de dois *outliers* no nível 0%. Para o fator teor de RCFL as distribuições dos resultados da massa específica real nos teores de 30% e 50% de substituição aparentam ser aproximadas. O teor de 0% de substituição apresenta uma concentração de resultados mais baixos com um *outlier* com resultado extremo, indiciando divergência em relação aos demais teores.

Com a análise dos resíduos do modelo, a hipótese de normalidade não foi rejeitada pelo teste de Shapiro-Wilk a 0.05 de significância, com p-valor do teste igual a 0.45, como apresentado na Figura G.3. Os indícios visuais sugeriram que a hipótese de normalidade continua sendo plausível, já que a maioria dos pontos do gráfico acompanharam a reta teórica. A hipótese de homocedasticidade também não parece impossível, o teste de Bartlett não rejeitou a hipótese tanto para o fator teor de escória (p-valor 0.543) quanto para o fator teor de RCFL (p-valor 0.71). Para ajustar o modelo final mais adequado ao desenvolvimento da análise estatística referente à variável resposta massa específica real foi necessária a remoção de um outlier relacionado aos resultados apurados no nível de 0% dos fatores teor de RCFL e teor de escória.

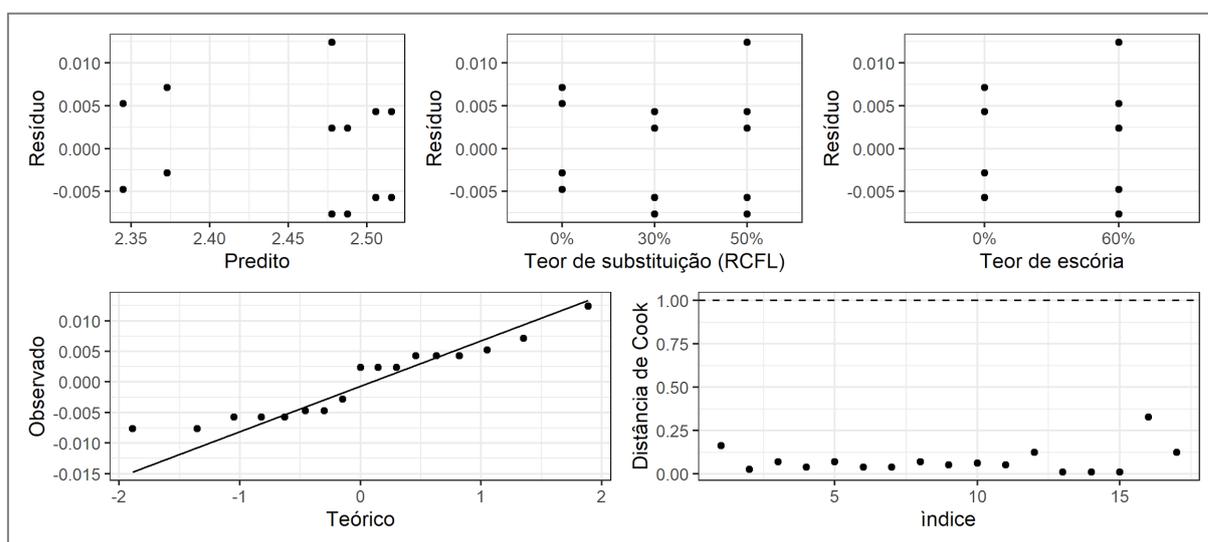


Figura G.3 - Análise de resíduos do modelo estatístico dos resultados de massa específica real

As comparações múltiplas entre os fatores considerados na análise estatística da variável resposta massa específica real se encontram apresentadas por meio das Tabelas G.1 e G.2. Estas foram obtidas por meio da correção de Tukey, consideraram-se os bancos de dados gerados pela realização dos ensaios laboratoriais propostos.

Tabela G.1 - Massa específica real - Comparações entre os teores de escória

<b>Comparação</b>	<b>Diferença</b>	<b>p-valor</b>
0% - 60%	0,02	< 0,005

Tabela G.2 - Massa específica real - Comparações entre os teores de RCFL

<b>Comparação</b>	<b>Diferença</b>	<b>p-valor</b>
0% - 30%	-0,14	< 0,005
0% - 50%	-0,13	< 0,005
30% - 50%	0,01	0,05

## APÊNDICE H

Este apêndice destina-se na apresentação complementar da análise estatística referente aos resultados do ensaio de migração de íons cloreto dos concretos produzidos para este estudo. As análises estatísticas preliminares realizadas para os ensaios de resistência à penetração de íons cloreto nos níveis de cada um dos fatores considerados podem ser observadas nos gráficos do tipo *boxplot* e do tipo *violinplots* das Figuras H.1 e H.2.

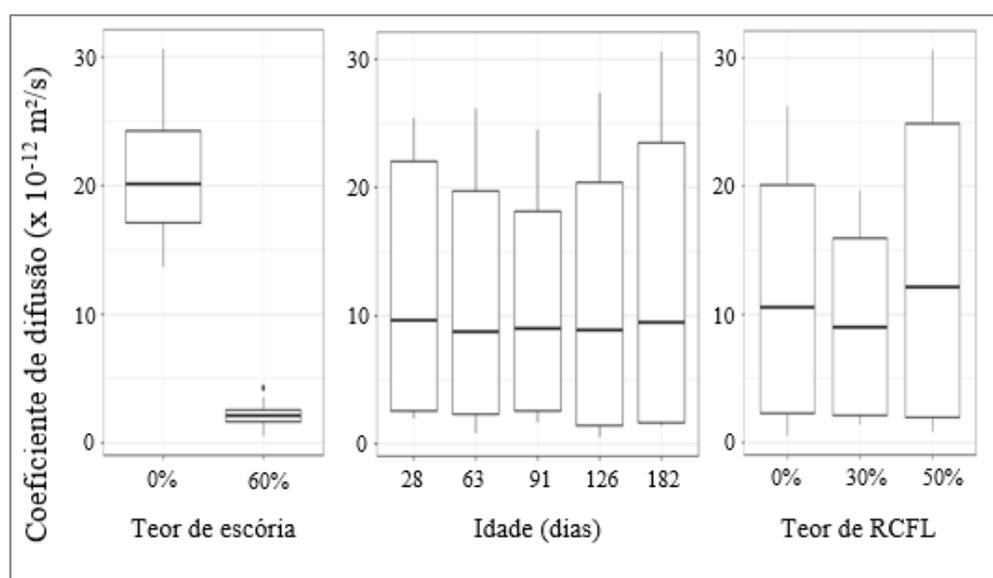


Figura H.1 - *Boxplots*, nos níveis dos fatores dos resultados de migração de íons cloretos

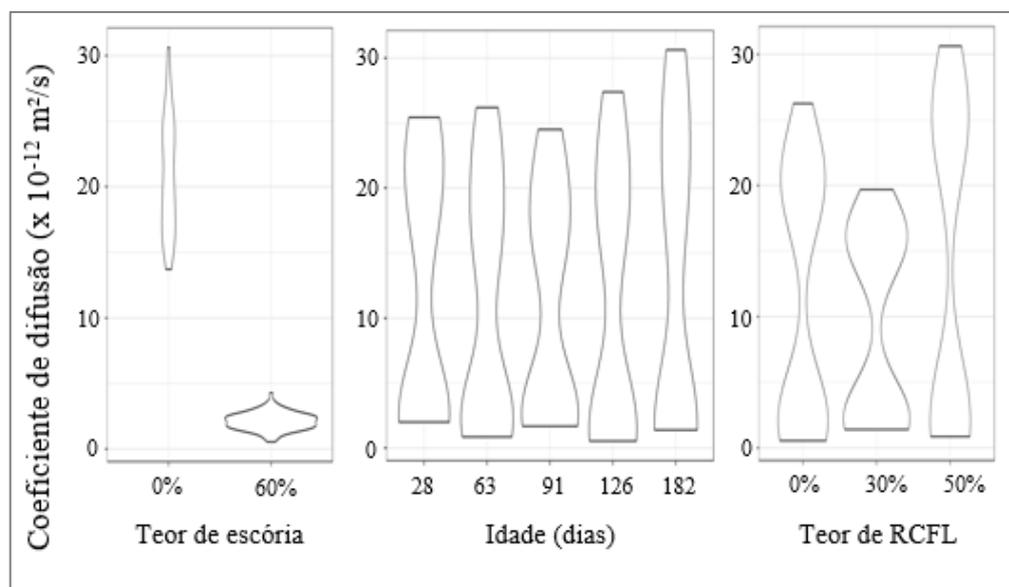


Figura H.2 - *Violinplots*, nos níveis dos fatores dos resultados de migração de íons cloreto

A utilização do cimento CP60 provocou um aumento na resistência à penetração de íons cloreto nos concretos produzidos. Além disso, foi constatada uma menor variabilidade nos dados apurados em relação aos resultados com teor de 0% de escória. Um possível *outlier* dentre os resultados obtidos nos concretos produzidos com o cimento CP60 foi observado.

No que se refere ao teor de RCFL, as distribuições dos resultados dos diferentes teores apresentaram-se semelhantes, com o teor de 50% de RCFL variando um pouco mais em relação ao teor de 30%. Em relação ao fator idade, observa-se semelhança nas distribuições, com tendência de queda na variabilidade dos resultados.

Ao relacionar os fatores teor de escória e teor de RCFL (FIGURA H.3) nota-se que para os concretos produzidos com teor de escória de 0% há um aumento na resistência à penetração de íons cloreto com o aumento do teor de RCFL de 0% para 30% com posterior queda na resistência quando o teor de RCFL varia de 30% para 50%. Para os concretos produzidos com teor de escória de 60%, não foram constatadas diferenças nítidas nas distribuições.

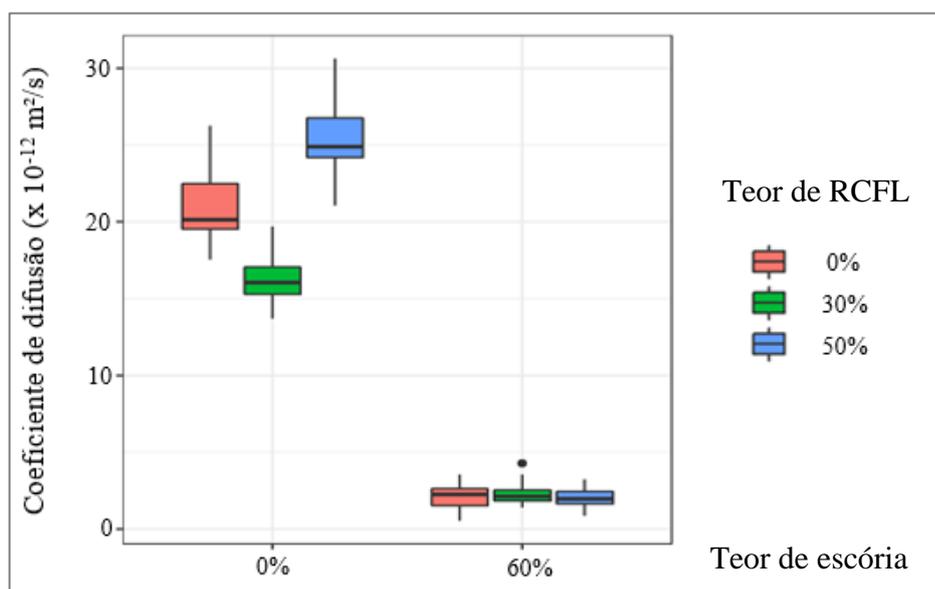


Figura H.3 - *Boxplots* representando os resultados de migração de íons cloreto ao relacionar os fatores teor de escória e teor de RCFL

A presença de alguns *outliers* nas análises não influenciou no modelo adotado para esta variável resposta. Analisando os resíduos do modelo, a hipótese de normalidade não é rejeitada pelo teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, com p-valor do teste igual a 0,11, como apresentado na Figura H.4. Gráficamente a hipótese de normalidade não chega a ser impossível,

apesar de alguns pontos estarem localizados distantes à linha teórica. A hipótese de homocedasticidade, apesar de não ser perfeita, não deixa de ser plausível, com pouca tendência nos gráficos. O p-valor do teste de Barlett foi de 0,94 para o teor de RCFL, 0,11 para o teor de escória e 0,65 para a idade.

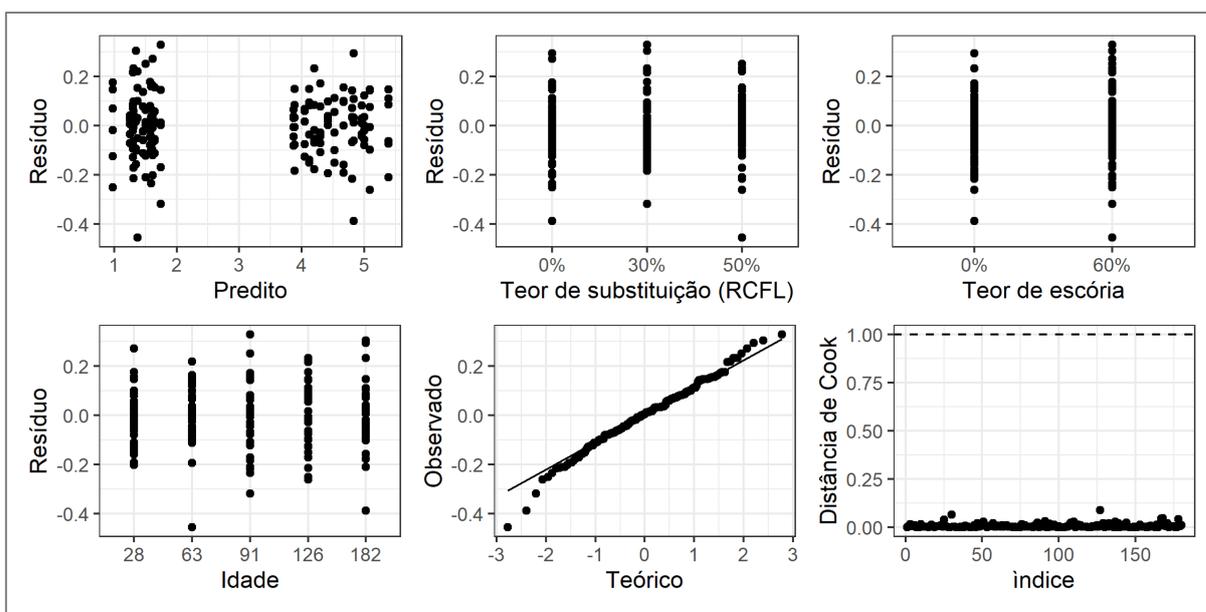


Figura H.4 - Análise de resíduos do modelo estatístico dos resultados de migração de íons cloreto

As comparações múltiplas entre os níveis dos fatores foram realizadas fixando-se os níveis dos outros fatores do modelo por meio da correção de Tukey, consideraram-se os bancos de dados gerados pela realização dos ensaios laboratoriais propostos. As comparações são apresentadas por meio das Tabelas H.1 a H4.

As comparações múltiplas que avaliaram as interações mostraram que, de modo geral, a diferença entre os resultados dos coeficientes de migração de cloretos foi mais expressiva nos concretos com teor de escória de 0%, para todos os níveis dos fatores teor de RCFL e idade investigados. Deste modo, ao fixar os níveis dos fatores teor de escória e idade, observou-se que a diferença dos resultados observada foi mais expressiva para o teor de escória no nível 0%. Um padrão de aumento da resistência à penetração de íons cloretos é observado com a variação do teor de RCFL de 0% para 30%. Todavia, um aumento expressivo dos coeficientes de migração foi observado, para todas as idades investigadas, com a variação do teor de RCFL de 30% para 50%, indicando redução da resistência à penetração de íons cloretos para os concretos produzidos com teor de 0% de escória.

Tabela H.1 - Migração de cloretos - Comparações entre os teores de RCFL fixando-se os níveis dos fatores teor de escória e a idade

<b>Comparação</b>	<b>Nível</b>	<b>Diferença</b>	<b>p-valor</b>
0% - 30%		0,553	< 0,005
0% - 50%	0% de escória	-0,29	< 0,005
30% - 50%	28 dias	-0,844	< 0,005
0% - 30%		0,038	0,878
0% - 50%	60% de escória	-0,034	0,9
30% - 50%	28 dias	-0,073	0,626
0% - 30%		0,551	< 0,005
0% - 50%	0% de escória	-0,578	< 0,005
30% - 50%	63 dias	-1,129	< 0,005
0% - 30%		0,146	0,153
0% - 50%	60% de escória	0,236	0,009
30% - 50%	63 dias	0,09	0,491
0% - 30%		0,411	< 0,005
0% - 50%	0% de escória	-0,509	< 0,005
30% - 50%	91 dias	-0,92	< 0,005
0% - 30%		-0,146	0,153
0% - 50%	60% de escória	0,093	0,469
30% - 50%	91 dias	0,239	0,008
0% - 30%		0,476	< 0,005
0% - 50%	0% de escória	-0,563	< 0,005
30% - 50%	126 dias	-1,039	< 0,005
0% - 30%		-0,323	< 0,005
0% - 50%	60% de escória	-0,328	< 0,005
30% - 50%	126 dias	-0,005	0,998
0% - 30%		0,627	< 0,005
0% - 50%	0% de escória	-0,557	< 0,005
30% - 50%	182 dias	-1,184	< 0,005
0% - 30%		-0,048	0,813
0% - 50%	60% de escória	0,051	0,796
30% - 50%	182 dias	0,099	0,422

Tabela H.2 - Migração de cloretos - Comparações entre os teores de escória fixando-se os níveis dos fatores teor de RCFL e idade

<b>Comparação</b>	<b>Nível</b>	<b>Diferença</b>	<b>p-valor</b>
0% - 60%	0% de RCFL 28 dias	3,059	< 0,005
0% - 60%	30% de RCFL 28 dias	2,544	< 0,005
0% - 60%	50% de RCFL 28 dias	3,315	< 0,005
0% - 60%	0% de RCFL 63dias	2,809	< 0,005
0% - 60%	30% de RCFL 63 dias	2,404	< 0,005
0% - 60%	50% de RCFL 63 dias	3,622	< 0,005
0% - 60%	0% de RCFL 91 dias	2,702	< 0,005
0% - 60%	30% de RCFL 91 dias	2,145	< 0,005
0% - 60%	50% de RCFL 91 dias	3,304	< 0,005
0% - 60%	0% de RCFL 126 dias	3,543	< 0,005
0% - 60%	30% de RCFL 126 dias	2,744	< 0,005
0% - 60%	50% de RCFL 126 dias	3,778	< 0,005
0% - 60%	0% de RCFL 182 dias	3,527	< 0,005
0% - 60%	30% de RCFL 182 dias	2,853	< 0,005
0% - 60%	50% de RCFL 182 dias	4,136	< 0,005

Tabela H.3 - Migração de cloretos - Comparações entre as idades fixando-se os níveis dos fatores teor de RCFL e teor de escória em 0%

<b>Comparação</b>	<b>Nível</b>	<b>Diferença</b>	<b>p-valor</b>
28 – 63	0% de RCFL	0,253	0,014
28 – 91		0,375	< 0,005
28 – 126		0,148	0,33
28 – 182		-0,159	0,263
63 – 91		0,122	0,532
63 - 126		-0,105	0,671
63 - 182		-0,412	< 0,005
91 - 126		-0,227	0,036
91 - 182		-0,534	< 0,005
126 - 182		-0,307	< 0,005
28 – 63	30% de RCFL	0,251	0,015
28 – 91		0,233	0,029
28 - 126		0,071	0,894
28 - 182		-0,085	0,815
63 – 91		-0,018	0,999
63 - 126		-0,179	0,156
63 - 182		-0,336	< 0,005
91 - 126		-0,162	0,245
91 - 182		-0,318	< 0,005
126 - 182		-0,157	0,276
28 – 63	50% de RCFL	-0,034	0,993
28 – 91		0,157	0,275
28 - 126		-0,124	0,513
28 - 182		-0,426	< 0,005
63 – 91		0,191	0,114
63 - 126		-0,09	0,782
63 - 182		-0,392	< 0,005
91 - 126		-0,281	< 0,005
91 - 182		-0,582	< 0,005
126 - 182		-0,301	< 0,005

Tabela H.4 - Migração de cloretos - Comparações entre as idades fixando-se os níveis dos fatores teor de RCFL e teor de escória em 60%

Comparação	Nível	Diferença	p-valor
28 – 63	0% de RCFL	0,002	1
28 – 91		0,018	0,999
28 - 126		0,632	< 0,005
28 - 182		0,31	< 0,005
63 – 91		0,016	1
63 - 126		0,63	< 0,005
63 - 182		0,307	< 0,005
91 - 126		0,614	< 0,005
91 - 182		0,291	< 0,005
126 - 182		-0,323	< 0,005
28 – 63	30% de RCFL	0,111	0,623
28 – 91		-0,166	0,218
28 - 126		0,271	0,007
28 - 182		0,223	0,041
63 – 91		-0,277	0,005
63 - 126		0,16	0,254
63 - 182		0,112	0,609
91 - 126		0,437	< 0,005
91 - 182		0,39	< 0,005
126 - 182		-0,048	0,974
28 – 63	50% de RCFL	0,273	0,006
28 – 91		0,145	0,352
28 - 126		0,339	< 0,005
28 - 182		0,395	< 0,005
63 – 91		-0,128	0,483
63 - 126		0,066	0,92
63 - 182		0,122	0,533
91 - 126		0,194	0,105
91 - 182		0,25	0,015