

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**YUSTANE PAULA DIETRICH**

**DURABILIDADE DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM  
ADIÇÃO DE RESÍDUOS PROVENIENTES DE ROCHAS  
ORNAMENTAIS FRENTE À AÇÃO DE ÍONS CLORETO**

VITÓRIA – ES

2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

YUSTANE PAULA DIETRICH

**DURABILIDADE DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM  
ADIÇÃO DE RESÍDUOS PROVENIENTES DE ROCHAS  
ORNAMENTAIS FRENTE À AÇÃO DE ÍONS CLORETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós -  
Graduação em Engenharia Civil do Centro  
Tecnológico da Universidade Federal do Espírito  
Santo, como requisito parcial para obtenção do  
título de Mestre em Engenharia Civil, na área de  
concentração Construção Civil.

VITÓRIA – ES

2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Setorial Tecnológica,  
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

D566d Dietrich, Yustane Paula, 1986-  
Durabilidade de concretos produzidos com adição de  
resíduos provenientes de rochas ornamentais frente à ação de  
íons cloreto / Yustane Paula Dietrich. – 2015.  
181 f. : il.

Orientador: Geilma Lima Vieira.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade  
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Concreto armado. 2. Durabilidade (Engenharia). 3. Íons. 4.  
Cloretos. 5. Corrosão. 6. Resíduos sólidos. 7. Rochas  
ornamentais. I. Vieira, Geilma Lima. II. Universidade Federal do  
Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

---

**DURABILIDADE DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM ADIÇÃO DE RESÍDUOS  
PROVENIENTES DE ROCHAS ORNAMENTAIS FRENTE À AÇÃO DE ÍONS  
CLORETO.**

**YUSTANE PAULA DIETRICH**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL, Área de Concentração Construção Civil, aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo.

Vitória, 16 de abril de 2015.

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Geilma Lima Vieira  
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES  
Orientadora

---

Prof. Dr. Ing. João Luiz Calmon Nogueira da Gama  
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES  
Membro interno

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Geórgia Serafim Araújo  
Instituto Federal do Espírito Santo - IFES  
Membro da banca examinadora

*Aos meus pais,  
Eliete e Paulo.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento da bolsa de estudo para o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço a todo o corpo docente e administrativo do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC-UFES).

À Universidade Federal do Espírito Santo pela infraestrutura para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

À empresa Holcim pela doação do cimento necessário para as pesquisas de mestrado do PPGEC-UFES.

À empresa doadora da Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO), Vitória Stone.

À professora orientadora Geilma Lima Vieira, que acompanhou junto à betoneira o desenrolar das pesquisas do “Grupo da Lama”, pela orientação, pela dedicação e pela inspiração.

Ao professor Fernando Avancini Tristão, pelo grande exemplo profissional desde a graduação.

Ao professor João Luiz Calmon Nogueira da Gama pelas lições científicas e filosóficas.

Aos servidores e funcionários do Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção, LEMAC-UFES, Loriato, Carlos, Henrique, Márcio, Tião, Jorge e Xuxa.

Ao professor e amigo, Ary Gomes da Silva, pela grande ajuda na reta final e à professora Maristela Gomes Silva, por me confiar seus preciosos livros.

Agradeço aos meus pais amados e à minha família por todo o amparo, carinho e compreensão.

Aos amigos mestrados, com quem dividi horas de estudo, conversa, pesquisa, risadas: Sandra, Soraia, Ricardo e Aline e às amigas do “Grupo da Lama” Ruby, Vane e Juliana.

Aos amigos da iniciação científica, Maxwell, Nadia, Júlia e Gabriela que muito me ajudaram.

Aos amigos que sempre me motivaram e entendiam quando eu “sumia”: Janá, Felipe, Larissa, Paulinha, Mateus, Vitor Batisti, Cecília, Alessandra, Thiers, Carol Bergami e Fabrizzio.

À todos que contribuíram de alguma forma no desenvolvimento desta pesquisa.

## RESUMO

DIETRICH, Y. P. **DURABILIDADE DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM ADIÇÃO DE RESÍDUOS PROVENIENTES DE ROCHAS ORNAMENTAIS FRENTE À AÇÃO DE ÍONS CLORETO**. 2015. 181f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.

Os íons cloreto são considerados responsáveis por iniciar o processo de corrosão do aço e ainda por acelerar as reações de oxirredução envolvidas. A durabilidade das estruturas de concreto armado frente ao ataque químico depende da espessura e da qualidade do concreto de cobrimento. Neste trabalho é avaliado o processo de corrosão das armaduras induzido pela ação de íons cloreto, em concretos produzidos com adição do Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO), resíduo abundante no Espírito Santo. Foram produzidos concretos com três níveis de relação água/cimento - 0,45; 0,55 e 0,65 – e quatro níveis de adição de RBRO - 0%, 5%, 10% e 15% - em relação à massa de cimento. Foram avaliados no estado fresco os índices de consistência e as massas específicas dos concretos. No estado endurecido foram avaliadas resistência à compressão axial, absorção de água por imersão e capilar. 216 corpos de prova cilíndricos de concreto foram moldados. Foram produzidos 36 prismas de concreto, com 2 corpos de prova de aço CA-50 cada, submetidos a ciclos de imersão parcial em solução com 5% de NaCl, por 48 horas, e secagem em estufa ventilada, a 50°C, por 5 dias. O potencial de corrosão das armaduras foi medido após imersão e após secagem dos corpos de prova, até a despassivação das armaduras. Por último, foi feito o ensaio colorimétrico por aspersão do indicador  $\text{AgNO}_3$  a 0,1 mol/L para exame da altura de penetração dos íons  $\text{Cl}^-$ . Utilizou-se o software Statgraphics® para a análise de regressão linear múltipla e Anova das variáveis dependentes estudadas. A utilização RBRO pode diminuir o abatimento do concreto e a sua massa específica no estado fresco. A adição atende aos requisitos de resistência à compressão axial. Não se mostrou clara a contribuição da adição de RBRO nos resultados de potencial de corrosão, entretanto, o tempo de indução da corrosão aumentou com o aumento do percentual de adição. O teor de 5% de RBRO mostrou ser o mais vantajoso do ponto de vista da durabilidade mostrando a menor contaminação de  $\text{Cl}^-$  no ensaio colorimétrico.

**Palavras chave:** durabilidade; íons cloreto; corrosão eletroquímica; indicador  $\text{AgNO}_3$ ; Resíduos sólidos; Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO);fíler..

## ABSTRACT

DIETRICH, Y. P. **DURABILITY OF CONCRETE CONTEINING ORNAMENTAL ROCK WASTE AS MINERAL ADDITION FACING CHLORIDE ION ATTACK.** .Dissertation (Master in Civil Engineering) - Graduate Program in Civil Engineering, Federal University of Espírito Santo, Vitória, 2015.

Chlorides are considered responsible for steel corrosion process initiation by the breakdown of the passive film and acceleration of electrochemical redox reactions. To prevent the chloride penetration in seaside concrete structures it is important to invest in high quality concrete. The Ornamental Rock Processing Waste (RBRO, in Portuguese) is widely produced in Espírito Santo, Brazil, and has potential to be used as mineral addition in cement based materials. This research evaluates the reinforcement steel corrosion process induced by chloride ions. Three levels of water / cement ratio was used - 0.45; 0.55 and 0.65 – and four levels of RBRO addition - 0%, 5%, 10% and 15% - by weight of the binder. Were evaluated consistency, fresh concrete specific mass; compressive strength, water absorption and capillary absorption of 216 cylindrical concrete specimens. 72 steel bars (CA -50) were embedded in 36 prismatic concrete specimens and exposed to induction and acceleration of corrosion process cycles. The specimens were stored in partial immersion in solution with 5% NaCl for 48 hours, and then they were dried in a ventilated oven thermostatically controlled at 50 °C for 5 days. The reinforcement corrosion potential was measured after immersion and after drying until the passive film breakdown. Finally, the colorimetric method was performed by spraying the AgNO<sub>3</sub> solution (0.1 mol/L) to examine the chloride penetration in concrete specimens. Statgraphics® software was used for multiple linear regression and ANOVA analysis. Results shows that the RBRO as addition in fresh concrete can decrease its workability and density; on the other hand the axial compressive strength requirements were achieved. It was not clear the effect of RBRO in corrosion potential measurements, however, the induction time increased with increasing RBRO amounts. The 5% RBRO content proved to be the most beneficial addition ratio at durability perspective, it had the lowest contamination of chloride content by using a silver nitrate solution colorimetric method.

**Keywords:** *Durability, chloride; corrosion; AgNO<sub>3</sub> solution, solid waste; ornamental rock waste.*



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>26</b>
1.1 JUSTIFICATIVA.....	33
1.2 HIPÓTESE.....	35
1.3 OBJETIVOS .....	35
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	35
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	36
1.6 PESQUISADORES DE REFERÊNCIA.....	37
1.7 LIMITAÇÕES DO TEMA .....	38
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>40</b>
2.1 ADIÇÕES MINERAIS.....	40
2.1.1 Influência das adições minerais no concreto fresco .....	43
2.1.2 Influência das adições minerais no concreto endurecido.....	47
2.1.3 Influência das adições minerais nas características de durabilidade dos concretos .....	48
2.2 RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS .....	51
2.2.1 Caracterização .....	53
2.2.2 Estudos em Materiais de Construção Civil .....	56
2.2.2.1 Estudos em Argamassas.....	57
2.2.2.2 Estudos em Concretos.....	58
2.2.3 Durabilidade de concretos com RBRO.....	59
2.3 CORROSÃO DAS ARMADURAS EM CONCRETO ARMADO .....	62
2.3.1 Fatores intervenientes .....	67
2.3.2 Mecanismos de transporte.....	71
<b>3 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>74</b>
3.1 INTRODUÇÃO .....	74
3.2 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS .....	74
3.2.1 Variáveis do programa experimental.....	74
3.3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	77
3.3.1 Corpos de prova.....	81
3.4 MATERIAIS.....	83

3.4.1	Água de amassamento.....	83
3.4.2	Agregados.....	83
3.4.2.1	<i>Agregado Miúdo</i> .....	83
3.4.2.2	<i>Agregado Graúdo</i> .....	84
3.4.3	Material Cimentício .....	85
3.4.4	Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO) .....	88
3.4.4.1	<i>Tratamento da Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais</i> .....	89
3.4.4.2	<i>Caracterização do RBRO</i> .....	91
3.4.5	Armaduras .....	97
3.5	MÉTODOS E PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS .....	99
3.5.1	Dosagem Experimental dos Concretos .....	99
3.5.1.1	<i>Teor ideal de argamassa</i> .....	99
3.5.1.2	<i>Definição dos traços de concreto</i> .....	102
3.5.2	Concreto no estado fresco .....	103
3.5.2.1	<i>Consistência do concreto</i> .....	103
3.5.2.2	<i>Massa Específica</i> .....	103
3.5.3	Concreto no estado endurecido .....	104
3.5.3.1	<i>Resistência à compressão axial</i> .....	104
3.5.4	Ensaio de Durabilidade.....	104
3.5.4.1	<i>Absorção de água por imersão e fervura</i> .....	104
3.5.4.2	<i>Absorção de água por capilaridade</i> .....	105
3.5.4.3	<i>Indução e aceleração da corrosão por ataque de cloretos</i> .....	106
3.5.4.4	<i>Potencial de Corrosão</i> .....	107
3.5.5	Método Colorimétrico por aspersão de nitrato de prata.....	109
3.5.6	Projeto Estatístico .....	110
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>114</b>
4.1	AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO	114
4.1.1	Consistência do concreto.....	114
4.1.2	Massa Específica do concreto fresco .....	115
4.2	AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	118
4.2.1.1	<i>ANOVA</i> .....	119
4.2.1.2	<i>Regressão Múltipla</i> .....	121
4.3	AVALIAÇÃO DOS ENSAIOS DE DURABILIDADE .....	124

4.3.1	Absorção de água por imersão e fervura.....	124
4.3.1.1	<i>ANOVA</i> .....	126
4.3.2	Absorção de água por capilaridade.....	128
4.3.3	Potencial de corrosão.....	130
4.3.3.1	<i>Análise do potencial de corrosão após imersão</i> .....	138
4.3.3.2	<i>Análise do potencial de corrosão após secagem</i> .....	140
4.3.4	Ensaio colorimétrico por aspensão do indicador químico nitrato de prata.....	142
4.3.5	Perda de massa das armaduras.....	147
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>150</b>
5.1	CONCLUSÃO GERAL.....	150
5.2	CONCLUSÕES ESPECÍFICAS.....	151
5.2.1	Concreto em seu estado fresco.....	151
5.3	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	152
5.4	ENSAIOS DE DURABILIDADE.....	153
5.4.1	Absorção de água por imersão e fervura.....	153
5.4.2	Absorção de água por capilaridade.....	154
5.4.3	Potencial de Corrosão.....	154
5.4.3.1	<i>Potencial de corrosão após imersão</i> .....	154
5.4.3.2	<i>Potencial de corrosão após secagem</i> .....	155
5.4.4	Ensaio colorimétrico.....	155
5.4.5	Perda de Massa.....	155
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>158</b>
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	159
	<b>REFERÊNCIAS NORMATIVAS</b> .....	<b>161</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>163</b>
	<b>APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS</b> .....	<b>171</b>
	<b>APÊNDICE B – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DURABILIDADE</b> .....	<b>175</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Recuperação do desempenho de edificações por meio de manutenções; e responsabilidades das partes envolvidas. ....	27
Figura 2 - Quantidade de resíduo gerado em 2010 na União Europeia .....	27
Figura 3 – Comparação entre as exportações acumuladas da indústria brasileira de rochas ornamentais nos anos de 2013 a janeiro de 2015. ....	31
Figura 4 - Produção brasileira por tipo de rocha, 2013.....	32
Figura 5 – Localização dos edifícios cujas fachadas foram analisadas em Vila Velha, ES.....	33
Figura 6 – Partículas de cimento Portland em pasta (a) sem aditivo, (b) com aditivo superplastificante e (c) com superplastificante e adição mineral de elevada finura. ....	42
Figura 7 – Representação esquemática que explica a melhora no grau de hidratação do cimento nas primeiras idades em virtude da utilização de adições minerais nas misturas de argamassas. ....	43
Figura 8 – Ensaio de abatimento de tronco de cone em concretos contendo adições e agregados reciclados. ....	44
Figura 9 – Abatimento dos concretos convencional e de alto desempenho com cinza ultrafina de casca de arroz nos teores de 10,15 e 20% como substituição do cimento (a) sem aditivo e (b) com aditivo superplastificante.....	45
Figura 10 – (a) Taxa de liberação de calor na hidratação do cimento em pastas com adição de 0, 5, 10 e 15% de adição de $TiO_2$ (T1,T2,T3) e (b) total de calor liberado pelas misturas. ....	46
Figura 11 - (a) Taxa de liberação de calor na hidratação do cimento em pastas com adição de 0, 5, 10 e 15% de adição de calcário (L1,L2,L3) e (b) total de calor liberado pelas misturas .	46
Figura 12 – Valores médios de resistência à compressão dos concretos com cinza residual do bagaço de cana-de-açúcar.....	47
Figura 13 – Valores médios de resistência à compressão dos concretos com cinzas ultrafinas de bagaço de cana-de-açúcar. ....	48

Figura 14 – Penetração de íons cloreto descrita em carga passante medida em tempos de cura de (a) 21 dias e (b) 56 dias para os concretos com adição de cinzas volantes (0, 15, 30%) e vários teores de substituição de agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado. ....	49
Figura 15 – Etapas do processo de produção das rochas ornamentais. ....	51
Figura 16 – (a) Tear de lâminas de aço, (b) tear de fios diamantados e (c) resíduos provenientes do corte em teares distintos.....	52
Figura 17 – Tanques de sedimentação em empresa capixaba beneficiadora de rochas ornamentais.....	53
Figura 18 – Lagoas de sedimentação da lama de beneficiamento de rochas lançado diretamente no solo. ....	53
Figura 19 – Difratograma de raios X dos resíduos de (a) granito e (b) mármore.....	54
Figura 20 – (a) difração de raios X da amostra de resíduo de granito e (b) resíduo utilizado como pigmento amarelo-alaranjado para argamassas.....	57
Figura 21 – Efeito da substituição de cimento por resíduo de rocha no teor de 10% comparado às misturas de controle em curas distintas: (a) cura úmida e (b) cura em autoclave. ....	60
Figura 22 – Micrografias das argamassas (a) de controle em cura úmida, (b) com 10% resíduo de rocha em cura úmida, (c) de controle e cura em autoclave, (d) com 10% resíduo de rocha e cura em autoclave. ....	61
Figura 23 - Modelo de vida útil de Tuutti (1982). ....	63
Figura 24 – Aeração superficial diferencial causadas por concreto contendo: (a) fissuras ,(b) vazios, (c) diferentes constituições. ....	64
Figura 25 – Processo eletroquímico de corrosão no concreto armado. ....	65
Figura 26 – Microcélula e macrocélula de corrosão eletroquímica do aço em concreto armado. ....	66
Figura 27 – (a) Medidas mensais de concentração de $Cl^-$ em armaduras expostas por 24 meses em ambientes marinhos distantes a 95m e 375m do mar ; (b) taxa de corrosão do aço nas duas atmosferas marinhas e na industrial. ....	68

Figura 28 - Situações de acesso de cloretos transportados pelo ar nas proximidades do mar.	68
Figura 29 –Concentração de cloretos para cinco configurações estruturais .....	69
Figura 30 – Tempo para iniciação da corrosão ( <i>TCI: time-to corrosion initiation</i> ) em função da distância da estrutura até o mar, nas espessuras de cobertura indicadas, para armaduras com diâmetro nominal de (a)12mm, (b) 16mm e (c) 25mm. ....	70
Figura 31 – Programa Experimental - geral. ....	78
Figura 32 – Definição das propriedades relação água/cimento e percentual de adição.....	79
Figura 33 - Geometria dos corpos de prova para os ensaios de durabilidade em corte (a) e em planta(b). E corpo de prova cilíndrico (c) para ensaios de em concreto endurecido. ....	82
Figura 34 –(a) Forma em madeira para a moldagem de corpos de prova prismáticos, (b) corpo de prova após desforma, preparado para o processo de cura submersa. ....	82
Figura 35 – Composição granulométrica do agregado miúdo.....	84
Figura 36 – Composição granulométrica do agregado graúdo – zona granulométrica correspondente a $d/D = 9,5/25$ (d = menor dimensão; D = maior dimensão). ....	85
Figura 37 - Quantidade de estudos brasileiros coletados e mapeados por Torres (2001) sobre corrosão por ação de cloretos em função do tipo de cimento.....	86
Figura 38- Distribuição Granulométrica do cimento CPV ARI. ....	86
Figura 39 – Resíduos produzidos na etapa de desdobramento dos blocos .....	88
Figura 40 – Tratamento para a produção do resíduo RBRO a partir da Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO D). ....	89
Figura 41 – Procedimento para quarteamento (a) o material pré-homogeneizado é espalhado em local adequado, (b) é dividido em quatro partes aproximadamente iguais e (c) são descartadas duas partes opostas. ....	89
Figura 42 – (a) LBRO após secagem ao ar; (b) destorroamento do material em betoneira, (c) preparação para destorroamento manual; (d).material sendo revirado; (d) resíduo homogeneizado, pronto para o quarteamento. ....	90

Figura 43 –(a) Amostras coletadas após quarteamento; (b) aparência final do RBRO. ....	90
Figura 44 - Caracterização do resíduo RBRO.....	91
Figura 45 – Caracterização do RBRO: (a) massa específica (Le Chatelier); (b) finura por meio da peneira n <sup>o</sup> 325 e (c) finura pelo método da permeabilidade de Blaine.....	92
Figura 46 – Curva de distribuição granulométrica do RBRO. ....	93
Figura 47 – Difractograma de raios X do RBRO.....	95
Figura 48 – Micrografia do RBRO com pontos analisados por EDS, ampliação 1000 vezes. ....	96
Figura 49 - Limpeza das barras de aço em solução de ácido clorídrico na concentração .....	98
Figura 50 – (a) Barras após secagem com jato de ar quente, (b) aferição das massas em balança de alta precisão e (c) barras identificadas. ....	98
Figura 51 – Cimento CPV ARI e agregado miúdo pesados e separados para a dosagem do concreto.....	100
Figura 52 - Abatimento de tronco de cone sofre alteração a medida que se aumenta o teor de argamassa (a) 0,0 mm, (b) de 30 mm e (c) 100 mm. ....	101
Figura 53 - Diagrama de dosagem do concreto produzido com cimento CPV ARI para abatimento de 70 mm. ....	101
Figura 54 – (a) Recipiente para manter a ebulição e (b) corpos de prova durante o processo de ebulição. ....	105
Figura 55 – (a) Corpos de prova em recipiente munido de suporte o qual garante o nível d'água de 5±1 mm acima de sua base; (b) corpos de prova após rompimento por compressão diametral.....	106
Figura 56 – Indução e aceleração da corrosão: (a) corpos de prova em imersão em solução rica em cloretos e (b) secagem em estufa ventilada.....	106
Figura 57 – (a) equipamentos utilizados no ensaio de potencial de corrosão; (b) procedimento do ensaio.....	107

Figura 58 –(a) esquema do ensaio de potencial de corrosão; (b) corpo de prova submetido ao ensaio.....	108
Figura 59 – Aspecto típico da superfície de concreto após aspersão dos indicadores (a)AgNO <sub>3</sub> +fluoresceína; (b)AgNO <sub>3</sub> + K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub> ; (c) AgNO <sub>3</sub> . ....	110
Figura 60 – (a) corpo de prova depois da aspersão de AgNO <sub>3</sub> exibe a área marrom, contendo cloretos combinados e a área de cor pouco alterada, contaminada com cloretos livres. (b) corpos de prova protegidos em sacolas plásticas após o ensaio. ....	110
Figura 61 – Índice de consistência dos concretos produzidos.....	114
Figura 62- Massas específicas médias dos concretos produzidos. ....	115
Figura 63 – Efeito isolado da variável independente a/c sobre a massa específica dos concretos.....	117
Figura 64 – Massa específica em função da interação entre a relação a/c e %RBRO.....	117
Figura 65 - Efeito isolado da variável independente relação a/c sobre a resistência à compressão axial.....	120
Figura 66 - Efeito isolado da variável independente % RBRO sobre a resistência à compressão axial.....	120
Figura 67 – Resistência à compressão axial (f <sub>c</sub> ) em função da interação entre a relação a/c e %RBRO.....	121
Figura 68 – Efeito isolado da variável relação a/c sobre o comportamento da resistência à compressão prevista pelo modelo da equação 10.....	122
Figura 69 – Efeito isolado da variável %RBRO sobre o comportamento da resistência à compressão prevista pelo modelo da equação 10.....	123
Figura 70 - Comparação das curvas do comportamento da resistência à compressão axial em função da interação entre relação a/c e %RBRO previstas pelo modelo com a curva obtida na ANOVA. ....	124
Figura 71 - Efeito isolado da variável independente a/c sobre a absorção por imersão e fervura. ....	127



Figura 72 - Efeito isolado da variável independente %RBRO sobre a absorção por imersão e fervura. ....	127
Figura 73- Absorção por imersão e fervura em função da interação entre a relação a/c e %RBRO.....	128
Figura 74- Evolução do potencial de corrosão das armaduras embutidas no concreto (a) CREF 45, (b) CREF 55 e (c) CREF 65. ....	134
Figura 75 – Evolução do potencial de corrosão das armaduras embutidas no concreto (a) CR5 45, (b) CR5 55 e (c) CR5 65.....	135
Figura 76 - Evolução do potencial de corrosão das armaduras embutidas no concreto (a) CR10 45, (b) CR10 55 e (c) CR10 65.....	136
Figura 77 - Evolução do potencial de corrosão das armaduras embutidas no concreto (a) CR15 45, (b) CR15 55, (c) CR15 65. ....	137
Figura 78 - Efeito isolado da variável independente relação a/c sobre o potencial de corrosão após imersão. ....	138
Figura 79 – Efeito isolado da variável independente relação a/c sobre o potencial de corrosão após secagem. ....	140
Figura 80 – Potencial de corrosão após secagem em função da interação entre a relação a/c e %RBRO.....	141
Figura 81 - Efeito isolado da variável independente relação a/c sobre a altura de penetração de cloretos. ....	144
Figura 82 - Efeito isolado da variável independente %RBRO sobre a altura de penetração de cloretos. ....	144
Figura 83 – Formação de duas áreas de coloração distintas na superfície dos concretos formadas pela aspensão de nitrato de prata nos concretos (a) (b) (c) e (d) de relação a/c igual a 0,45; (e).(f).(g).(e.) e (h) de relação a/c igual a 0,55; (i), (j), (l), (m) de relação a/c igual a 0,65. ....	146
Figura 84 – Percentual de perda de massa das armaduras. ....	147

Figura 85 – Fotografias das barras após ciclos de indução e aceleração da corrosão .....	148
--	-----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção de resíduo de concreto em obras de construção, demolição e reforma... 28	28
Tabela 2 - Gastos com manutenção e reparo de estruturas de concreto armado em países europeus no ano de 2004 e, em 2002, na Itália..... 34	34
Tabela 3 – Distribuição regional da produção bruta de rochas ornamentais no Brasil em 2013. .... 35	35
Tabela 4 - Composição química dos resíduos de granito e mármore (% em peso)..... 54	54
Tabela 5 – Caracterização das lamas de beneficiamento de rochas ornamentais proveniente de teares de lâminas de aço (LBRO G) e de teares de fios diamantados (LBRO D). .... 55	55
Tabela 6 - Composição dos materiais utilizados determinadas por espectrometria por fluorescência de raios X. (%). .... 58	58
Tabela 7 - Composição química do resíduo de rocha utilizado..... 59	59
Tabela 8 – Projeto fatorial completo dos ensaios em concreto endurecido. .... 79	79
Tabela 9 - Projeto fatorial completo dos ensaios de durabilidade. .... 80	80
Tabela 10 – Projeto fatorial fracionado para repetição dos ensaios em concreto endurecido.. 81	81
Tabela 11 - Projeto fatorial fracionado para repetição dos ensaios de durabilidade. .... 81	81
Tabela 12 - Propriedades físicas do agregado miúdo. .... 83	83
Tabela 13 - Propriedades físicas do agregado graúdo..... 84	84
Tabela 14 - Caracterização física e química do cimento CPVARI..... 87	87
Tabela 15– Caracterização física do RBRO..... 92	92
Tabela 16 – Composição química do RBRO. .... 94	94
Tabela 17 – Resultado da análise química do EDS para o RBRO. .... 96	96

Tabela 18 – Resultados do ensaio de pozolanicidade do RBRO com cal e com cimento. ....	97
Tabela 19- Determinação do teor ideal de argamassa para o traço intermediário (1:5,0). ....	100
Tabela 20 – Códigos e traços unitários em massa dos concretos produzidos. ....	102
Tabela 21 – Probabilidade de haver corrosão eletroquímica como função do intervalo do potencial de corrosão medido por meio dos eletrodos de referência, de acordo com ASTM C-876:91 (ASTM, 2011).....	108
Tabela 22 – Análise de variância do efeito da relação a/c e % RBRO sobre a massa específica dos concretos. ....	116
Tabela 23 - Resistência média dos concretos. ....	118
Tabela 24 – Análise de Variância das variáveis independentes na resistência à compressão axial. ....	119
Tabela 25 – Coeficientes de regressão linear para resistência à compressão.....	121
Tabela 26 - Proposta de classificação para concretos de acordo com a porosidade e a absorção de água. ....	125
Tabela 27 – Absorção média dos concretos por imersão e fervura e sua classificação de acordo com Helene (1983) apud Carrijo(2005).....	125
Tabela 28 - Análise de Variância das variáveis independentes na absorção por imersão e fervura. ....	126
Tabela 29 – Absorção capilar média dos concretos.....	129
Tabela 30- Análise de variância das variáveis a/c e % RBRO sobre a absorção por capilaridade.....	129
Tabela 31 – Zona de probabilidade de corrosão para o eletrodo de calomelano saturado (ECS). ....	130
Tabela 32 – Idades dos concretos no início e no final dos ciclos de indução e aceleração da corrosão. ....	132

Tabela 33 - Análise de variância das variáveis a/c e % RBRO sobre o potencial de corrosão após imersão. ....	138
Tabela 34- Coeficientes da regressão para $ E_{corr} _{imersão}$ . ....	139
Tabela 35 - Análise de variância das variáveis a/c e % RBRO sobre o potencial de corrosão após imersão. ....	140
Tabela 36- Coeficientes da regressão para $ E_{corr} _{secagem}$ . ....	142
Tabela 37 - Alturas médias de penetração de cloretos nas famílias de concreto estudadas...	143
Tabela 38 – ANOVA para a análise da altura de penetração de cloretos. ....	143
Tabela 39 – Abatimento e massa específica dos concretos em seu estado fresco.....	171
Tabela 40 - Resultados de Resistência à Compressão Axial aos 28 dias dos concretos com relação a/c 0,45. ....	172
Tabela 41 - Resultados de Resistência à Compressão Axial aos 28 dias dos concretos com relação a/c 0,55. ....	173
Tabela 42 - Resultados de Resistência à Compressão Axial aos 28 dias dos concretos com relação a/c 0,65. ....	174
Tabela 43 – Dados coletados de potencial de corrosão (mV) após imersão dos corpos de prova em solução rica em NaCl (5%). ....	175
Tabela 44 – Dados coletados de potencial de corrosão (mV) após secagem em estufa ventilada a 50°C. ....	177
Tabela 45 –Potencial de corrosão médio (mV) do ciclo C 01 ao C 11. ....	179

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação, composição e características das adições minerais. ....	41
Quadro 2 - – Mecanismos de transporte, leis, força motriz e grau de saturação. ....	72
Quadro 3 – Variáveis envolvidas na pesquisa. ....	75
Quadro 4 - Níveis da variável independente utilizadas em outras pesquisas em matrizes cimentícias. ....	75
Quadro 5 - Níveis dos fatores para os ensaios em concreto fresco. ....	76
Quadro 6 – Níveis dos fatores para o ensaio em concreto endurecido. ....	76
Quadro 7 – Níveis dos fatores para os ensaios de durabilidade. ....	76
Quadro 8 – Projeto fatorial cruzado completo dos ensaios em concreto endurecido. ....	77
Quadro 9 - (a), (b) e (c) alternativas de combinações de variáveis para o projeto fatorial fracionado, ou repetição. ....	80
Quadro 10 – Considerações sobre a fronteira de mudança de cor em superfície de concretos ensaiados aspergida com indicador nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ ). ....	109

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c – água/cimento

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AMR – Agregado Miúdo Reciclado

AR – Agregado Reciclado

ANOVA – Análise de variância

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CIBC – Câmara Brasileira da Indústria da Construção

CPV ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial

CP I – Cimento Portland Comum

CREF 45 – Concreto de referência de relação a/c igual a 0,45

CREF 55 – Concreto de referência de relação a/c igual a 0,55

CREF 65 – Concreto de referência de relação a/c igual a 0,65

CR5 45 – Concreto produzido com 5% de adição de RBRO e relação a/c igual a 0,45

CR5 55 – Concreto produzido com 5% de adição de RBRO e relação a/c igual a 0,55

CR5 65 – Concreto produzido com 5% de adição de RBRO e relação a/c igual a 0,65

CR10 45 – Concreto produzido com 10% de adição de RBRO e relação a/c igual a 0,45

CR10 55 – Concreto produzido com 10% de adição de RBRO e relação a/c igual a 0,55

CR10 65 – Concreto produzido com 10% de adição de RBRO e relação a/c igual a 0,65

CR15 45 – Concreto produzido com 15% de adição de RBRO e relação a/c igual a 0,45

CR15 55 – Concreto produzido com 15% de adição de RBRO e relação a/c igual a 0,55

CR15 65 – Concreto produzido com 15% de adição de RBRO e relação a/c igual a 0,65

DRX – Difração de Raios X

EDS – Espectroscopia por Energia Dispersiva

ES – Espírito Santo

F<sub>c</sub> – Resistência à compressão axial

F<sub>cal</sub> – Valor calculado de Fischer

FRX – Fluorescência de Raios X

GL – Graus de liberdade

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

ISO – International Organization for Standardization

LBRO – Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais

LBRO G – LBRO proveniente do tear de lâminas de aço (com granalha de ferro)

LBRO D – LBRO proveniente do tear de fios diamantados (sem granalha de ferro)

LCSM – Laboratório de Caracterização de Superfícies de Materiais

LDCM – Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais

LEMAC – Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção

M.Q. – Média quadrática

NBR – Norma Brasileira

NBR NM – Norma Mercosul

pH – Potencial hidrogeniônico

PIB – Produto Interno Bruto

PPGEC – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

RAS – Reação Álcali-Sílica

RBRO – Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais

RCC – Resíduo de Construção Civil

SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

SGM - Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral

SQ – Soma quadrática

UFES – Universidade Federal do Espírito Santo

VUP – Vida Útil de Projeto



*Capítulo 1*  
**Introdução**

---

## 1 INTRODUÇÃO

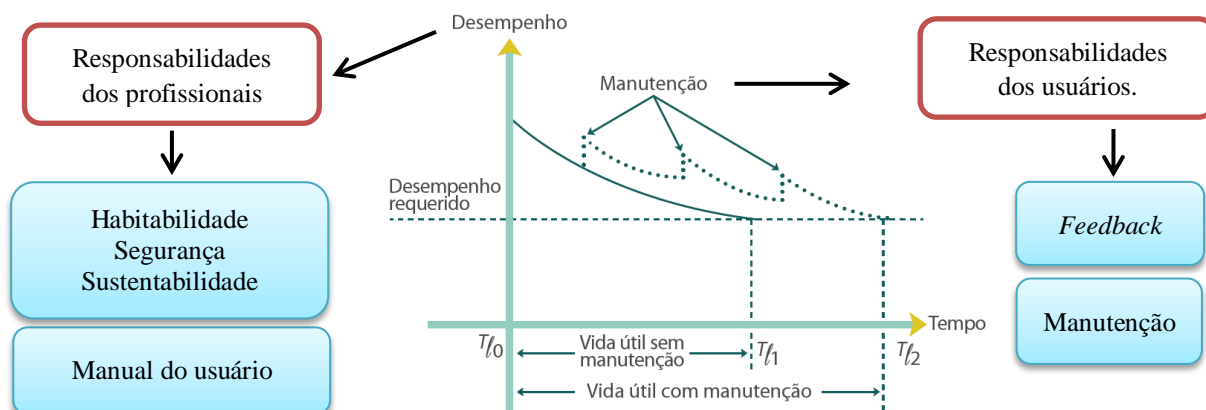
O concreto e sua combinação com o aço resultou numa solução estrutural largamente utilizada no mundo, o concreto armado. Muito se investiga sobre suas propriedades uma vez que o concreto possui uma microestrutura complexa, altamente heterogênea e seu relacionamento com as propriedades de engenharia - resistência, elasticidade, retração, fluência, fissuração e durabilidade - ainda não estão completamente explicadas (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Segundo Ribeiro *et al.* (2014) a adoção do concreto armado como estrutura supera o aço, o bloco cerâmico e a madeira por ser considerado mais durável que os outros já que o concreto preserva as armaduras do fenômeno da corrosão. Entretanto, o aperfeiçoamento das técnicas de construção permitiu o aumento das solicitações estruturais e, ao mesmo tempo, o dimensionamento de estruturas mais esbeltas, entre outras mudanças, influenciando nas características de durabilidade das edificações.

A insatisfação de consumidores devido ao alto investimento em imóveis que apresentam manifestações patológicas precocemente, instalações ou acabamentos mal executados, problemas relacionados à especificação de materiais, entre outros, são algumas das razões que impulsionaram a elaboração da NBR 15575 (ABNT, 2013), norma de desempenho das edificações. Suas exigências abrangem segurança, habitabilidade e sustentabilidade, ou seja, os edifícios devem proporcionar ao usuário segurança contra incêndio, segurança em seu uso e operação, estanqueidade, desempenho térmico e acústico, higiene, durabilidade, adequação ambiental, entre outras.

De acordo com a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC), essa norma representa o amadurecimento da engenharia habitacional e traz novos conceitos. Os prazos de Vida Útil de Projeto (VUP) dos sistemas da edificação, por exemplo, são classificados em três níveis diferentes, o mínimo, o intermediário e o superior. A nova classificação induz o mercado a atender não somente à VUP mínima, mas a superá-la por meio de soluções de melhor custo-benefício. O incentivo às melhores práticas contribui com a sustentabilidade uma vez que aumenta a vida útil do patrimônio e, como consequência, minimiza a exploração de recursos naturais, energia e água. A norma também vislumbra as incumbências dos responsáveis pela edificação, conforme esquematiza a Figura 1. (CBIC, 2013).

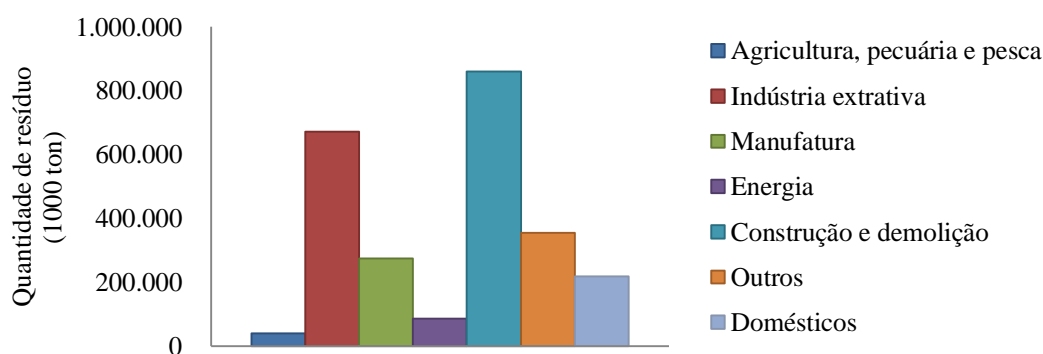
Figura 1 – Recuperação do desempenho de edificações por meio de manutenções; e responsabilidades das partes envolvidas.



Fonte: Adaptado de CBIC (2013).

A sustentabilidade na indústria alia ética e produtividade, características de grande importância social que promovem aceitabilidade nos mercados. De acordo com Mália, Brito Pinheiro e Bravo (2013), a construção civil consome mais matérias-primas e energia que outras indústrias na Europa fazendo com que os resíduos de construção civil (RCC) sejam os mais comuns no continente. Essa informação é confirmada por dados publicados pela *European Commission*, entre os resíduos gerados na União Europeia em 2010, provenientes de varias atividades, o RCC se destaca com aproximadamente 860 milhões de toneladas (34,4% do total) seguidos pelos resíduos de extração mineral que geram 672 milhões de toneladas (26,8% do total) como mostra a Figura 2 (EUROSTAT, 2013).

Figura 2 - Quantidade de resíduo gerado em 2010 na União Europeia por atividade.



Fonte: Eurostat (2013).

Mália *et al.* (2013) analisaram ainda resultados de trabalhos internacionais acerca de resíduos de construção, demolição e reforma de edifícios residenciais e não residenciais. Concluiu-se que a composição do resíduo gerado é em grande parte concreto e materiais cerâmicos. Os

quantitativos encontrados na geração do RCC em função do tipo de obra podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1 - Produção de resíduo de concreto em obras de construção, demolição e reforma.

<b>CATEGORIA</b>	<b>CONSTRUÇÃO</b> <b>kg/m<sup>2</sup></b>	<b>DEMOLIÇÃO</b> <b>kg/m<sup>2</sup></b>	<b>REFORMA</b> <b>kg/m<sup>2</sup></b>
Residencial	17,8 – 32,9	492 - 840	18,9 – 45,9
Não residencial	18,3 – 40,1	401 - 768	18,9 – 191,2

Fonte: Mália *et al.* (2013).

A indústria construção civil tem a capacidade de absorver resíduos sólidos gerados não só nas suas atividades, mas também em outros segmentos, tais como metalurgia, mineração, agricultura, estética e outros. A incorporação de resíduos em materiais diversos, todavia, depende da sua influência nas propriedades mecânicas, físicas e nas características de durabilidade desses produtos.

Lima *et al.* (2010) avaliaram a viabilidade da utilização de RCC e resíduo etileno acetato de vinila (EVA - proveniente da indústria de calçados), na produção de concretos. O RCC e o EVA foram empregados como substituição de agregados naturais. Os resultados mostraram redução na massa específica dos concretos em função dos vazios contidos no interior dos agregados alternativos. A menor massa específica dentre os concretos produzidos ocorreu com a mistura de maior substituição de agregados naturais por EVA. Houve decréscimos na resistência à compressão, entretanto, os autores afirmam ser possível a obtenção de concreto leve para fins estruturais.

As estruturas de concreto armado e estruturas de aço podem apresentar corrosão de armaduras e de elementos metálicos. Chindaprasirt *et al.* (2008), afirmam que nas cidades costeiras a carbonatação e o ataque de cloretos são os dois fatores principais causadores de corrosão. O fenômeno acontece após o avanço dos íons agressivos, oriundos da atmosfera marinha, pela camada de cobrimento de concreto. Ao atingirem a armadura os íons podem causar a despassivação do aço, ou seja, a perda da película de proteção química da armadura. Cascudo (1997) salienta que o concreto deve apresentar estrutura compacta para retardar a frente de penetração de agentes deletérios. Dessa forma, é possível minimizar a incidência de corrosão nas edificações por meio do investimento na qualidade do concreto de cobrimento.

Várias pesquisas demonstraram as influências da incorporação de resíduos industriais na produção de concretos. Higashiyama *et al.* (2012) por exemplo, verificaram a influência da

utilização de resíduos de cerâmica em diferentes granulometrias como substituição total ou parcial do agregado miúdo em concretos. Foram ensaiados corpos de prova em sua resistência à penetração de cloretos pelo método colorimétrico de aspersão de nitrato de prata, ensaio de migração rápida de cloretos e resistência à compressão axial. As argamassas produzidas com resíduo mostraram maiores resistências à compressão, revelando melhor coesão entre o resíduo e a matriz cimentícia e a melhoria da sua estrutura de poros. As profundidades de penetração de íons cloreto foram significativamente menores quando comparadas às argamassas de agregado miúdo natural e o coeficiente de difusão efetivo foi diminuído em 63% nas argamassas com resíduo.

O vidro é um material reciclável aproveitado na própria indústria vidreira e também na produção de materiais para a construção civil. Loryuenyong *et al.* (2009) produziram blocos cerâmicos a partir de resíduos de vidro. Os resultados indicaram que na temperatura de queima adequada (1100 °C) a adição de 15 a 30% de resíduo de vidro em relação à massa de argila não causam efeitos prejudiciais às propriedades físicas e mecânicas dos blocos. Para o teor de 45% de resíduo, entretanto, características físicas de absorção de água e porosidade foram significativamente aumentados.

De acordo com Jani e Hogland (2014), o resíduo de vidro representa um problema ambiental urgente em todo o mundo, pois é não-biodegradável e a sua produção depende de grande consumo de recursos naturais, água e energia. Em função da sua composição química e atividade pozolânica, esse resíduo pode ser reciclado para utilização na produção de cimento em pequenas frações, ou como agregado para concretos. Entretanto, seu emprego deve ser criterioso em virtude do conteúdo de álcalis responsáveis pela reação destrutiva álcali-sílica em concretos. Mehta e Monteiro (2008) explicam que a Reação Álcali-Sílica (RAS) ocorre quando os álcalis e íons hidroxila presentes na matriz cimentícia reagem com a sílica do vidro formando um gel capaz de se expandir na presença de água. Essa modificação de volume provoca danos mecânicos como fissuras e o enfraquecimento de concretos e argamassas.

Como substituto do agregado miúdo em concretos o resíduo de vidro pode reduzir a fluidez e a massa específica da mistura, aumentando o teor de ar aprisionado. Constatou-se que as partículas de vidro comprometem as propriedades mecânicas do concreto em decorrência da frágil zona de transição formada entre o resíduo e a mistura. Apesar de alguns tipos de vidro serem potencialmente deletérios devido à reação álcali-sílica, notou-se melhora na resistência à penetração de íons cloreto (TAN; DU, 2013).

Matos, Souza-Coutinho (2012) também afirmam que o resíduo de vidro moído pode contribuir com a sustentabilidade na construção quando utilizado como substituto parcial do cimento. A investigação incluiu composição química do resíduo, atividade pozolânica, resistência à reação álcali-sílica, resistência à penetração de íons cloreto, absorção de água por capilaridade, resistência à sulfatos e à carbonatação. O resíduo de vidro utilizado foi considerado pozolânico, dessa forma, o conteúdo de álcalis pode ser consumido na produção do C-S-H, que ocorre antes da RAS, reduzindo o potencial de ocorrência desta. Foi possível concluir que o resíduo é benéfico às propriedades relacionadas com a durabilidade do concreto, apresentando resistência à penetração de agentes agressivos tais como cloretos, sulfatos e dióxido de carbono.

Outro resíduo utilizado para contribuir com as propriedades de durabilidade do concreto é a lama vermelha, proveniente do beneficiamento da bauxita, para fabricação da alumina e alumínio. A lama vermelha é considerada um resíduo perigoso devido à sua alta alcalinidade, essa característica somada aos aluminossilicatos que a compõem, pode facilitar a combinação dos íons cloreto em matrizes cimentícias. O pH alcalino do concreto produzido com este lama vermelha contribui com a preservação das armaduras em seu estado passivo. Os resultados apontam que a adição do resíduo traz benefícios, pois reduz os coeficientes de difusão dos cloretos, o potencial de corrosão das armaduras e a aumenta a resistividade elétrica do concreto (RIBEIRO; LABRINCHA; MORELLI, 2012).

Chindaprasirt *et al.* (2008), por sua vez, utilizaram cinzas do óleo de palma (POA, *palm oil ash*), cinzas de casca de arroz (RHA, *rice husk ash*) e cinzas volantes (FA, *fly ash*) como substituição parcial de cimento com a intenção de melhorar suas propriedades associadas à durabilidade. Os corpos de prova foram submetidos à exposição aos gases agressivos ricos em dióxido de carbono e cloretos. Constataram-se benefícios na resistência ao ingresso de cloretos nas argamassas contendo as adições para situações sem exposição ao dióxido de carbono. Todavia, se houver exposição ao CO<sub>2</sub> a resistência à penetração de cloretos é diminuída em concretos com essas pozolanas.

Também são produzidas cinzas nas usinas de açúcar e álcool, cinzas do bagaço de cana-de-açúcar, que são resíduos sólidos não biodegradáveis e podem ser aproveitadas na fabricação de tijolos e blocos cerâmicos como substituição da argila natural. Resultados mostram que o resíduo é composto principalmente por partículas cristalinas de sílica (SiO<sub>2</sub>), é inerte, se comporta como um *filler* e reduz a plasticidade das formulações argilosas. As limitações

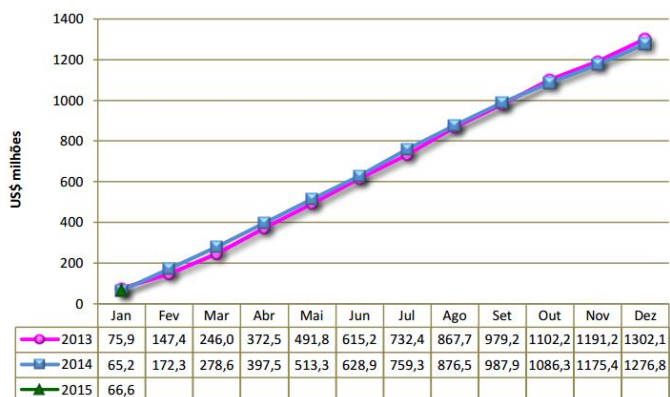
encontradas para sua utilização em tijolos e blocos cerâmicos foram o aumento da absorção de água e a diminuição da resistência mecânica dos blocos. O material se mostrou interessante do ponto de vista da reciclagem, mas deve ser utilizado em teores abaixo de 10% (FARIA; GURGEL; HOLANDA, 2012).

Cordeiro, Toledo Filho, Tavares e Fairbairn (2009), também investigaram a possibilidade de utilização das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar como pozolana ou como *filler* para a produção de argamassas de cimento Portland e de cal. Verificou-se que o material pode ser classificado como pozzolana, mas sua atividade depende intimamente da sua finura e do tamanho das suas partículas.

Outro resíduo gerado em larga escala no Brasil e no mundo é o resultante da exploração de rochas ornamentais para fabricação de revestimentos para pisos, fachadas, paredes internas, monumentos, paisagismo, e vários outros trabalhos especiais. A extração de rochas ornamentais e seu beneficiamento são atividades muito lucrativas, especialmente no estado do Espírito Santo. De acordo com Chiodi Filho (2013), no ano de 2012 foram exportadas mais de 2 milhões de toneladas de rochas brasileiras, o que movimentou a quantia de US\$ 1.060,42 milhões. A Região Sudeste contribuiu com mais de 60% dessa produção, destacando-se a produção capixaba e a mineira.

Chiodi Filho (2015) acredita que as exportações brasileiras no ano de 2015 se manterão no mesmo patamar dos anos 2014 e 2013, conforme Figura 3, devido ao quadro econômico aquecido nos Estados Unidos, um dos principais destinos das rochas brasileiras. O autor ainda afirma que as empresas brasileiras alcançaram capacidade quantitativa e qualitativa suficiente para provocar excesso de oferta na produção de blocos e chapas.

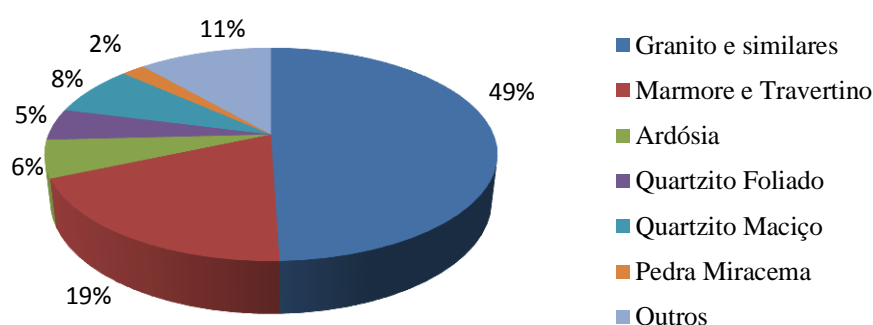
Figura 3 – Comparação entre as exportações acumuladas da indústria brasileira de rochas ornamentais nos anos de 2013 a janeiro de 2015.



Fonte: Chiodi Filho (2015).

Com relação ao resíduo gerado nas etapas de extração e beneficiamento das rochas, sabe-se que cerca de 50% do material extraído nas lavras é rejeitado e, do material que continua na linha de produção, cerca de 40% é perdido no processo de beneficiamento (CHIODI FILHO, 2012). Reis (2008) estimou a produção de 1,8 milhão de toneladas de RBRO no Brasil em 2007. No contexto local, Xavier, Saboya, Maia e Alexandre (2009) afirmam que no município de Cachoeiro de Itapemirim, ES, são produzidos mensalmente cerca de 150.000 toneladas do resíduo. A Figura 4 mostra os principais tipos de rochas produzidas no Brasil, dentre os quais se destacam granitos e mármore.

Figura 4 - Produção brasileira por tipo de rocha, 2013.



Fonte: Chiodi Filho (2014).

Para resolver o problema dos resíduos gerados pela indústria de rochas naturais diversas soluções técnicas já foram propostas para a incorporação do resíduo em outra atividade industrial. Akbulut e Güreç (2007), por exemplo, afirmam que o resíduo de mármore gerado nas pedreiras de extração pode ser utilizado como agregado alternativo para pavimentação de vias de tráfego leve a médio. Almeida *et al.* (2007), alegam que o resíduo de rochas pode ser absorvido em diversas atividades, na produção de cimentos, argamassas e concretos, pavimentação, materiais cerâmicos, correção de solo para agricultura e outras aplicações dependendo, principalmente, da sua composição mineralógica.



## 1.1 JUSTIFICATIVA

O Brasil possui extensa costa marítima, mais de 7.000 km de litoral, toda essa extensão apresenta tanto áreas de baixa densidade populacional quanto áreas densamente povoadas. No litoral existem ecossistemas de importância ambiental, áreas industrializadas e também locais de intensa exploração turística. Devido à extensão territorial brasileira, cerca de 25% da população reside na área costeira. Todavia, na Região Sudeste a população que se concentra no litoral é expressiva, em especial no trecho que se estende de Vitória- ES, até Santos- SP. Entre os capixabas, 68,4% reside na costa, esse percentual sobe para 82,7% entre os cariocas (IBGE, 2010).

Devido à alta densidade populacional são construídos na orla edifícios dos mais variados padrões, residenciais ou comerciais, térreos ou de múltiplos andares. Uliana *et al.* (2014), observaram as fachadas de 168 edifícios de alto valor comercial localizados na orla da cidade de Vila Velha, um dos municípios da Grande Vitória, ES. A Figura 5 enfatiza em vermelho as edificações estudadas, 35,1% delas apresentaram corrosão em elementos metálicos.

Figura 5 – Localização dos edifícios cujas fachadas foram analisadas em Vila Velha, ES.



Fonte: Uliana *et al.*, 2014.

O ambiente marinho é agressivo aos componentes metálicos das edificações tenham eles função estrutural ou não. De acordo com Ribeiro *et al.* (2014) a velocidade de corrosão em atmosfera marinha pode ser de 30 a 40 vezes maior do que em atmosfera rural. Esse fato se deve à presença de cloreto de sódio, cloreto de magnésio e outros íons trazidos pelo vento na forma de cristais ou gotículas de água salgada às estruturas próximas ao mar. Esses íons agressivos somados à alta umidade do ar (entre 65% e 85%, a 25°C) são fatores que aumentam a agressividade do meio. A umidade relativa do ar na Grande Vitória varia anualmente ente 60 e 90%, logo, pode ser considerada como região de forte agressividade

ambiental – Classe III de acordo com a classificação estabelecida na NBR 6118 (ABNT, 2014).

De acordo com Singh (2014) a corrosão pode causar danos estruturais graves e gerar custos da ordem de 3,5 a 4,0% do PIB de muitas nações desenvolvidas. A Tabela 2 aponta os gastos com manutenção de estruturas de concreto armado em países europeus no ano de 2004 (França, Alemanha e Reino Unido) e, na Itália, em 2002.

Tabela 2 - Gastos com manutenção e reparo de estruturas de concreto armado em países europeus no ano de 2004 e, em 2002, na Itália.

PAÍS / ANO	GASTOS COM NOVAS CONSTRUÇÕES (Bilhões de Euros)	GASTOS COM MANUTENÇÃO E REPARO (Bilhões de Euros)
França/2004	85,6	79,6
Alemanha/2004	99,7	99,0
Itália/2004	58,6	76,8
Reino Unido/2002	60,7	61,2

Fonte: Adaptado de Torres (2011).

Pesquisas mostram que subprodutos industriais e resíduos sólidos podem ser utilizados na fabricação de material cimentício e concreto, agregando sustentabilidade à indústria da construção. Entretanto, a escolha criteriosa dos materiais constituintes das matrizes cimentícias, visando o seu nível de exposição ambiental e condições de operação dos elementos estruturais, são indispensáveis para a durabilidade de estruturas de concreto armado. Dellinghausen *et al.* (2009) assegura que escória de alto-forno, por exemplo, quando utilizada na produção de cimentos como material cimentício suplementar traz benefícios para a durabilidade de concretos e argamassas expostos a ambientes marinhos. Além disso, reduz a necessidade dos recursos naturais (argila e calcário), e a emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera.

O resíduo sólido proveniente da extração e beneficiamento de rochas ornamentais é produzido em grande quantidade no Espírito Santo, estado que se destaca como um polo brasileiro de lavra. De acordo com a Tabela 3, a contribuição regional na produção bruta de rochas ornamentais da Região Sudeste representa mais da metade da produção nacional, o que traz grande responsabilidade de reciclagem dos resíduos gerados por essa indústria para esta região.

Tabela 3 – Distribuição regional da produção bruta de rochas ornamentais no Brasil em 2013.

REGIÃO	PRODUÇÃO (milhão t)	PARTICIPAÇÃO PERCENTUAL
Sudeste	6,8	64,5
Nordeste	2,7	24,7
Sul	0,4	4,3
Centro-Oeste	0,4	4,3
Norte	0,2	2,2
Total	10,5	100

Fonte: Adaptado de Chiodi Filho (2014).

Neste trabalho será avaliada a ação dos íons cloreto, um dos mecanismos preponderantes de deterioração relativos à corrosão de armaduras em ambientes marinhos, sobre concreto contendo adição de RBRO. Esta pesquisa teve origem num projeto integrado sobre as propriedades do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais – RBRO – em suas potencialidades para aplicação na indústria de concretos e argamassas desenvolvido pela Universidade Federal do Espírito Santo.

## 1.2 HIPÓTESE

A hipótese principal desta pesquisa é que a utilização de RBRO como adição mineral na fabricação de concretos para fins estruturais pode torná-los menos susceptíveis à frente de cloretos.

## 1.3 OBJETIVOS

Esta pesquisa tem o objetivo principal de avaliar a influência da adição de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) nas características de durabilidade de concretos com armaduras embutidas frente à ação de íons cloreto.

## 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a consistência dos concretos produzidos em função da relação água/cimento e dos percentuais de adição de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais;
- Analisar a massa específica dos concretos produzidos em função da relação água/cimento e dos percentuais de adição de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais;

- Analisar a propriedade de resistência à compressão axial dos concretos produzidos em função da relação água/cimento e dos percentuais de adição de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais;
- Analisar a propriedade de absorção de água por imersão e por capilaridade dos concretos produzidos em função da relação água/cimento e dos percentuais de adição de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais;
- Analisar o efeito dos diferentes percentuais de adição do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais sobre o potencial de corrosão das armaduras devido à ação dos íons cloreto;
- Analisar o efeito das diferentes relações água/cimento utilizadas nos concretos, sobre o potencial de corrosão das armaduras devido à ação dos íons cloreto;
- Analisar a influência dos percentuais de adição de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais em relação à penetração de íons cloreto nos concretos por meio do método colorimétrico com indicador químico nitrato de prata.
- Analisar a influência dos percentuais de adição de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais em relação à perda de massa sofrida pelas armaduras devido ao processo de corrosão.

## **1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

O conteúdo desta dissertação de mestrado está subdividido em seis capítulos, além das referências normativas, referências bibliográficas e os apêndices. Neste item cada capítulo é apresentado resumidamente.

O *Capítulo 1* aborda a responsabilidade da construção civil tanto na busca pela sustentabilidade em seu processo de produção quanto na durabilidade de estruturas. Esse capítulo também expõe a justificativa da pesquisa, sua hipótese, seus objetivos geral e específicos, os pesquisadores de referência que obtiveram bons resultados e prestígio na área e também as limitações do tema.

O *Capítulo 2* engloba a revisão bibliográfica que constitui o suporte técnico científico deste estudo. São apresentadas as adições minerais e sua influência na mistura de concreto no estado fresco, endurecido e nas características de durabilidade. É abordado o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais e estudos relacionados ao seu aproveitamento em

materiais de construção civil. Em seguida é introduzido o processo de corrosão de armaduras embutidas em concreto armado por contaminação de cloretos.

No *Capítulo 3* serão detalhados o programa experimental, os materiais empregados e os métodos para ensaios laboratoriais em concretos com ênfase nas técnicas de monitoramento do potencial de corrosão.

No *Capítulo 4* são discutidos e analisados os resultados encontrados pelo ponto de vista estatístico. Finalmente, o *Capítulo 5* é dedicado às conclusões a respeito dos resultados alcançados. O *Capítulo 6* é dotado das considerações finais e sugestões para trabalhos futuros a partir das lacunas encontradas nesta pesquisa. Após o capítulo 6 estão as referências normativas, referências bibliográficas e os apêndices para consulta do leitor.

## **1.6 PESQUISADORES DE REFERÊNCIA**

No Brasil um dos primeiros pesquisadores a estudar a corrosão eletroquímica de armaduras em estruturas de concreto armado foi o Prof. Dr. Paulo Helene, em 1981. Desde essa data o pesquisador publicou diversos trabalhos sobre o tema. O Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo – IPT- desenvolve muitas pesquisas na área de durabilidade no país. Outros pesquisadores brasileiros também têm destaque na área, são eles:

Prof. Dr. Oswaldo Cascudo – Universidade Federal de Goiás;

Prof. Dr. R. Molinari – Universidade de São Paulo;

Prof. Dr. Antonio Nepomuceno – Universidade de Brasília;

Prof. Dr. Luiz R. Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina;

Prof. Dr. Enio Figueiredo – Universidade Federal de Goiás;

Prof. Dra. Denise Dal Molin – Universidade Federal do Rio Grande do Sul;

Prof. Geraldo Isaia – Universidade Federal Santa Maria;

Prof. Dra. Zehbour Kajimoto – Instituto de Pesquisas Tecnológicas;

Prof. Dr. Antonio Carmona – Universidade Mackenzie, entre outros.

Segundo Ribeiro *et al.* (2014) os primeiros estudos nos Estados Unidos sobre corrosão de armaduras datam de 1961, por meio da “*Portland Cement Association – PCA*” e departamentos estaduais para levantamento de manifestações patológicas em tabuleiros de pontes em vários estados americanos. Desde então muitos pesquisadores dedicaram-se ao

estudo da corrosão, tais como Stratfull (1973); Babaei (1986). Após esses esforços a durabilidade em obras civis começou a ser estudada na década de 80 pelo “*Committee on Concrete Durability: Need and Opportunities*” uma vez que foi constatada a importância do tema em escala nacional.

Na Europa os estudos se iniciaram em 1961 por meio da “*The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures – RILEM*”. Destacam-se os pesquisadores Tuutti (1982), Bijen (1989), Sozen (1990), Andrade e González (1988) e GjØrv (1986). A Espanha também contribuiu muito com estudos na área desde 1969 no Instituto Eduardo Torroja, Madrid, sendo mundialmente conhecida a pesquisadora Carmem Andrade, membro deste instituto.

## 1.7 LIMITAÇÕES DO TEMA

Existem alguns fatores importantes que delimitam a pesquisa e seus resultados, de forma a tornar viável a execução da mesma dentro do prazo estabelecido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo (PPGEC- UFES). São eles:

- Concretos foram dosados com três níveis de relação água/cimento;
- A adição de RBRO aos concretos é feita com quatro níveis, 0, 5, 10 e 15 %;
- O RBRO utilizado teve origem de uma única empresa capixaba de beneficiamento de rochas ornamentais;
- O RBRO é resultado do desdobramento das rochas pelo tear de fios diamantados, não pelo tear de lâminas de aço, somado ao resíduo gerado na etapa de polimento, ou seja, o material não contempla todos os resíduos gerados nas diferentes etapas do beneficiamento das rochas naturais;
- As armaduras foram agredidas exclusivamente por íons cloreto, dessa forma não sofreram a influência causada por outros íons;
- A técnica do Potencial de Corrosão é qualitativa, indica a probabilidade de corrosão, ou seja, não fornece dados quantitativos do processo de corrosão.
- O método colorimétrico por aspensão de nitrato de prata também é uma técnica qualitativa, não fornecendo dados quantitativos sobre o processo de corrosão.

*Capítulo 2*  
**Revisão Bibliográfica**

---

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica a respeito dos principais conceitos dessa dissertação, adições minerais e sua influência nas propriedades do concreto fresco, do concreto endurecido e nas propriedades relacionadas com a durabilidade. Será apresentado o RBRO, seu processo de produção e sua utilização em materiais de construção civil. Também será abordado o fenômeno da corrosão em concreto armado ocasionado e fatores intervenientes no processo e mecanismos de transporte de íons.

### 2.1 ADIÇÕES MINERAIS

A utilização de subprodutos e resíduos na construção civil é um processo de reciclagem que deve considerar todas as características do resíduo e seu risco ambiental para o desenvolvimento de novos produtos. A NBR 10004 (ABNT, 2004) classifica os resíduos sólidos em função do processo que lhes deu origem e também por meio de comparação de seus constituintes com os constituintes de substâncias cujo dano à saúde e ao meio ambiente já é conhecido. Os resíduos podem ser classificados em:

- a. Resíduos Classe I – Perigosos;
- b. Resíduos Classe II – Não perigosos;
  - i. Resíduos Classe II A – Não inertes.
  - ii. Resíduos Classe II B - Inertes

De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004) os resíduos classe I – Perigosos apresentam risco à saúde pública. Os resíduos classe II A podem ter propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água e não se enquadram no resíduo classe I ou classe II B. Já os resíduos pertencentes à classe II B – Inertes – não devem ter seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água.

Muitos subprodutos industriais têm sido transformados em adições minerais para produção de concretos devido aos benefícios trazidos, tanto econômicos quanto ambientais. Usinas de energia elétrica que utilizam carvão como combustível, indústrias metalúrgicas, indústria de açúcar e álcool, indústria alimentícia, entre outras são fontes de subprodutos produzidos em larga escala, como as cinzas volantes, escória de alto-forno, cinzas de casca de arroz, cinzas de óleo de palma, entre outras.



Lançar esses materiais em aterros ou utiliza-los como agregados representa um desperdício das suas potencialidades. As adições minerais são silicosas e possuem granulometria fina a pulverulenta e podem trazer vantagens se utilizadas em produtos cimentícios. São responsáveis por conferir melhor resistência à fissuração térmica pelo controle do calor de hidratação, estão relacionadas ao aumento da resistência à compressão pelo refinamento dos poros da argamassa, também fortalecem a zona de transição entre argamassa e agregado graúdo, entre outras vantagens (MEHTA; MONTEIRO, 2008). A classificação desses materiais pode ser conferida no Quadro 1.

Quadro 1 – Classificação, composição e características das adições minerais.

EXEMPLO	EFEITO PREDOMINANTE	COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA
<b>CIMENTANTES E POZOLÂNICAS</b>		
Escória granulada de alto forno;	Efeito cimentante	Maior parte de silicato vítreo contendo cálcio, magnésio, alumínio e sílica.
Cinzas volantes com alto teor de cálcio	Efeito cimentante e Pozolânico	Na maior parte silicato vítreo contendo cálcio , magnésio alumínio e álcalis.
<b>POZOLANAS ALTAMENTE REATIVAS</b>		
Sílica ativa condensada, Cinza de casca de arroz	Efeito pozolânico potencializado	Essencialmente sílica pura na forma amorfa.
<b>POZOLANAS COMUNS</b>		
Cinza volante com baixo teor de cálcio;	Efeito pozolânico	Na maior parte silicato vítreo contendo alumínio, ferro e álcalis. A quantidade de matéria cristalina consiste em quartzo, mulita, silimanita, hematita e magnetita.
Pozolanas naturais	Efeito pozolânico	Vidro de aluminossilicato, quartzo, feldspato e mica.
<b>POZOLANAS POUCO REATIVAS</b>		
Escória de alto-forno resfriada lentamente	Efeito pozolânico	Essencialmente compostas de materiais de silicato cristalino contendo pequena quantidade de matéria não-cristalina.
<b>ADIÇÕES INERTES</b>		
Pó de pedra	Efeito fíler	Independente

Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2008).

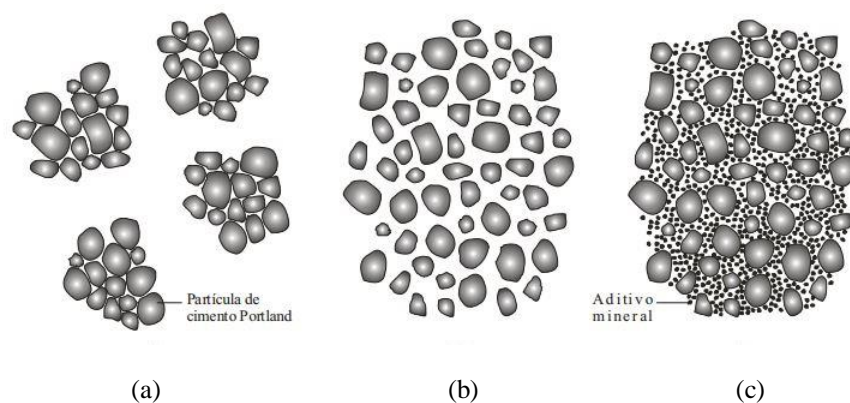
Cordeiro (2006) prefere se referir aos materiais utilizados conjuntamente ao cimento Portland como aditivos minerais uma vez que considera que o termo adição mineral diz respeito ao

material adicionado ao clínquer durante a produção de cimentos. Neste trabalho optou-se pela nomenclatura tradicional, adição mineral, para o material adicionado no momento do preparo do concreto, pois assim como Mehta e Monteiro (2008), considerou-se que o mesmo ocasionaria mudanças no comportamento reológico da mistura, mas os efeitos químicos poderiam levar muito tempo para se manifestarem.

A utilização de adições minerais inertes pode ocasionar três efeitos físicos principais à pasta de cimento que podem ocorrer simultaneamente: a diluição do cimento Portland, a modificação na distribuição das partículas (efeito filer) e nucleação. A diluição é um efeito equivalente ao aumento da quantidade de água, ou relação água/cimento, ocasionado pela substituição de parte do cimento pela adição mineral. A menor parcela de cimento utilizada significa menos produtos de hidratação formados e conseqüentemente menor calor de hidratação. O efeito filer, empacotamento granulométrico, faz com que a mistura de concreto apresente maior compactidade em consequência da presença de finos, ou seja, é modificada a porosidade inicial da mistura (LAWRENCE *et al.*, 2003; CORDEIRO, 2006).

A Figura 6 ilustra a organização das partículas de misturas contendo (a) somente água e cimento, (b) água, cimento e aditivo superplastificante e, (c) água, cimento, adição mineral e aditivo superplastificante.

Figura 6 – Partículas de cimento Portland em pasta (a) sem aditivo, (b) com aditivo superplastificante e (c) com superplastificante e adição mineral de elevada finura.



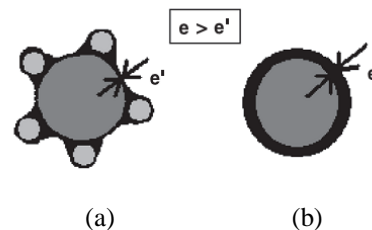
Fonte: Cordeiro (2006, p. 26).

A nucleação, por sua vez, é um efeito físico que estimula as reações de hidratação do cimento. Não depende da reatividade da adição mineral, ocorre em função das reações de superfície das partículas, sendo necessárias partículas bem finas. Uma vez que o material fino se aloja nos poros dos cristais de clínquer a superfície de contato deste com o meio aquoso aumenta, o que acelera as reações de hidratação. A probabilidade de ocorrer a nucleação também depende da

quantidade do material utilizado, quanto mais partículas de adição mineral existirem na mistura maior será a chance destas ficarem próximas das partículas de cimento. Outro fator importante é a natureza do mineral e sua afinidade com os hidratos de cimento (LAWRENCE *et al.*, 2003).

A Figura 7 mostra que a espessura de água –  $e'$  – ao redor da partícula de cimento envolta por partículas de adição mineral (a) é mais fina que a espessura de água –  $e$  – que circunda a partícula de cimento cuja mistura não contém adição (b). Trata-se de uma hipótese para explicar o maior grau de hidratação do cimento em argamassas contendo adições minerais inertes. Lawrence *et al.* (2003) asseguram que a nucleação favorece as reações que acontecem diretamente na superfície dos compostos do cimento anidro.

Figura 7 – Representação esquemática que explica a melhora no grau de hidratação do cimento nas primeiras idades em virtude da utilização de adições minerais nas misturas de argamassas.



Fonte: Lawrence; Cyr; Ringot (2003).

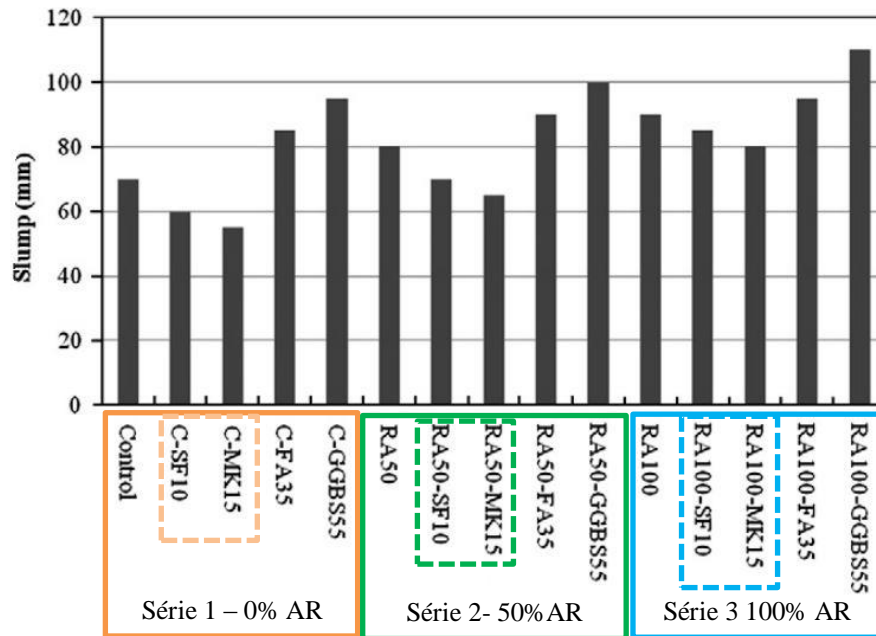
### 2.1.1 Influência das adições minerais no concreto fresco

Chi-cong Kou *et al.* (2011) compararam concretos produzidos com agregados reciclados (AR) e diferentes adições minerais como substituição parcial do cimento. Três séries foram produzidas em relação ao teor de substituição de agregado natural pelo reciclado (0%, 50% e 100% AR). Dentro de cada série variou-se o tipo de adição mineral: sílica ativa (*silica fume* – SF) no teor de 10%, metacaolim (MK) no teor de 15%, cinza volante (*fly ash* – FA) no teor de 35% e escória granulada (*goung granulated blast slag* – GGBS) no teor de 55%. As adições e seus respectivos teores de substituição não variaram entre as séries, a relação água/cimento (0,50) também foi mantida constante.

Os resultados do ensaio de abatimento de tronco de cone dos concretos, conforme Figura 8, mostraram que o abatimento aumentou com os maiores conteúdos de agregado reciclado (séries 2 e 3) pela maior quantidade de água adicionada durante a mistura para compensar a alta absorção desses agregados. Entretanto, o abatimento registrado para as adições de sílica ativa (SF10) e metacaolim (MK15) diminuíram em todas as séries, o que pode ser explicado

pela elevada área superficial da sílica ativa ( $18,650 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) e metacolin ( $12,68 \text{ cm}^2/\text{g}$ ). Já os abatimentos das misturas contendo cinzas volantes a 35% e escória granulada a 55% foram maiores do que o abatimento de controle (CHI-CONG KOU *et al.*, 2011).

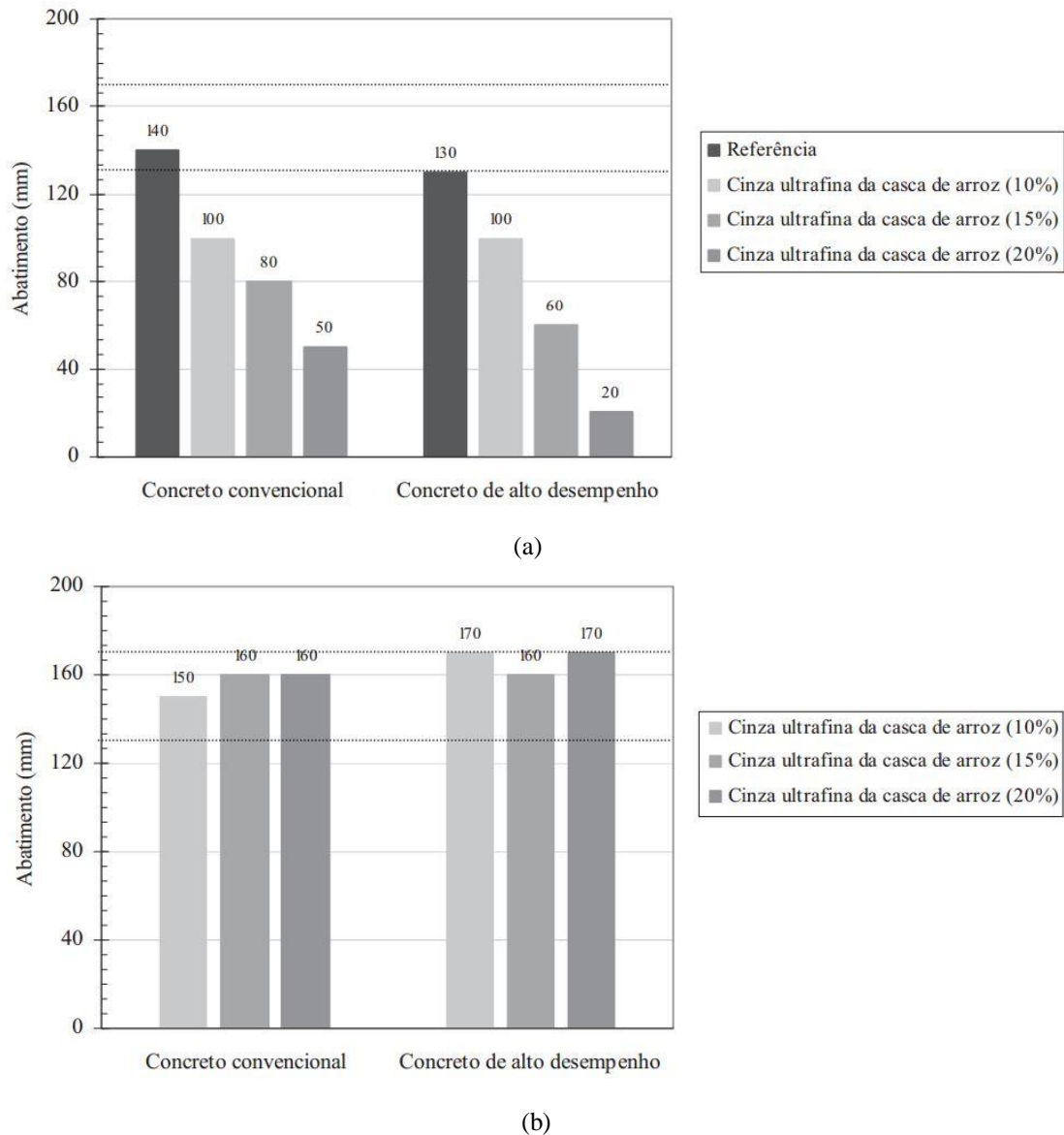
Figura 8 – Ensaio de abatimento de tronco de cone em concretos contendo adições e agregados reciclados.



Fonte: Adaptado de Chi-cong Kou, Poon e Agrela (2011).

Em seu trabalho, Cordeiro (2006) constatou diminuição no abatimento dos concretos com aumento de substituição de cimento por cinzas de casca de arroz para os concretos convencionais e para os concretos de alto desempenho, antes da administração de aditivo superplastificante na mistura, conforme Figura 9 (a). O abatimento após a correção da consistência, por meio da administração de aditivo plastificante, foi mantido na faixa estabelecida de  $150 \pm 20 \text{ mm}$ , como mostra a Figura 9 (b). Concluiu-se que a substituição de cimento Portland por cinza ultrafina de casca de arroz implica a redução da consistência do concreto.

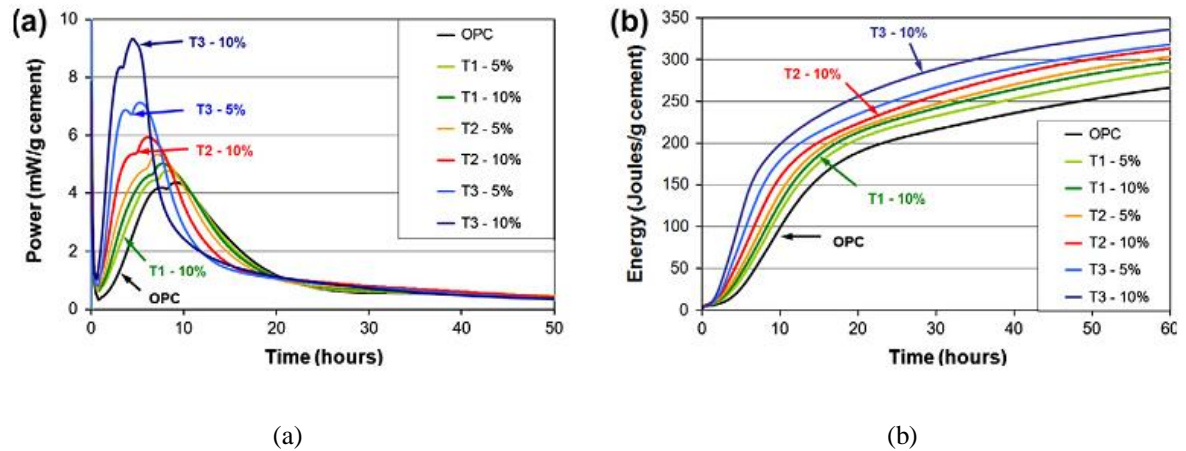
Figura 9 – Abatimento dos concretos convencional e de alto desempenho com cinza ultrafina de casca de arroz nos teores de 10,15 e 20% como substituição do cimento (a) sem aditivo e (b) com aditivo superplastificante.



Fonte: Cordeiro (2006).

Jayapalan *et al.* (2013) produziram pastas cimentícias com adição inerte de micro e nanopartículas de  $TiO_2$  e calcário nos níveis 0, 5, 10 e 15 %. O tamanho das partículas variou em três níveis para cada adição, entre as partículas de dióxido de titânio,  $T1 > T2 > T3$ ; entre as partículas de calcário (*limestone*),  $L1 > L2 > L3$ . Foi concluído, por meio da calorimetria isotérmica normalizada pela ASTM C 1679 (ASTM, 2008), que as nanopartículas de dióxido de titânio aceleraram o processo de hidratação do cimento reduzindo o período de dormência e aumentando a quantidade de calor liberado no processo, conforme Figura 10 (a) e (b). Os autores concluíram que foi dominante o efeito de nucleação em virtude do aumento da taxa de hidratação.

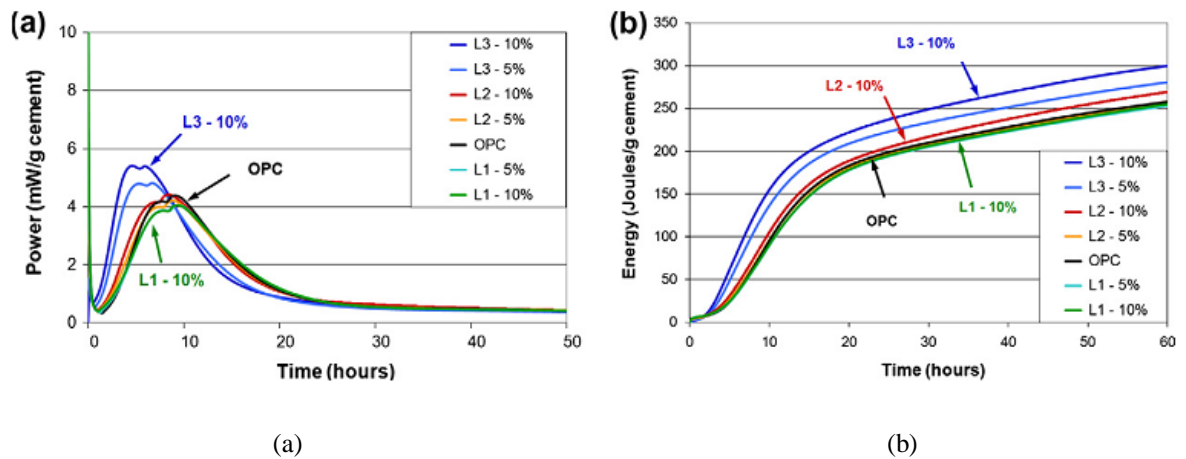
Figura 10 – (a) Taxa de liberação de calor na hidratação do cimento em pastas com adição de 0, 5, 10 e 15% de adição de TiO<sub>2</sub> (T1,T2,T3) e (b) total de calor liberado pelas misturas.



Fonte: JAYAPALAN *et al.*(2013, p.19).

A Figura 11(a) e (b) mostra os resultados das análises com a adição de calcário. O tipo L3, de maior área específica do que L1 e L2, acelerou o processo de hidratação e, portanto, provocou também o efeito de nucleação na pasta cimentícia. O efeito de diluição, contudo, foi dominante para as pastas com adição de calcário do tipo L1 e L2, de dimensões maiores que 3 $\mu$ m, pois o processo de hidratação se manteve ou sofreu pequena desaceleração.

Figura 11 - (a) Taxa de liberação de calor na hidratação do cimento em pastas com adição de 0, 5, 10 e 15% de adição de calcário (L1,L2,L3) e (b) total de calor liberado pelas misturas



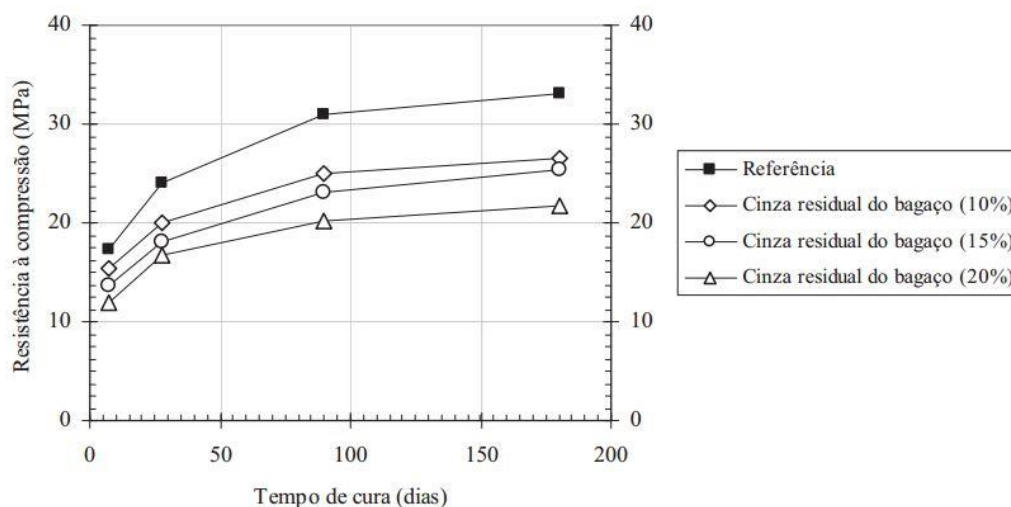
Fonte: JAYAPALAN *et al.*(2013, p. 19).

### 2.1.2 Influência das adições minerais no concreto endurecido.

A utilização de adições minerais em argamassas e concretos podem influenciar no aumento da resistência dessas misturas. De acordo com Dal Molin (1995) as adições influenciam na movimentação das partículas de água no concreto fresco, reduzindo ou eliminando a água livre que tende a ficar retida sob o agregado. Os finos contribuem com o aumento da resistência mecânica, pois preenchem os vazios deixados pelo cimento próximos à superfície dos agregados interferindo no crescimento e na orientação dos cristais de hidróxido de cálcio na zona de transição, fortalecendo essa região.

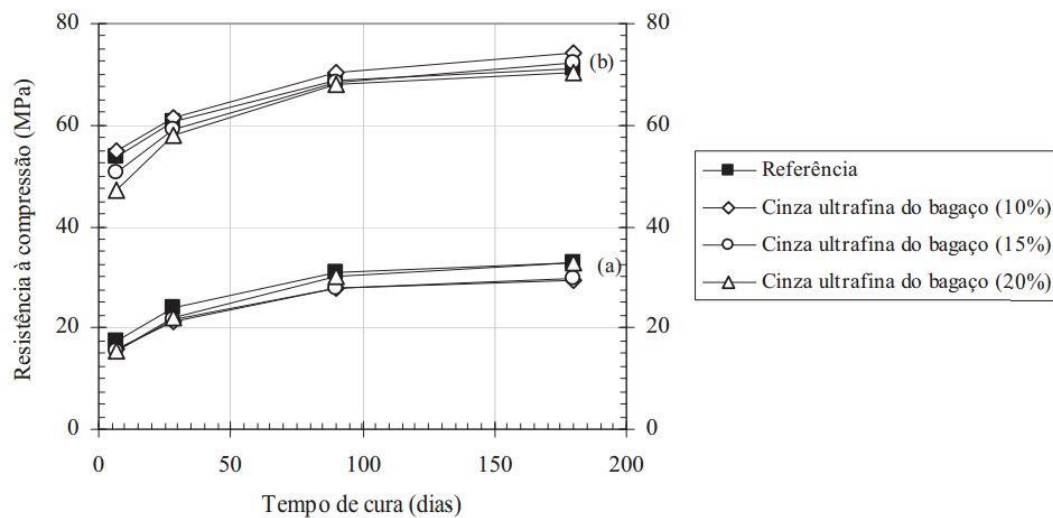
Cordeiro (2006) avaliou entre outros produtos pozzolânicos, a influência das cinzas ultrafinas e residuais do bagaço de cana-de-açúcar em concretos como substituição do cimento nos teores de 0, 10, 15 e 20 %. A cinza residual do bagaço não se mostrou atrativa, pois comprometeu a resistência mecânica interferindo negativamente no módulo de elasticidade, na resistência à compressão e na resistência à tração por compressão diametral. Esse comportamento é explicado devido ao tamanho dos grãos da adição, que são maiores, e à baixa atividade pozzolânica, conforme Figura 12. Já a cinza ultrafina do bagaço possibilitou manutenção da resistência mecânica dos concretos com menos consumo de cimento e a diminuição do calor de hidratação, resultados que podem ser atribuídos ao comportamento pozzolânico e ao refinamento de poros do concreto, como mostra a Figura 13.

Figura 12 – Valores médios de resistência à compressão dos concretos com cinza residual do bagaço de cana-de-açúcar.



Fonte: Cordeiro (2006).

Figura 13 – Valores médios de resistência à compressão dos concretos com cinzas ultrafinas de bagaço de cana-de-açúcar.



Fonte: Cordeiro (2006).

### 2.1.3 Influência das adições minerais nas características de durabilidade dos concretos

De acordo com Ribeiro *et al.* (2014) a durabilidade dos concretos é altamente dependente da estrutura e da distribuição de poros formados durante a hidratação do cimento. Os vazios ou poros formam caminhos internos que podem ser contínuos, descontínuos ou isolantes. Esses caminhos são oriundos da quantidade de água utilizada na formulação do traço, superior à quantidade necessária para a hidratação do cimento, e da incorporação indesejada de ar em função do processo de mistura do concreto. O excesso de água evapora e os vazios deixados comunicam o interior do concreto ao exterior, o que é relevante no processo de transporte de gases, água e íons para o seu interior.

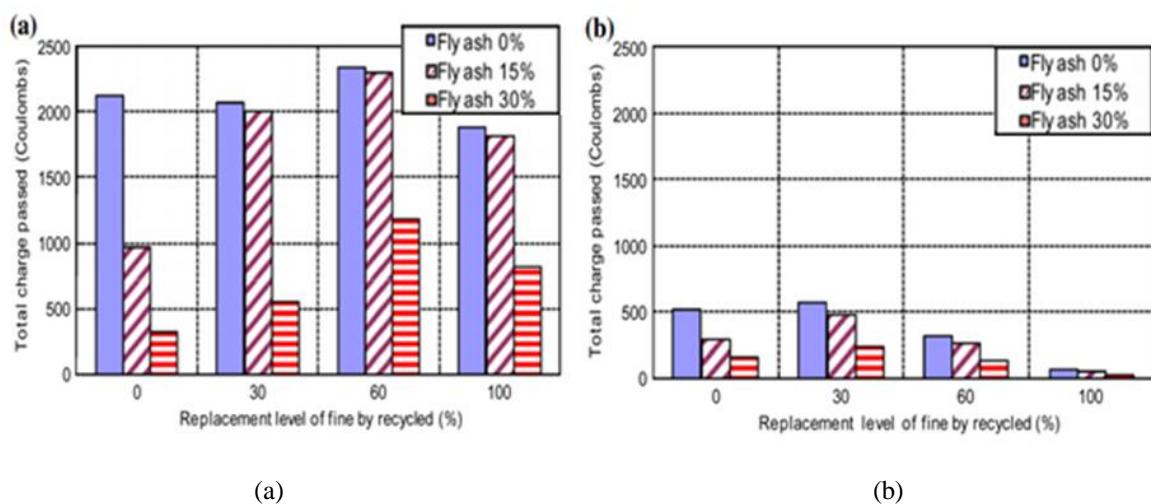
Alguns autores abordam a penetração de agentes agressivos em matrizes cimentícias visando aumentar sua durabilidade. Sim e Park (2011), por exemplo, utilizaram cinzas volantes como substituição do cimento em concretos com 100% de agregados graúdos reciclados e vários teores de substituição (0, 30, 50, 60, 70 e 100%) de agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado (AMR). A resistência à compressão aos 28 dias dos concretos diminuiu com o aumento do conteúdo de AMR embora tenha alcançado a resistência de projeto para os teores até 60%. Foi avaliada a susceptibilidade do concreto ao ensaio de carbonatação acelerada e à penetração de cloretos pela técnica regulada pela ASTM C-1202 (ASTM, 2012). Os concretos com agregados reciclados mostraram bom desempenho frente à penetração de



íons cloreto, tendo sua classificação considerada de baixa ou muito baixa penetrabilidade aos íons cloreto, de acordo com a norma americana.

A penetrabilidade aos íons agressivos foi significativamente diminuída pelo aumento do teor de cinzas volantes nos concretos sem AMR, conforme Figura 14 (a). O percentual de AMR não interfere diretamente na penetrabilidade dos íons sem a adição da cinza volante. Os resultados indicam que a carga passante foi reduzida em 50% para os concretos com 30% de cinzas volantes. De modo que, pode-se concluir que a penetração de cloretos está mais intimamente relacionada com o conteúdo de cinzas volantes do que com o conteúdo de AMR e a substituição do cimento deve ser próxima de 30% para controlar a penetração desses íons. O tempo de cura também diminui a penetração pela constituição da microestrutura tornar-se mais densa, Figura 14 (b). Por sua vez, a carbonatação medida não indicou uma relação clara em virtude da substituição de AMR, mas também demonstrou resistência adequada. A carbonatação é influenciada pela relação água/cimento e pela quantidade de material pozzolânico, quanto maior a concentração de pozolana mais profunda será a carbonatação. Entretanto, as profundidades medidas ocorreram abaixo de 10 mm apresentando resistência satisfatória à carbonatação (SIM; PARK , 2011)

Figura 14 – Penetração de íons cloreto descrita em carga passante medida em tempos de cura de (a) 21 dias e (b) 56 dias para os concretos com adição de cinzas volantes (0, 15, 30%) e vários teores de substituição de agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado.



Fonte: Sim e Park (2011, p.2358).

Jayapalan *et al.* (2013), por meio da adição de nanopartículas e micropartículas de calcário e dióxido de titânio em pastas cimentícias, afirma que o tamanho da partícula pode ser selecionado para evitar a retração e a possível fissuração do concreto durante as reações de hidratação. A retração química aumenta nas pastas cimentícias na mesma proporção em que

são adicionadas as nanopartículas, enquanto a adição de partículas maiores de 20µm diminui a retração. Logo, é possível utilizar tamanho e quantidade ótimos de nanopartículas e micropartículas para balancear o efeito positivo da aceleração da hidratação do cimento e o efeito negativo que resulta na diminuição do volume da pasta de cimento, retração, impactando na durabilidade do material.

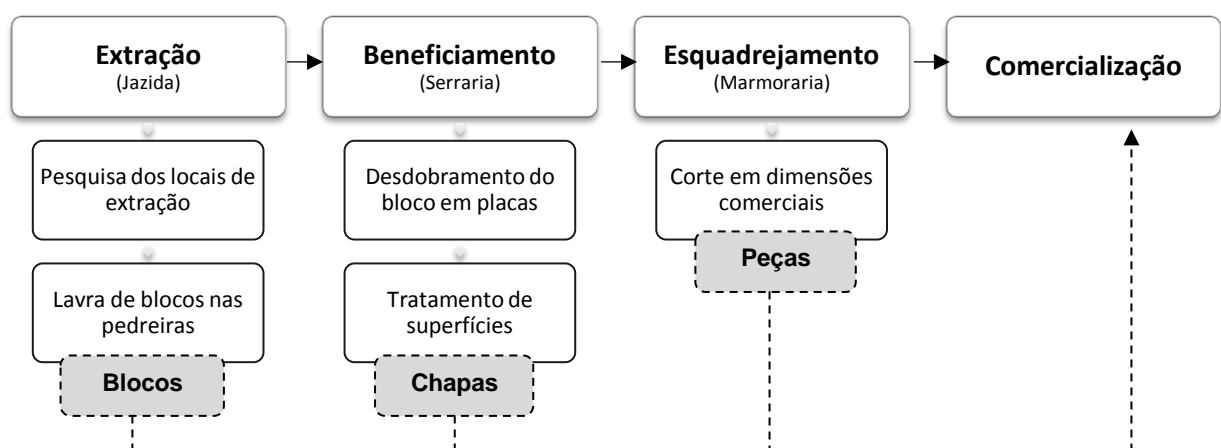
Dellinghausen *et al.* (2009) utilizou a escória de alto-forno em substituição parcial de cimento Portland branco e CPV ARI com diferentes concentrações de relação a/c para avaliar a influência do período de cura (3 e 7 dias) na retração total, na resistência à compressão axial e na penetração de cloretos por imersão. Foi utilizado o ativador químico de sulfato de sódio (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) para acelerar as reações de hidratação. Os ensaios de retração foram conduzidos segundo às recomendações da ASTM C-157 (ASTM, 2006) e ASTM C-490 (ASTM, 2004). Os resultados indicaram que os maiores valores de retração total ocorreram nos concretos produzidos com cimento Portland branco e nas misturas com substituição de cimento por escória, quando comparados às outras misturas de igual tempo de cura e mesma relação a/c. Não foram constatadas diferenças expressivas na retração em função do prazo de cura. Este parâmetro influenciou a penetração de cloretos, quanto maior o tempo de cura mais dificultada torna-se a penetração dos íons. Também foi notado que o acréscimo do teor de escória favoreceu a resistência à penetração de cloretos.

## 2.2 RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

As rochas ornamentais são produtos de grande apreciação no mercado nacional e internacional, também conhecidas como rochas dimensionais, pedras naturais, materiais de cantaria e rochas lapídeas. São utilizadas como revestimento de superfícies diversas por sua beleza estética e também como bancadas, mesas, etc. As pedras mais conhecidas no mercado são os mármore e os granitos. O termo granito representa uma ampla quantidade de rochas magmáticas tais como sienitos, dioritos, diabásios e os próprios granitos, entre outras rochas de composição silicática. Essas rochas estão contidas pelos minerais quartzo, feldspato, micas, anfibólios, piroxênios e olivina em associações variáveis. Os mármore são rochas metamórficas correspondentes das sedimentares calcários e dolomitos. Os mármore têm composição carbonática constituídos principalmente de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) ou dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) (MARÇAL, 2011).

De acordo com o Boletim Técnico 33 da Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral – SGM (2009) as rochas ornamentais são produtos com características de manufatura cujo preço não é fixado, variando em função de atributos estéticos ou vantagens funcionais. O boletim ressalta que o setor é formado por micro e pequenas empresas e tem um nível de informalidade considerado alto. Essa condição das empresas de beneficiamento pode estar relacionada com a grande quantidade de material descartado no processo de produção desta indústria em todas as suas etapas, como pode ser visto na Figura 15.

Figura 15 – Etapas do processo de produção das rochas ornamentais.



Fonte: Adaptado de Gonçalves (2000).

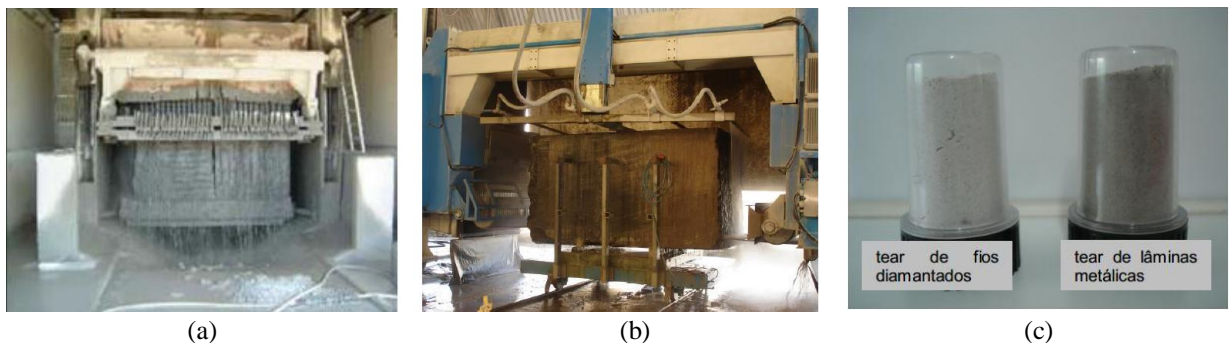
O processo de extração de rochas ornamentais varia em função das características do maciço rochoso, topografia local, fraturas, afloramento, entre outras características da jazida. O

material rochoso é retirado de maciços ou matacões em formato de blocos retangulares de dimensões diversas.

De acordo com Reis (2008) o desdobramento dos blocos é a primeira fase de beneficiamento e ocorre por meio de equipamentos chamados teares, estes podem ser de fios diamantados ou lâminas metálicas. As lâminas ou fios imprimem um movimento alternado que, em conjunto com uma lama abrasiva, serra os blocos transformando-os em chapas brutas. O tear de lâminas de aço funciona em conjunto com uma lama ou polpa abrasiva constituída de granalha de aço, água, cal e pó de rocha. À medida que esta lama participa do processo do corte dos blocos, a mesma se torna mais viscosa pelo seu conteúdo de finos, quando o material atinge uma viscosidade prejudicial ao procedimento de serragem ele é retirado e dá origem à lama do beneficiamento de rochas ornamentais.

Chiodi Filho e Chiodi (2009) esclarecem que a diferença entre um tear de fios diamantados e o tear de lâminas de aço é que o primeiro opera apenas com lâminas ou fios diamantados, dispensando o uso de cal e granalha de aço, Figura 16 (a) e (b). Dessa forma, os autores consideram aquele preferível sobre este em virtude da produção de um resíduo isento de partículas de ferro, mais do que pela produtividade ou qualidade das chapas serradas, já que permite maior facilidade do aproveitamento dos rejeitos gerados, conforme Figura 16 (c).

Figura 16 – (a) Tear de lâminas de aço, (b) tear de fios diamantados e (c) resíduos provenientes do corte em teares distintos



Fonte: Barros *et al.* (2006).

Depois do desdobramento as rochas estão no formato de chapas brutas e passam pela segunda fase de beneficiamento que consiste no acabamento de superfícies por meio de levigamento, polimento e lustro. Esse procedimento que também gera uma lama cujos componentes são água, pó de rocha, resinas e materiais de desgastes dos dispositivos de polimento. Esses resíduos também são destinados aos tanques de sedimentação para reaproveitamento da água decantada e o direcionamento do resíduo sólido a aterros sanitários (SOARES, 2014),

conforme Figura 17. Porém, nem sempre o material recebe destinação adequada podendo ser lançado em lagoas de sedimentação como mostra a Figura 18 (a) e (b) (REIS, 2008). O resíduo de rochas ornamentais foi classificado como Resíduo Classe II A – Não Inerte por autores tais como Uliana *et al.* (2013), Santos *et al.* (2010), Manhães *et al.* (2008) e Gonçalves (2000).

Figura 17 – Tanques de sedimentação em empresa capixaba beneficiadora de rochas ornamentais.



Fonte: Soares (2014).

Figura 18 – Lagoas de sedimentação da lama de beneficiamento de rochas lançada diretamente no solo.



(a)

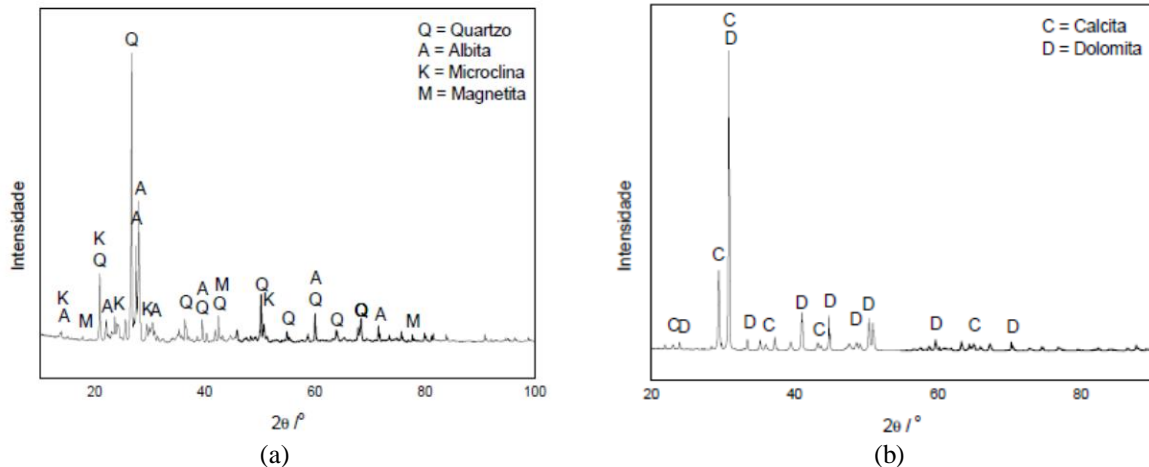
(b)

Fonte: Reis (2008).

### 2.2.1 Caracterização

Márçal (2011) utilizou os resíduos de granito e de mármore para fabricação de vidros. Para a caracterização dos resíduos foram utilizadas as técnicas de difração de raios X e fluorescência de raios X para identificar a composição química do resíduo de granito e de mármore e suas fases cristalinas. No resíduo de granito observou-se a presença da fase cristalina quartzo, fase estável da sílica à temperatura e pressão ambientes. Também foram identificados picos de silicatos de cálcio, potássio, alumínio. Sódio e traços de magnetita, conforme Figura 19 (a). No resíduo de mármore observou-se picos de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e dolomita ( $\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$ ) e ausência de picos de quartzo, Figura 19 (b).

Figura 19 – Difratoograma de raios X dos resíduos de (a) granito e (b) mármore.



Fonte: Marçal (2011, p. 64).

A Tabela 4 mostra a composição química em peso dos materiais utilizados.

Tabela 4 - Composição química dos resíduos de granito e mármore (% em peso).

COMPONENTES	GRANITO	MÁRMORE	AREIA
SiO <sub>2</sub>	64,409	7,658	95,762
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,070	0,671	3,004
Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,869	0,444	0,336
CAO	4,754	63,441	0,152
MGO	0,059	27,075	-
K <sub>2</sub> O	5,404	0,046	0,283
FE <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,435	0,664	0,462

Fonte: Adaptado de Marçal (2011).

Os resíduos de granito mostram a predominância de sílica (SiO<sub>2</sub>), alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxido de cálcio (CaO) e óxido de sódio (Na<sub>2</sub>O). A ocorrência de hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) está associada ao beneficiamento das rochas pela utilização de granalha de aço na etapa de corte das rochas.

Uliana (2013) também investigou o potencial vítreo do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais provenientes dos dois tipos de teares (de lâminas de aço e de fios diamantados). Utilizou o resíduo como substituição de cimento nos teares de 0, 5, 10, 15 e 20% para analisar a sua pozolanicidade após tratamento térmico e moagem. A Tabela 5 mostra os resultados da caracterização física, química e quanto à atividade pozolânica dos resíduos secos e destorroados.

Tabela 5 – Caracterização das lamas de beneficiamento de rochas ornamentais proveniente de teares de lâminas de aço (LBRO G) e de teares de fios diamantados (LBRO D).

PROPRIEDADES		LBRO G	LBRO D	LIMITES
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		2,4804	2,5253	N.E.
Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )		814,850	766,284	N.E.
Umidade para utilização na pesquisa – TT0 (%)		0,04	0,04	≤ 3,0
Finura	Área específica - Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	7277,8	6179,3	N.E.
	Material retido na peneira 200 (%)	8,56	3,08	N.E.
	Material retido na peneira 325 (%)	18,10	7,00	≤ 34
Índice de atividade pozolânica	Com a cal (MPa)	0,84	3,17	≥ 6,0
	Com o cimento (%)	52,5	63,9	≥ 75
	Água requerida em IAP-cim (%)	100,0	103,3	≤ 110
Composição Química	Perda ao fogo - PF (%)	0,69	3,50	≤ 6,0
	SiO <sub>2</sub> (%)	63,75	66,80	N.E.
	CaO (%)	3,72	3,44	N.E.
	MgO (%)	0,31	0,93	N.E.
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	14,55	13,50	N.E.
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	7,57	3,79	N.E.
	K <sub>2</sub> O (%)	5,01	3,83	N.E.
	Na <sub>2</sub> O (%)	3,58	3,50	N.E.
	C (%)	0,39	1,11	N.E.
	TiO <sub>2</sub> (%)	0,22	0,16	N.E.
	SO <sub>3</sub> (%)	0,06	0,06	≤ 5,0
	SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	85,87	85,08	≥ 50,0

**Obs.:** Limites estabelecidos com base nos dados da Classe E de pozolanas descritos NBR 12653: Materiais pozolânicos – Requisitos (ABNT, 2012)<sup>1</sup>.

Fonte: Uliana (2013, p. 96).

Os grãos de LBRO G são menores do que os grãos do RBRO D, provavelmente porque a presença da granalha de ferro naquele faz com que a lama fosse reutilizada mais vezes no processo de desdobramento dos blocos de rochas. Entretanto, ambos os resíduos são pulverulentos, de maior finura que o cimento, ricos em quartzo sílica (SiO<sub>2</sub>) e feldspato alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Portanto, são resíduos sílico-aluminosos. No resíduo LBRO G podem ser identificados maiores teores de hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e óxido de cálcio (CaO) pela utilização da granalha e da cal no processo de serragem. O óxido de Magnésio, em maior teor no LBRO D

<sup>1</sup> A norma em questão foi atualizada em 2014 e corrigida em 2015, entretanto, o trabalho de Uliana data de 2013.

pode ser oriundo do desgaste das sapatas de polimento. Os resultados indicaram que os resíduos de lama do beneficiamento de rochas ornamentais, G ou D, atendem às especificações da norma NBR 12653 (ABNT, 2012) para materiais pozolânicos nos requisitos de composição química e com relação à finura. Contudo, ambos não se enquadraram nos requisitos de pozolanicidade, com cal ou com cimento. Dessa forma, podem ser utilizados como adição inerte para efeito físico de preenchimento de vazios em argamassa e concretos (ULIANA, 2013).

### **2.2.2 Estudos em Materiais de Construção Civil**

Com a intenção de empregar o RBRO em materiais de construção civil Almeida *et al.* (2007) apresentaram várias soluções para incorporação do resíduo como subproduto em materiais de construção como cimento, tijolos, telhas, materiais à base de resina, pavimentação, aterros e obras rodoviárias, indústria de celulose e outros.

Vieira *et al.* (2004) e também Moreira *et al.* (2008) utilizaram resíduo como substituto parcial de argila para a produção cerâmica vermelha. As cerâmicas produzidas exibiram bom desempenho tecnológico e o processo de fabricação não precisou ser alterado em função do aproveitamento do resíduo. Existem limitações quanto ao uso do resíduo devido ao aumento da absorção de água e da retração linear e à redução da resistência mecânica.

Souza *et al.* (2010), analisaram a utilização de RBRO na elaboração de ladrilhos vitrificados para pisos como substituição do feldspato nos teores de 0, 10, 20, 30, 40 e 47,5 % e atestam que podem ser incorporados até 47,5% do resíduo na formulação do produto. Foram analisadas a retração linear, a absorção de água a densidade aparente e a resistência à flexão. Os resultados indicaram que a utilização do resíduo é uma possibilidade de reciclagem uma vez que houve melhoria no desempenho quanto à resistência à flexão, aumento da densidade aparente e decréscimo da absorção de água com o aumento dos teores de resíduo. A retração linear, entretanto, foi maior para as amostras contendo maior teor de resíduo.

Já Lee *et al.*(2008) produziram placas de rocha artificial a partir de resíduos de rocha e de vidro, cuja reciclagem envolveu esmagamento, moagem e secagem dos grãos. O processo de produção das placas foi por meio de compactação vibratória à vácuo, como aglutinante foram usadas resinas poliméricas. As placas de rocha artificial foram produzidas sob pressão de compactação de 14,7 MPa, a frequência de vibração de 33,3 Hz e condição de vácuo a 50

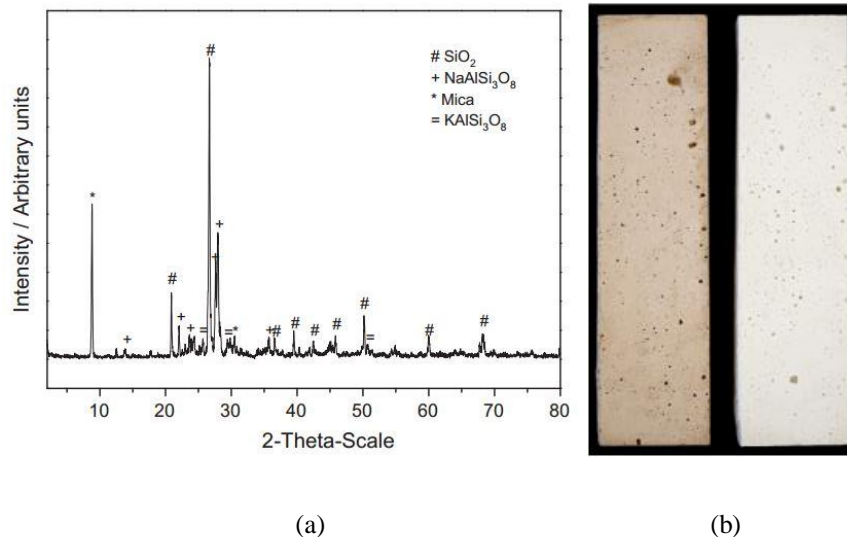


mmHg. As placas exibiram alta resistência à compressão, de 148,8MPa, baixa absorção de água (0,02%), resistência à flexão de 51,1MPa após 2 minutos de compactação

### 2.2.2.1 Estudos em Argamassas

Mármol *et al.* (2010), caracterizaram a lama residual de granito pelas técnicas de espectrometria por fluorescência de raios X, difração de raios X, conforme Figura 20 (a), difração a laser e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Afirmam que as lamas residuais de granito podem ser usadas na indústria de materiais de base cimentícia pela sua composição rica em  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{AlO}_3$ ,  $\text{CaO}$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , e sua distribuição granulométrica de elevada finura. O resíduo pode ser usado como substituição de 10% de cimento sem prejuízo da resistência à compressão na idade de 28 dias por se tratar de um filer eficiente ou material com atividade pozolânica. Além disso, o resíduo pode ser transformado em pigmentos avermelhados por meio de calcinação a 700-900 °C em curto período de tempo para a fabricação de argamassas coloridas, como pode ser visto na Figura 20 (b). A cor amarelo-alaranjada é produto da cristalização do  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  que acontece após o tratamento de calcinação.

Figura 20 – (a) difração de raios X da amostra de resíduo de granito e (b) resíduo utilizado como pigmento amarelo-alaranjado para argamassas.



Fonte: Mármol *et al.* (2010).

O resíduo de rocha também pode ser aplicado em matrizes cimentícias não convencionais como a de cimento sorel ou Cimento de Magnesita e Magnésio óxido-clorídrico (MOC). De acordo com Yadav *et al.* (2013), o cimento sorel é um aglomerante aéreo interessante do ponto de vista da economia de energia, pois necessita de menor temperatura de calcinação do que a atingida na fabricação do Cimento Portland; é muito utilizado em pisos industriais e em

elementos de proteção contra incêndios devido às suas propriedades de engenharia como resistência à abrasão e resistência ao fogo. Li *et al.* (2013) utilizaram os resíduos de granito, cinzas volantes em diferentes teores para avaliação a resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias de concretos produzidos com cimento sorel. Os produtos de hidratação foram analisados por difração de raios X (DRX), espectrometria por fluorescência de raios X (FRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados indicam que as partículas finas do resíduo de granito preenchem os poros maiores da pasta formando assim uma estrutura compacta beneficiando sua resistência mecânica da argamassa no estado endurecido. Mesmo pela composição química favorável à atividade pozolânica pela presença de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , conforme Tabela 6; o resíduo de rocha não apresentou atividade pozolânica.

Tabela 6 - Composição dos materiais utilizados determinadas por espectrometria por fluorescência de raios X. (%).

	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{MgO}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	Outros
Magnésia	0,15	6,07	80,20	0,41	1,30	-	-	11,87
Cinza volante	37,70	49,90	0,54	4,38	3,74	-	-	3,74
Lama de granito	10,42	57,58	0,58	2,06	1,85	3,29	3,42	20,80

Fonte: Li *et al.* (2010)

#### 2.2.2.2 Estudos em Concretos

A trabalhabilidade do concreto fresco é uma característica determinante na produtividade dos empreendimentos de construção. A utilização de finos na mistura pode influenciá-la deixando-a menos fluida, o que aconteceu no estudo de Al-Akhras *et al.* (2010). Foi empregado o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais queimado a  $700^\circ\text{C}$ , como substituição parcial do cimento nos teores de 0, 5, 10 e 15%. Constatou-se que o resíduo diminuiu a fluidez dos concretos a medida o percentual de substituição aumentou devido à alta superfície específica do mesmo. Os concretos foram colocados em cura úmida e em autoclave. Após cura úmida, a resistência à compressão aumentou 12, 26 e 22 % e a resistência à flexão aumentou em 10, 7 e 16% para os teores de 5, 10 e 15% de substituição. Após cura em autoclave as resistências aumentaram em 42, 34 e 40 % para os mesmos teores. A melhora global das características mecânicas ocorreu em função do componente  $\text{CaO}$  do resíduo de rocha, conforme Tabela 7, que reage com sílica formando o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que contribui com o aumento da resistência.

Tabela 7 - Composição química do resíduo de rocha utilizado.

	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Perda ao fogo
Resíduo de rocha	1,09	5,97	0,93	0,28	76,09	0,67	0,099	0,0

Fonte: Al-Akhras *et al.* (2010).

Almeida *et al.* (2007) substituíram o agregado miúdo por resíduo de rochas ornamentais, originário de calcários e mármore, nos teores de 0, 5, 10, 15, 20, 34, 67 e 100%. A relação a/c não foi fixada, ou seja, buscou-se a consistência desejada adicionando-se água à mistura. A resistência à compressão dos concretos produzidos aumentou para o teor de 5% e foi atribuída ao efeito de nucleação causado pelos finos e melhoria da qualidade do concreto na zona de transição. A substituição de 10, 15, 20, 34, 67 e 100 % de resíduo resultou na diminuição da resistência à compressão. Houve redução do volume de vazios e na absorção de água nos concretos com até 15% de resíduo.

### 2.2.3 Durabilidade de concretos com RBRO

A presença do tráfego de automóveis, termoeletricas e indústrias intensifica a concentração de poluentes na atmosfera causando não somente escurecimento dos sistemas de vedação e, inclusive, corrosão na estrutura de edifícios e monumentos (OZGA *et al.*, 2011). De acordo com a NBR 15575-1 (ABNT, 2013) o projeto e a construção de estruturas de concreto devem se adequar às condições ambientais as quais serão expostas as edificações de modo que sejam conservadas suas segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante toda a vida útil das mesmas.

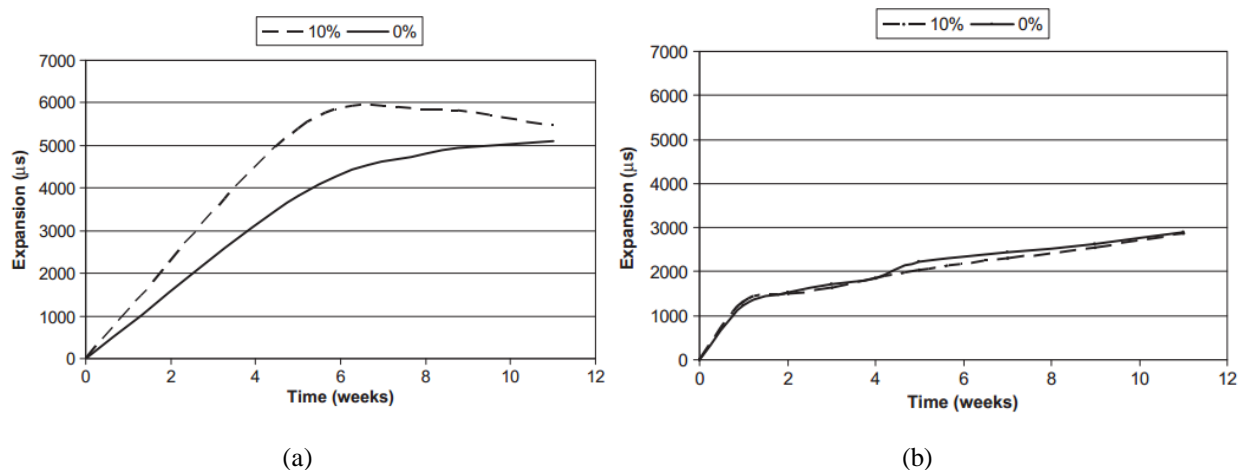
Sabe-se que a durabilidade das estruturas de concreto é função da qualidade do concreto. Depende principalmente da relação água /cimento e também da espessura e qualidade do concreto de cobertura do aço. Entretanto, outros materiais podem influenciar positivamente na qualidade do concreto como as adições minerais, e negativamente, como agregados contaminados, entre outros. Dessa forma torna-se indispensável a análise de durabilidade para os concretos, especialmente para aqueles que contenham resíduos e subprodutos.

Cheng *et al.* (2011), avaliaram a durabilidade do concreto em suas propriedades de resistência à abrasão, absorção de água, resistividade e resistência à penetração de cloretos. Foi empregado o resíduo de lã de rocha como substituição dos agregados naturais miúdo e graúdo nos teores de 2, 5, 7 e 10 % em relação ao volume de concreto. Houve significativo aumento na resistência à compressão o que pode ser relacionado com atividade pozolânica e com

empacotamento das partículas de cimento em virtude da finura do resíduo e sua composição química, rica em CaO e SiO<sub>2</sub>. Houve também melhora no desempenho na absorção de água, na resistividade do concreto e na resistência à penetração de cloretos. O resíduo pode ser utilizado como substituto de agregados e como material cimentante suplementar dependendo do tamanho de suas partículas, quando menores que 75 µm o resíduo de lã de rocha possui capacidade cimentante pela hidratação ou atividade pozolânica.

Al-Akhras *et al.* (2010) além de utilizarem o resíduo de rocha como substituição parcial do cimento, avaliaram em sua pesquisa a reação deletéria álcali-agregado. Essa análise foi necessária em função da utilização de vidro como substituição de 50% da massa de agregado miúdo. Foram propostas dois tipos de cura para as argamassas, cura em autoclave e cura úmida. Inicialmente as argamassas submetidas à cura em autoclave mostraram melhor comportamento em relação à expansão devido à reação álcali-agregado em relação às que passaram por cura úmida, o que pode ser explicado pela acelerada hidratação dos componentes do resíduo e do cimento. Entretanto, no final do período de análise (12 meses) o resultado da expansão nas argamassas com resíduo de rocha (10%) e as de controle (0%), para um mesmo tipo de cura, tendem a se aproximar conforme Figura 21 (a) e (b).

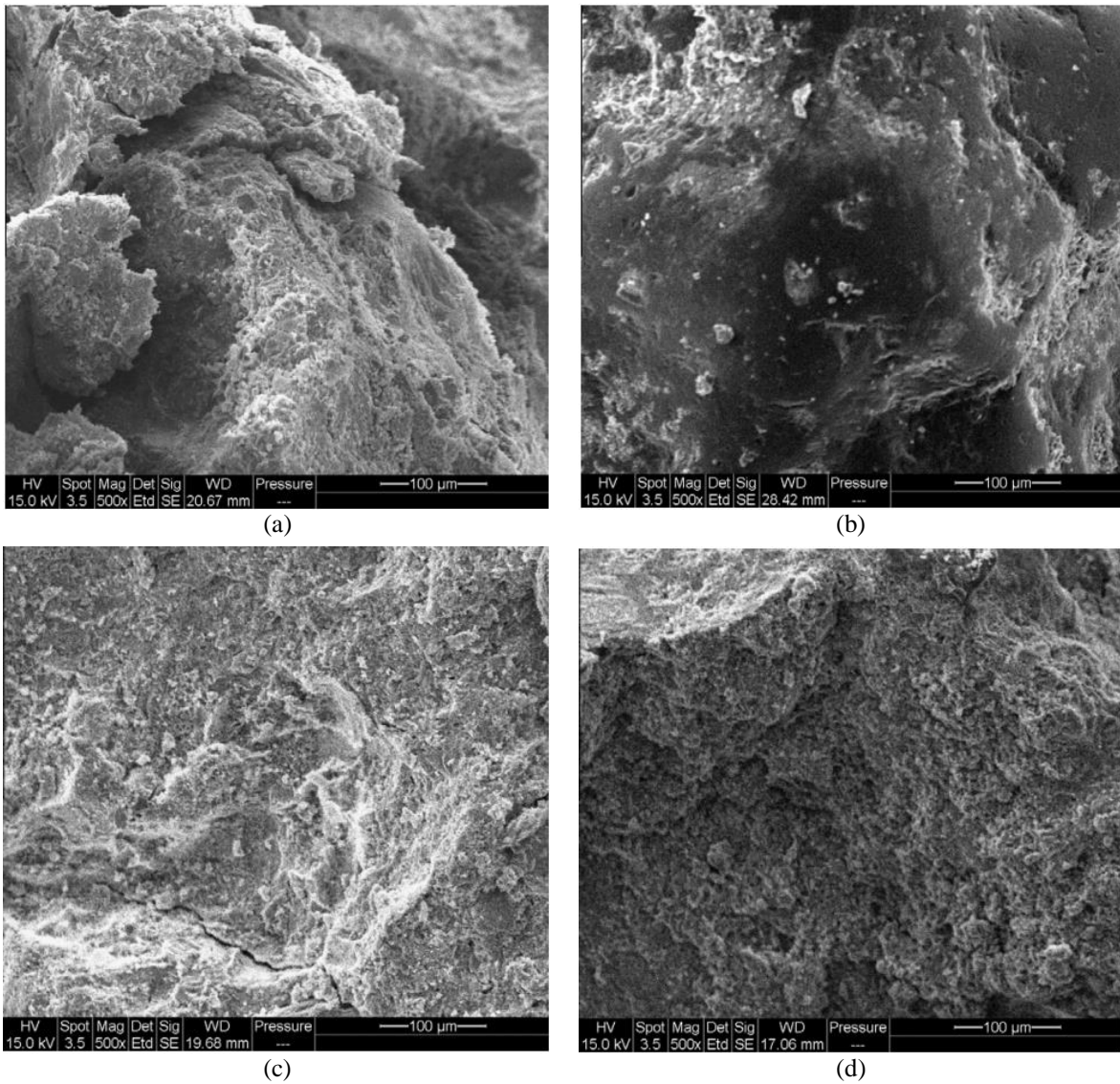
Figura 21 – Efeito da substituição de cimento por resíduo de rocha no teor de 10% comparado às misturas de controle em curas distintas: (a) cura úmida e (b) cura em autoclave.



Fonte: Al-Akhras *et al.* (2010).

A pesquisa de Al-Akhras *et al.* (2010) ainda mostra por meio de microscopia eletrônica de varredura que as argamassas produzidas com teor de substituição de 10%, quando comparadas com as argamassas de controle, em ambos os processos de cura, possuem menor porosidade e apresentam o efeito de empacotamento de partículas, conforme Figura 22 (a),(b) (c) e (d).

Figura 22 – Micrografias das argamassas (a) de controle em cura úmida, (b) com 10% resíduo de rocha em cura úmida, (c) de controle e cura em autoclave, (d) com 10% resíduo de rocha e cura em autoclave.



Fonte: Al-Akhras *et al.* (2010).

### 2.3 CORROSÃO DAS ARMADURAS EM CONCRETO ARMADO

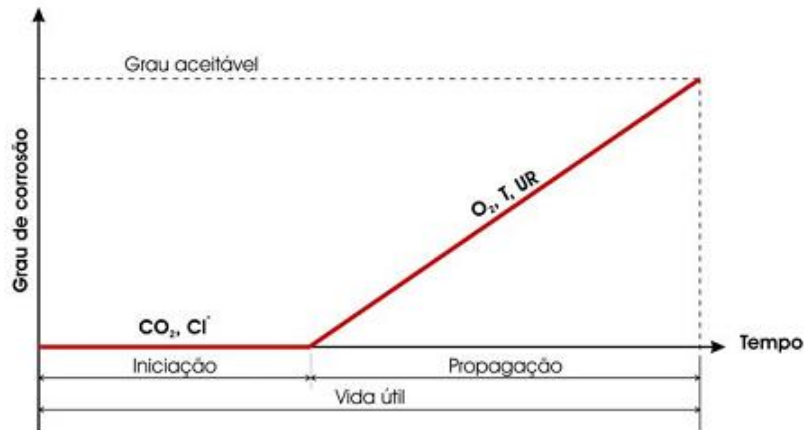
De acordo com Ramanathan (1988) a corrosão é um processo entre o metal e os elementos do meio capaz de convertê-lo a um estado não metálico o qual compromete suas características como elasticidade, resistência mecânica e ductilidade. Os metais estão presentes na natureza em seu estado combinado, ou seja, em forma de minerais que é a forma mais estável termodinamicamente. Durante sua produção é adicionada energia, normalmente em forma de calor, e sua quantidade varia conforme o tipo de metal. Essa energia é armazenada no metal e é perdida quando este sofre o processo de corrosão, logo, a corrosão também pode ser definida como inverso do processo metalúrgico (GENTIL, 1987).

As construções civis são suscetíveis a esse fenômeno destrutivo que pode trazer sérios danos às estruturas e altos prejuízos financeiros em função de expansão, fissuração e lascamento do concreto de cobertura do aço, perda de aderência entre armadura e concreto ou, ainda, perda da área da seção transversal da barra de aço. A corrosão pode ser classificada pela natureza do processo ou pela sua morfologia. Pela morfologia, pode ser generalizada, ou localizada. A primeira acontece em toda a superfície do material, resultado da carbonatação, a segunda subdivide-se em corrosão por pite, na qual os pontos de corrosão aprofundam-se na seção da armadura podendo romper o material; a corrosão sob tensão, é causada pelas tensões absorvidas pela estrutura (CASCUDO, 1997).

Cascudo (1997) ainda esclarece que a corrosão pode ser classificada também pela natureza do processo, química ou eletroquímica. O processo químico, ou oxidação, é lento e não causa grande deterioração nos materiais metálicos. Contudo, a transformação eletroquímica, a que causa danos às estruturas, é um processo complexo que se desenvolve em meio aquoso e na presença do gás oxigênio. Nas estruturas de concreto armado a célula de corrosão formada é composta de um metal (armadura) inserido num eletrólito (fase líquida do concreto) no qual há uma diferença de potencial.

O modelo de Tuutti, criado em 1982, ilustra a vida útil da estrutura de concreto armado num modelo simplificado que vincula duas etapas, a iniciação e a propagação da corrosão. A primeira ocorre desde o início da vida da estrutura até o momento que o agente agressivo ultrapassa o revestimento de concreto, alcança as armaduras e destrói a película de proteção química das mesmas. A segunda fase representa a progressão do processo de corrosão até que alcance um grau inaceitável, chegando ao final da vida útil da estrutura (Figura 23).

Figura 23 - Modelo de vida útil de Tuutti (1982).



Fonte: Ferreira (2003).

De acordo com Muthulingam e Rao (2014), geralmente ao final da construção de uma estrutura de concreto armado, o concreto protege as armaduras contra a corrosão em função do pH maior que 13, altamente alcalino. Para Cascudo (1997) a armadura embutida no concreto situa-se em meio alcalino, pH próximo de 12,5, protegida quimicamente do fenômeno da corrosão por uma película passiva que a envolve. Esse filme passivo é composto por óxido de ferro e é muito aderente ao aço, protege as armaduras contra a umidade, o oxigênio e íons agressivos e também dificulta a dissolução do ferro metálico. Contudo, existem fenômenos que podem levar à redução do pH do concreto, como a a lixiviação dos componentes da pasta de cimento endurecida, a carbonatação, acidificação do concreto, entre outros. Essa redução de pH pode alterar as condições de estabilidade química da película passiva ocasionando o a despassivação da armadura que marca o início do processo de corrosão.

Figueiredo (2011) afirma que os íons cloreto são os contaminantes naturais mais significativos encontrados em ambientes marinhos, mas podem também ser oriundos da água de amassamento, de agregados contaminados, de aditivos aceleradores de pega que contém CaCl<sub>2</sub>, podem penetrar no concreto por meio de sais anticongelantes, névoa de ambientes marinhos e outros.

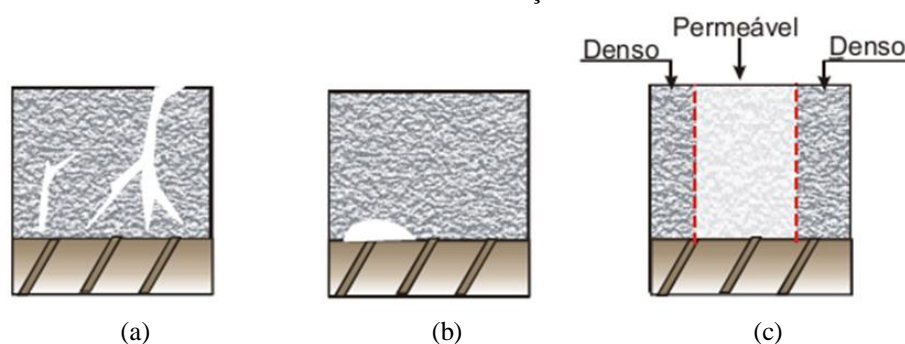
A quantidade limite de cloretos que podem ser tolerada sem ocasionar corrosão não está completamente determinada na literatura em função da complexidade da penetração desses íons no concreto, seu tipo de acesso (antes ou depois de endurecido), tipo de cimento, condição de saturação dos poros, etc. Muthulingam e Rao (2014) consideraram a quantidade

crítica de cloretos de 0,079 a 2% em relação à massa de cimento. A NBR 7211 (ABNT, 2009) restringe a 0,1% o teor de cloretos presentes nos agregados utilizados em concreto armado em relação à massa de cimento. A NBR 6118 (ABNT, 2014) não reporta o teor de cloretos mas não permite o uso de aditivos que contenham cloretos em sua composição.

Muthulingam e Rao (2014) declaram que quando o concreto está contaminado com cloretos parte dos íons podem ficar fisicamente adsorvidos pelo gel contido na pasta de cimento ou podem ficar fisicamente retidos em vazios e poros capilares, estes são denominados cloretos combinados. Os íons cloreto também podem ficar livres se reagirem quimicamente com a pasta, estes são denominados cloretos livres, estes são nocivos às armaduras.

Mehta e Monteiro (2008) explicam que as células de corrosão podem ser geradas devido à diferença de potencial existente quando dois metais diferentes são embutidos no concreto ou quando o aço utilizado possui diferenças em sua composição química ou em sua superfície. Também são formadas células de corrosão quando há concentração diferencial de íons, como álcalis e cloretos dissolvidos. Neste caso é de grande importância a proteção oferecida pelos concretos às armaduras contra a exposição ao ar, pois impede a aeração superficial diferencial. A Figura 24 mostra situações nas quais o concreto de cobertura oferece pouca proteção contra a corrosão por conter (a) fissuras, (b) vazios ou (c) por ter constituição distinta.

Figura 24 – Aeração superficial diferencial causadas por concreto contendo: (a) fissuras, (b) vazios, (c) diferentes constituições.



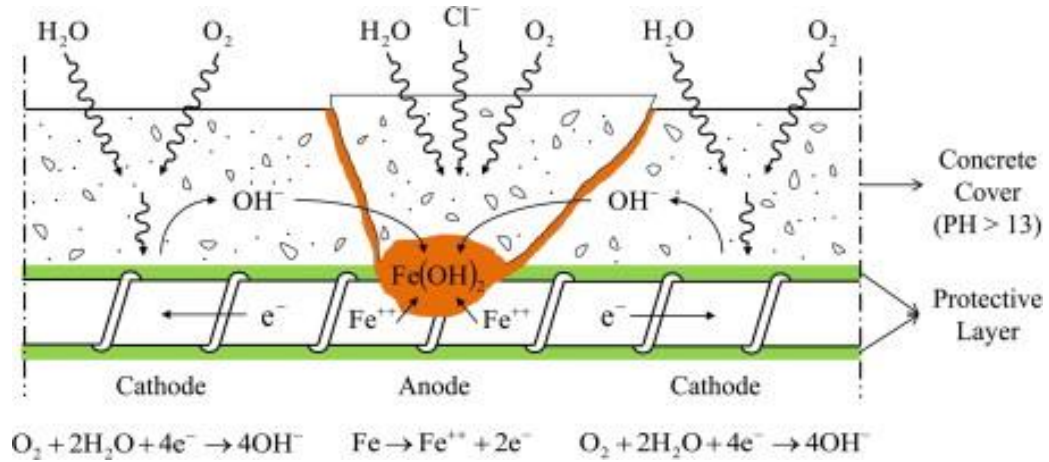
Fonte – Adaptado de Polito (2006).

Entretanto, a corrosão eletroquímica só se propagará na presença de umidade. Na Figura 25 é mostrada uma pilha eletroquímica de corrosão em aço em concreto armado. O processo eletroquímico acontece no interior do concreto, em algum local úmido na superfície da armadura (o concreto úmido é o eletrólito da pilha de corrosão). Neste local a armadura



funciona como um ânodo, onde o ferro é oxidado e é dissolvido para a solução como  $Fe^{2+}$  (equação 1).

Figura 25 – Processo eletroquímico de corrosão no concreto armado.



Fonte – Cao *et al.* (2013).



Os elétrons são liberados quando o ferro é oxidado e se movem pela armadura para a área catódica, onde há oxigênio e umidade na superfície do metal. Nesse local ocorre a redução do oxigênio que resulta na formação de um íon hidroxila,  $OH^-$ , (equação 2).



Os íons  $Fe^{2+}$  que são formados na região anódica difundem-se pela água reagindo com os íons hidroxila formando um precipitado volumoso-  $Fe(OH)_2$  – o qual é um dos produtos finais da corrosão. Este precipitado é muito facilmente oxidado pelo  $O_2$ , produzindo o  $Fe(OH)_3$ . A ferrugem é formada quando ocorre a desidratação parcial do óxido, como na equação 3.

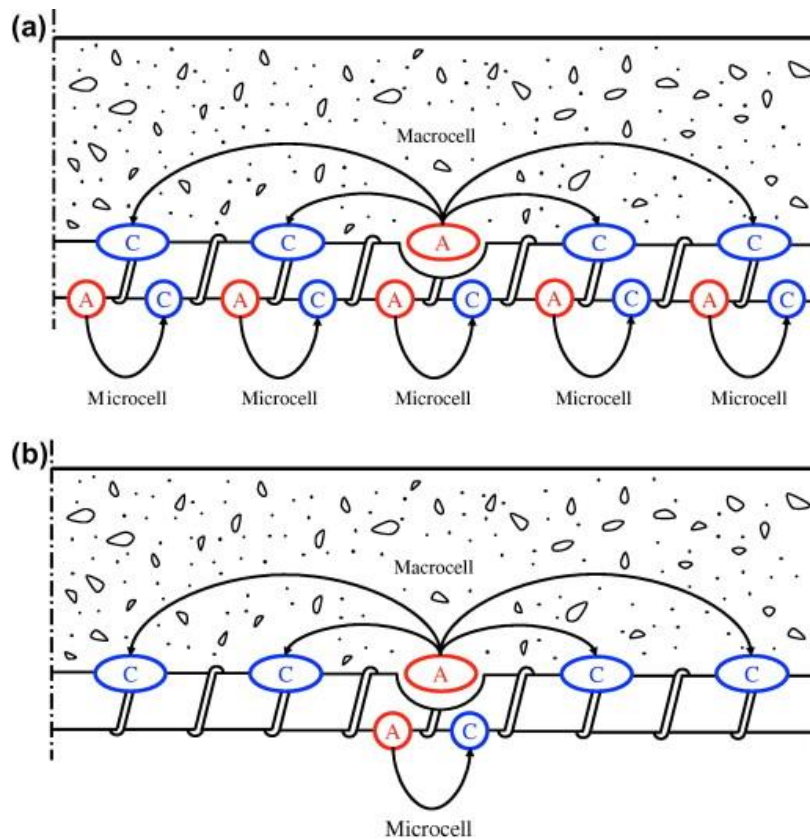


A influência de cloretos na despassivação das armaduras em concreto armado ainda é explicada por teorias, como a teoria do filme óxido, a teoria da adsorção e a teoria do complexo transitório. De acordo com Cascudo (1997) na teoria do filme óxido os íons cloreto podem penetrar mais facilmente pela camada de proteção do aço por meio de defeitos ou poros existentes na sua superfície. A segunda teoria explica que o  $Cl^-$  é adsorvido na

superfície do metal facilitando a dissolução dos íons metálicos. Na terceira teoria o processo de corrosão se inicia e os cloretos se combinam com o  $\text{Fe}^{2+}$ , formando  $\text{FeCl}_2$ , estes sofrem hidrólise e liberam o  $\text{Cl}^-$  e  $\text{H}^+$  para novas reações. O  $\text{H}^+$  faz com que as zonas anódicas se tornem mais ácidas e os potenciais se tornem mais negativos. As áreas catódicas têm seu pH aumentado em virtude da formação de  $\text{OH}^-$ . Dessa forma a corrosão por pites se autossustenta, diminuindo o pH das áreas anódicas e aumentando o pH das áreas catódicas.

Na etapa de propagação da corrosão existem dois tipos de pilhas eletroquímicas classificadas na literatura como macropilha ou macrocélula e micropilha ou microcélula. A macropilha consiste em áreas isoladas anódicas e catódicas, ou seja, as mesmas encontram-se afastadas umas das outras. As micropilhas, por sua vez, possuem distâncias microscópicas entre ânodos e cátodos, conforme Figura 26. Cao *et al.* (2013) acrescentam que microcélulas causam corrosão uniforme e as reações anódicas envolvidas são totalmente suportadas pelas reações catódicas locais, como na corrosão por carbonatação. A macrocélula, entretanto, causa corrosão localizada e tem as reações anódicas na zona ativa suportadas pelas reações catódicas das zonas passivas, corrosão por íons cloreto.

Figura 26 – Microcélula e macrocélula de corrosão eletroquímica do aço em concreto armado.



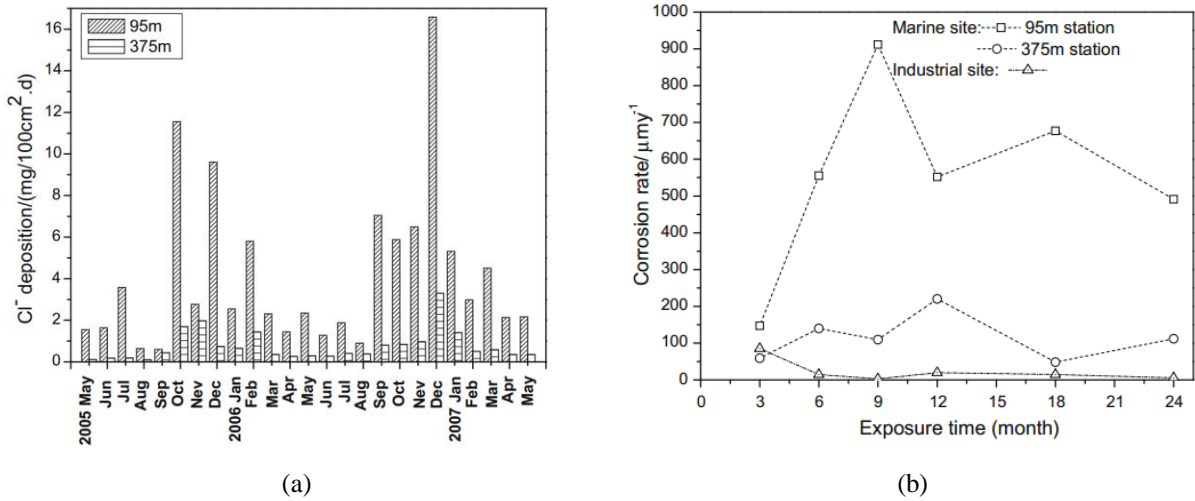
Fonte – Cao, Cheung, Chan (2013).

Alguns resíduos empregados em argamassas ou concretos são capazes de melhorar o desempenho dos mesmos em relação à penetração de íons cloreto. O estudo de Oikonomou e Mavridou (2009) utilizou borracha de pneu granulada como substituição parcial de agregado miúdo em argamassas. Corpos de prova foram avaliados em suas propriedades físicas, mecânicas e em sua resistência à penetração de cloretos utilizando-se das especificações da norma ASTM C 1202 (ASTM, 2012). Os resultados mostraram que a substituição de borracha de pneu granulada trouxe efeitos positivos na resistência à penetração de íons cloreto e na absorção de água por imersão em vácuo, embora tenham sido constatadas perdas na trabalhabilidade, no peso específico e nas resistências à compressão e à flexão das argamassas produzidas.

### **2.3.1 Fatores intervenientes**

Yuantai Ma *et al.* (2009) avaliaram o efeito dos íons  $\text{Cl}^-$  em amostras de aço expostas à ambiente marinhos distantes do mar a 95m e 375m e à atmosfera industrial. As amostras foram avaliadas por meio de espectroscopia de infravermelho e difração de raios X, medidas eletroquímicas de resistência de polarização. Foi constatado que durante toda a investigação a deposição de  $\text{Cl}^-$  é maior a 95m do mar do que a 375m do mar, conforme Figura 27 (a). As taxas de corrosão nos respectivos ambientes foram comparadas, nota-se que a taxa de corrosão em ambientes marinhos cresce até atingir um pico e depois decresce, o que não acontece no ambiente industrial. Entretanto, a proximidade com o mar é determinante no processo de corrosão, a 95 metros do mar a maior taxa de corrosão foi atingida no nono mês de exposição, enquanto a 375m de distância a taxa máxima foi alcançada após 12 meses de exposição, conforme. Figura 27 (b).

Figura 27 – (a) Medidas mensais de concentração de Cl<sup>-</sup> em armaduras expostas por 24 meses em ambientes marinhos distantes a 95m e 375m do mar ; (b) taxa de corrosão do aço nas duas atmosferas marinhas e na industrial.

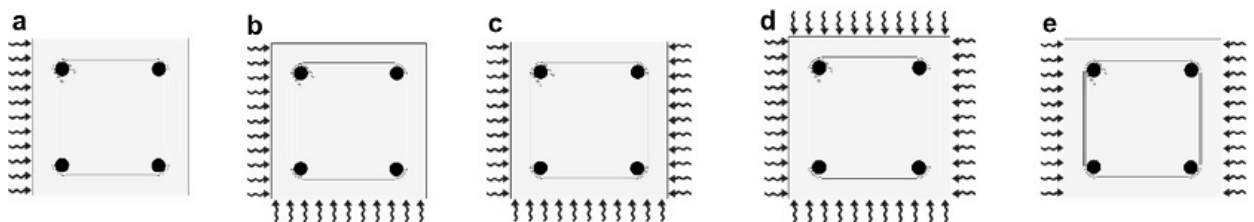


Fonte: Ma *et al.* (2009).

A determinação da concentração de cloretos foi realizada conforme a norma internacional ISO 9225: 1992, similar à norma brasileira NBR 6211 (ABNT, 2001) - Corrosão atmosférica - Determinação de cloretos na atmosfera pelo método da vela úmida.

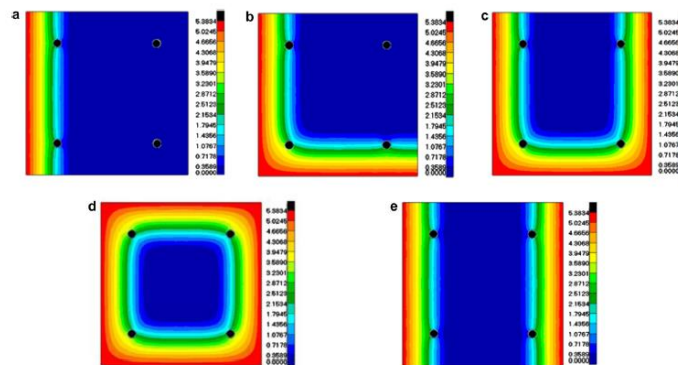
Muthulingam e Rao (2014) estudaram a distribuição de produtos de corrosão em torno do perímetro dos vergalhões nas cinco situações de acesso de cloretos transportados pelo ar mostradas na Figura 28. Utilizaram modelagem matemática por meio de elementos finitos partindo de três equações diferenciais parciais que descrevem o transporte de calor, umidade e cloretos por difusão em concreto. Por meio da simulação de exposição por 100 anos, considerando o diâmetro nominal das armaduras de 16 mm, concentração de cloretos na superfície de 9 kg/m<sup>3</sup>, espessura de cobrimento de 50 mm concluiu-se que a corrosão se inicia mais rapidamente nas armaduras de canto, próximas de duas superfícies adjacentes expostas à atmosfera marinha, conforme Figura 29.

Figura 28 - Situações de acesso de cloretos transportados pelo ar nas proximidades do mar.



Fonte: Muthulingam; Rao (2014).

Figura 29 –Concentração de cloretos para cinco configurações estruturais

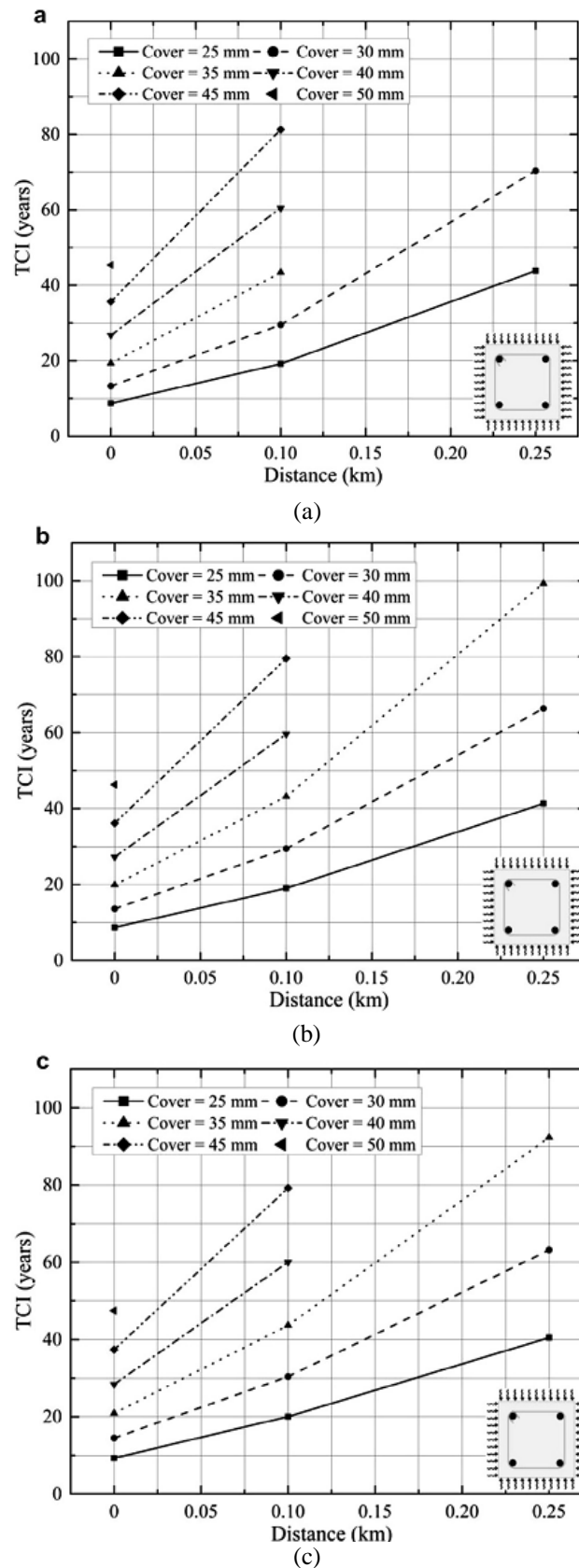


Fonte: MUTHULINGAM; RAO (2014).

A pesquisa de Muthulingam e Rao (2014) ainda mostrou o efeito da distância da estrutura até a costa. Considerou-se exposição a íons cloreto em todas as suas superfícies da estrutura e concentração constante de cloretos nas superfícies de  $9 \text{ kg/m}^3$ . Pode ser observado pela Figura 30 que o tempo de iniciação tem uma relação linear com a distância até o mar.

Na Figura 30 (a) as espessuras de cobertura de 35 mm ou maiores são capazes de conter a iniciação da corrosão, em estruturas de diâmetro nominal 12 mm, localizadas partir de 100 m de distância do mar. Na Figura 30 (b) as espessuras de cobertura de 40 mm ou maiores são capazes de conter a iniciação da corrosão, em estruturas de diâmetro nominal 16 mm, localizadas partir de 100 m de distância do mar. Na Figura 30 (c) as espessuras de cobertura de 40 mm ou maiores são capazes de conter a iniciação da corrosão, em estruturas de diâmetro nominal 25 mm, localizadas partir de 100 m de distância do mar, a espessura de cobertura de 50 mm, por sua vez, não permite o início da corrosão.

Figura 30 – Tempo para iniciação da corrosão (*TCI: time-to corrosion iniciation*) em função da distância da estrutura até o mar, nas espessuras de cobrimento indicadas, para armaduras com diâmetro nominal de (a) 12mm, (b) 16mm e (c) 25mm.



Fonte: Muthulingam; Rao (2014).

Andrade e Buják (2013) utilizaram cimento Portland branco e cimento Portland comum com substituição de cinzas volantes e escória para avaliar o seu efeito na corrosão em concreto armado. A relação a/c foi mantida constante (0,5) e a corrosão foi induzida por cloretos e por carbonatação. Os corpos de prova foram submetidos a condições particulares em função da natureza do ataque. A indução da corrosão por cloretos foi feita por meio de ciclos imersão dos corpos de prova em solução com NaCl a 1mol/l, por 3 dias, e secagem por 4 dias em ambiente de laboratório até o início do processo corrosivo. Os resultados indicaram que o cimento contendo escória é mais resistente ao ataque dos íons cloreto e, ao mesmo tempo, é menos resistente à carbonatação. Os produtos de hidratação C-S-H (silicato de cálcio hidratado) e AFm (monossulfoaluminato de cálcio hidratado) são parâmetros importantes que podem dificultar o ingresso de cloretos no concreto. Além das fases C-S-H e AFm, a portlandita deve também ser considerada como parâmetro controlador no ataque por carbonatação.

### **2.3.2 Mecanismos de transporte**

O transporte de íons cloreto é um processo complexo influenciado por fenômenos físicos e químicos. Para Muthulingam e Rao (2014), depende de parâmetros internos tais como o nível de hidratação do cimento, porosidade do concreto, tipo de cimento, entre outros; depende também de fatores externos como a temperatura e umidade relativa do ar, mas os autores consideram a difusão como o principal meio de transporte dos íons. Nielsen e Geiker (2003) têm como principais meios de transporte dos cloretos para o interior do concreto parcialmente saturado a sucção capilar de água contaminada e a difusão.

Figueiredo *et al.* (2014) consideram que a entrada de cloretos nos concretos acontece por meio de três mecanismos de transporte: absorção, permeabilidade e, principalmente, difusão, podendo haver combinação entre os mesmos. Os autores adicionam o mecanismo de migração iônica, todavia, este é motivado por campos elétricos externos aplicados geralmente nos ensaios acelerados em laboratório. Dessa forma, consideram que a migração iônica tenha menor probabilidade de atuar em estruturas de concreto armado usuais.

A difusão dos íons é, portanto, considerada o principal meio de transporte dos íons cloreto no concreto. De acordo com Silva (2011) a difusão é o movimento aleatório de moléculas ou íons que migram das regiões de alta concentração para as regiões de baixa concentração. Se o concreto for considerado um material homogêneo, isotrópico e que o processo só englobe

difusão de íons, é possível determinar experimentalmente um coeficiente efetivo de difusão. Entretanto, a técnica gera controvérsias, pois outras formas de transferência de massa podem ocorrer, como absorção capilar e migração iônica; a concentração de cloretos na superfície da amostra não permanece constante, variando com o tempo; sendo assim, o coeficiente de difusão é função do tempo. No Quadro 2 estão listados resumidamente os mecanismos de transporte de íons, as leis, força motriz e grau de saturação em que o eletrólito se encontra.

Quadro 2 – Mecanismos de transporte, leis, força motriz e grau de saturação.

MECANISMO	LEIS /MODELOS	FORÇA MOTRIZ	GRAU DE SAUTRAÇÃO	UNIDADE
<b>ABSORÇÃO CAPILAR</b>	D'Árcy modificada, Jurin, Laplace, Arrhenius	Ascensão capilar	Insaturado	m/s; g/cm <sup>2</sup> , m
<b>DIFUSÃO</b>	1ª e 2ª Leis de Fick, Arrhenius, Langmuir	Diferença de concentração	Saturado e parcialmente saturado	m <sup>2</sup> /s; cm <sup>2</sup> /s
<b>PERMEABILIDADE</b>	D'Árcy e Arrhenius	Diferença de pressão	Saturado	m/s; cm/s
<b>MIGRAÇÃO IÔNICA</b>	Nerst-Planck, 1ª e 2ª Leis de Fick, Arrhenius, Langmuir	Diferença de potencial	Saturado	m <sup>2</sup> /s; cm <sup>2</sup> /s

Fonte: Moraes (2008).

Higashiyama *et al.* (2012) conduziram experimentos em argamassas fabricadas com resíduo de cerâmica utilizado como agregado miúdo depois de ter sido moído. Os corpos de prova foram ensaiados para a análise de resistência à compressão axial, resistência à penetração de cloretos por meio de aspersão de nitrato de prata e penetração rápida de cloretos. Notou-se que as argamassas com resíduo obtiveram melhores resultados de resistência à compressão do que as argamassas de referência devido à melhor coesão entre as partículas cerâmicas e a pasta de cimento. A profundidade de penetração de íons cloretos foi significativamente menor nas argamassas com agregados cerâmicos, e o coeficiente de difusão dos íons decresceu 63% nessas argamassas quando comparadas às argamassas de referência.

Muitas pesquisas modelam a difusão de íons cloreto através do concreto com base na segunda lei de Fick. Entretanto, para Win *et al.* (2004), é muito comum que existam fissuras nas estruturas de concreto, estas podem permitir o transporte de íons cloreto por água ou umidade através a seção dos elementos estruturais. Dessa forma os íons podem alcançar as armaduras em algumas horas enquanto a difusão de íons pode demorar mais tempo, o que reforça a importância da qualidade do concreto na preservação das armaduras



*Capítulo 3*  
**Programa Experimental**

---

## **3 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

### **3.1 INTRODUÇÃO**

O interesse em aumentar a compreensão sobre algum processo instiga pesquisadores de diversas áreas do conhecimento a conduzirem experimentos. Os experimentos precisam ser executados de forma estruturada, controlada e econômica, permitindo a análise estatística dos dados colhidos. Nesta dissertação o programa experimental foi estruturado para avaliar a influência da adição do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais – RBRO – nas características de concretos com armaduras embutidas, frente à ação de íons cloreto. Portanto, sob a ótica da otimização, tornaram-se indispensáveis as etapas de planejamento de experimentos, programa experimental, materiais empregados e métodos utilizados que estão expostas neste capítulo.

### **3.2 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS**

Para alcançar os objetivos desta pesquisa foram definidos os dados a serem coletados, os experimentos relacionados, as condições em que seriam coletados, planilhas para o registro dos mesmos, datas importantes, quantidade de corpos de prova necessários, entre outros. Nesta seção são identificadas as variáveis envolvidas, as quais podem interferir nas características consideradas importantes do produto final.

#### **3.2.1 Variáveis do programa experimental**

As variáveis do programa experimental estão classificadas em: variáveis de controle, variáveis independentes e variáveis dependentes. As variáveis de controle são condições que provocam variações consideráveis sobre a variável de interesse da pesquisa. Todavia, elas são mantidas constantes durante todas as etapas do experimento, pois não representam o interesse principal da pesquisa. São variáveis de controle o tipo de resíduo utilizado, o tipo de material cimentício, os tipos de agregados, os procedimentos dosagem dos concretos, moldagem de corpos de prova, cura e espessura de cobrimento da armadura.

As variáveis independentes são escolhidas intencionalmente e podem se subdividir em vários níveis - condições de operação importantes no estudo. Estão entre as variáveis independentes a proporção de RBRO, a relação água/cimento e a idade de 28 dias do concreto para ensaio de resistência à compressão axial. Já as variáveis dependentes, ou variáveis de resposta, são

aferidas e seus resultados sofrem efeitos nos testes em função das outras variáveis. As variáveis envolvidas estão discriminadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Variáveis envolvidas na pesquisa.

TIPO DE VARIÁVEL	VARIÁVEL
Dependentes	Resistência à compressão axial Absorção de água por imersão e fervura Absorção por capilaridade Potencial de corrosão Altura de penetração de cloretos
Independentes	Proporção de RBRO Relação água/cimento Idade (28 dias para ensaio de resistência à compressão axial)
Controle	Resíduo (RBRO) Tipo de cimento (CPV ARI) Agregado miúdo natural quartzoso extraído de jazida Agregado graúdo oriundo da britagem de rochas graníticas Procedimento de dosagem do concreto (IPT/EPUSP) Cura imersa em solução saturada com cal Cobrimento do concreto (2cm)

Fonte: produção da autora.

A escolha dos níveis trabalhados na variável independente proporção de RBRO baseou-se em trabalhos que envolveram a investigação da durabilidade de concretos produzidos com a incorporação de resíduos, como mostra o Quadro 4.

Quadro 4 - Níveis da variável independente utilizadas em outras pesquisas em matrizes cimentícias.

AUTORES / PERIÓDICO	RESÍDUO/ FINALIDADE	NÍVEIS DE RESÍDUO	NÍVEIS A/C
Oikonomou, Mavridou/ Cement & Concrete Composites (2009)	Resíduo de pneu / substituto parcial de agregado miúdo	0; 2,5 ; 5; 7,5; 10; 12,5; 15%	1 nível: 0,50
Al-Akhras, Ababneh, Alaraji / Construction and Building Materials (2010)	Resíduo queimado de rocha/ substituição parcial de cimento e de agregado miúdo.	0, 5, 10 e 15%.	1 nível: 0,70
Sim; Park / Waste Management (2011)	RCC e cinzas volantes/ Substituição de agregados naturais e adição.	0; 30; 50; 60; 70; 100 % (RCC). 0, 15, 30 % (cinzas volantes).	3 níveis: 0,35; 0,41; 0,50;
Ribeiro, Labrincha, Morelli/ Cement and Concrete Research. (2012)	Lama vermelha /adição.	0; 10, 20, 30 %.	1 nível: 0,50
Jayapalan,.; Bo Yeon Lee; Kurtis/ Cement & Concrete Composites	TiO <sub>2</sub> e calcário/ adição.	0, 5, 10, 15%	1 nível 0,50

Fonte: produção da autora

As variáveis independentes desta pesquisa e os seus níveis estão apresentados nos Quadro 5, Quadro 6 e Quadro 7.

Quadro 5 - Níveis dos fatores para os ensaios em concreto fresco.

VARIÁVEIS INDEPENDENTES	Nº de NÍVEIS	NÍVEIS	UNIDADES
Percentual de adição de RBRO	4	0, 5,10,15	%
Relação água/ cimento	3	0,45; 0,55; 0,65	-

Fonte: produção da autora.

Quadro 6 – Níveis dos fatores para o ensaio em concreto endurecido.

VARIÁVEIS INDEPENDENTES	Nº de NÍVEIS	NÍVEIS	UNIDADES
Percentual de adição de RBRO	4	0, 5,10,15	%
Relação água/ cimento	3	0,45; 0,55; 0,65	-
Idade	1	28	Dias

Fonte: produção da autora.

Quadro 7 – Níveis dos fatores para os ensaios de durabilidade.

VARIÁVEIS INDEPENDENTES	Nº de NÍVEIS	NÍVEIS	UNIDADES
Percentual de adição de RBRO	4	0, 5,10,15	%
Relação água/ cimento	3	0,45; 0,55; 0,65	-
Idade	1	44	dias

Fonte: produção da autora.

A quantidade de corpos de prova necessária para a condução dos ensaios em concreto endurecido foi dimensionada por meio de um experimento fatorial cruzado. Esse tipo de experimento foi escolhido em virtude do tipo de relação entre os níveis das variáveis independentes. O Quadro 8 apresenta cada combinação possível do projeto fatorial cruzado completo e o número de corpos de prova necessários para a obtenção das variáveis dependentes, ou variáveis resposta. Para os ensaios de resistência à compressão axial foram necessários 6 corpos de prova.

Para os ensaios de absorção de água por capilaridade a norma NBR 9779 (ABNT, 2012) exigiu 3 corpos de prova cilíndricos. Logo, para o ensaio de absorção por imersão e fervura também foram preparados três corpos de prova, um a mais dos dois exigidos pela norma NBR 9778 (ABNT, 2005). Os ensaios de durabilidade demandaram 4 corpos de prova de aço, armaduras embutidas em corpos de prova prismáticos de concreto. Ao total foram produzidos 144 corpos de prova de concreto para a avaliação dos ensaios em concreto endurecido e 48 corpos de prova de aço para os ensaios de durabilidade.

Quadro 8 – Projeto fatorial cruzado completo dos ensaios em concreto endurecido.

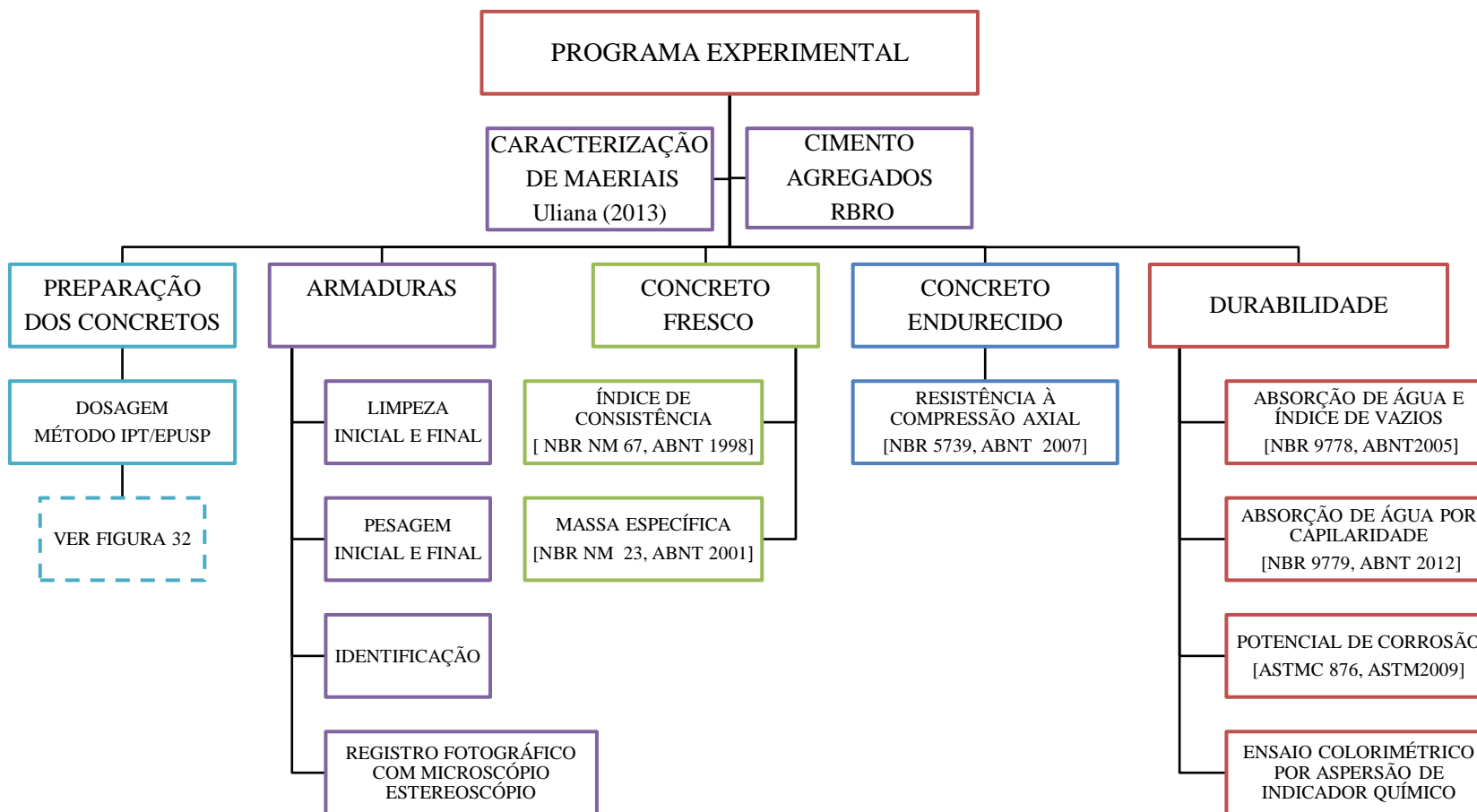
<p>Possíveis <b>Interações</b>:</p> <p>Número de níveis de adição do resíduo x número de níveis de relação água/ cimento: <math>4 \times 3 = 12</math></p>
<p>Projeto Fatorial Cruzado Completo:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cálculo para ensaios de determinação em concreto endurecido: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Resistência à compressão axial: nº de níveis de proporção de resíduos x nº de níveis de relação água /cimento x nº de níveis de idade x nº número de variáveis resposta: <math>4 \times 3 \times 1 \times 6 = 72</math> (a)</li> </ul> </li> <li>• Cálculo para ensaios de durabilidade: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Absorção de água por imersão e fervura: nº de níveis de proporção de resíduos x nº de níveis de relação água /cimento x nº de níveis de idade x nº número de variáveis resposta: <math>4 \times 3 \times 1 \times 3 = 36</math> (b)</li> <li>○ Absorção de água por capilaridade: nº de níveis de proporção de resíduos x nº de níveis de relação água /cimento x nº de níveis de idade x nº número de variáveis resposta: <math>4 \times 3 \times 1 \times 3 = 36</math> (c)</li> <li>○ Potencial de Corrosão e profundidade de penetração de cloretos: nº de níveis de proporção de resíduos x nº de níveis de relação água /cimento x nº de níveis de idade x nº número de variáveis resposta: <math>4 \times 3 \times 1 \times 1 \times 4 = 48</math> (d)</li> </ul> </li> <li>• Número total de corpos de prova: (a) + (b) + (c) = <math>72 + 36 + 36 = 144</math> : total de corpos de prova cilíndricos de concreto. (d) = 48 corpos de prova (armaduras).</li> </ul>

Fonte: produção da autora.

### 3.3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Buscando alcançar os objetivos estabelecidos no Capítulo 1 e também contribuir para um ajuste eficiente das atividades laboratoriais, foi montado um programa experimental subdividido em cinco áreas principais: preparação dos concretos, armaduras, concreto fresco, concreto endurecido e durabilidade. A Figura 31 apresenta o fluxograma geral do programa experimental o qual pode aproveitar a caracterização de materiais executada por Uliana (2013).

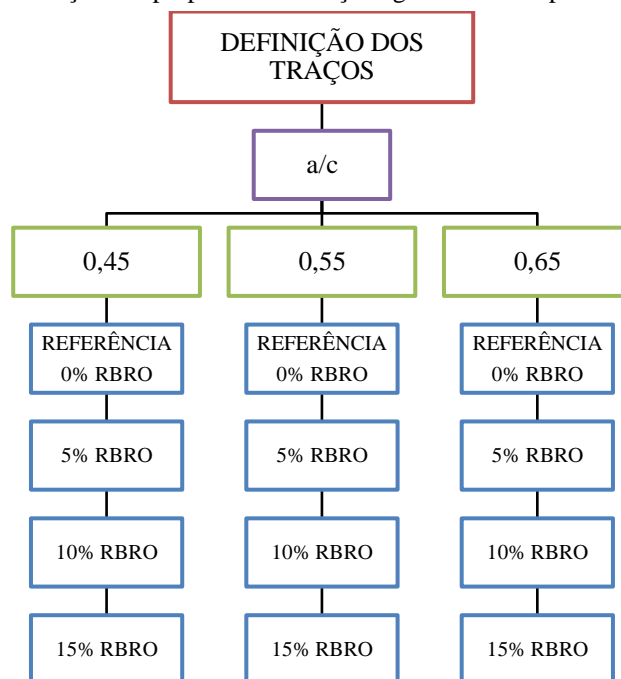
Figura 31 – Programa Experimental - geral.



Fonte: produção da autora.

A Figura 32 complementa o programa experimental na definição das propriedades relação água/cimento e percentual de adição de RBRO dos concretos executados.

Figura 32 – Definição das propriedades relação água/cimento e percentual de adição.



Fonte: produção da autora.

O projeto fatorial completo para a realização dos experimentos em concretos endurecidos, abrangendo os ensaios de resistência à compressão axial, absorção de água por imersão e por capilaridade está apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Projeto fatorial completo dos ensaios em concreto endurecido.

A/C	CORPO DE PROVA	% ADIÇÃO				TOTAL DE CORPOS DE PROVA/ENSAIO	TIPO DE ENSAIO (respectivas normas na Figura 31)
		0	5	10	15		
0,45	Concreto	6	6	6	6	24	Resistência à compressão
		6	6	6	6	24	Absorção de água por imersão e por capilaridade
0,55	Concreto	6	6	6	6	24	Resistência à compressão
		6	6	6	6	24	Absorção de água por imersão e por capilaridade
0,65	Concreto	6	6	6	6	24	Resistência à compressão
		6	6	6	6	24	Absorção de água por imersão e por capilaridade
TOTAL		36	36	36	36	144	-

Fonte: produção da autora.

A Tabela 9 contempla o projeto fatorial completo para os experimentos de durabilidade em corpos de prova de aço embutidos em concreto.

Tabela 9 - Projeto fatorial completo dos ensaios de durabilidade.

A/C	CORPO DE PROVA	% ADIÇÃO				TOTAL DE CORPOS DE PROVA/ENSAIO	TIPO DE ENSAIO (respectivas normas na Figura 31)
		0	5	10	15		
0,45	CA-50	4	4	4	4	16	Potencial de Corrosão Penetração de cloretos por método colorimétrico
0,55	CA-50	4	4	4	4	16	Potencial de Corrosão Penetração de cloretos por método colorimétrico
0,65	CA 50	4	4	4	4	16	Potencial de Corrosão Penetração de cloretos por método colorimétrico
TOTAL		12	12	12	12	48	-

Fonte: produção da autora.

Para Montgomery e Runger (2013), quando a pesquisa considera quatro, cinco ou mais fatores (variáveis dependentes) pode ser utilizado um experimento fatorial fracionado no qual uma parte das combinações dos fatores é testada. Neste planejamento a meia-fração foi utilizada como uma repetição econômica dos experimentos. Metade dos corpos de prova determinados na matriz completa são moldados e ensaiados, escolhidos de forma a abranger todos os níveis de relação água cimento e todas as porcentagens de adição de RBRO. Essa repetição permite trabalhar com todas as variáveis, em seus níveis sem que o experimento se torne duvidoso.

O Quadro 9 (a), (b) e (c) ilustra as opções para a montagem da matriz fatorial fracionada. Para o dimensionamento da matriz de repetição utilizada nesta pesquisa foi escolhido o modelo (b).

Quadro 9 - (a), (b) e (c) alternativas de combinações de variáveis para o projeto fatorial fracionado, ou repetição.

a/c	ADIÇÃO DE RBRO (%)			
	0	5	10	15
0,45	●			●
0,55		●	●	
0,65	●			●

(a)

a/c	ADIÇÃO DE RBRO (%)			
	0	5	10	15
0,45	●		●	
0,55		●		●
0,65	●		●	

(b)

a/c	ADIÇÃO DE RBRO (%)			
	0	5	10	15
0,45		●	●	
0,55	●			●
0,65		●	●	

(c)

Fonte: produção da autora.



A Tabela 10 e a Tabela 11 apresentam o modelo escolhido para o projeto fatorial de repetição.

Tabela 10 – Projeto fatorial fracionado para repetição dos ensaios em concreto endurecido.

A/C	CORPO DE PROVA	% ADIÇÃO				TOTAL DE CORPOS DE PROVA/ENSAIO	TIPO DE ENSAIO (RESPECTIVAS NORMAS Figura 31)
		0	5	10	15		
0,45	Concreto	6	-	6	-	12	Resistência à compressão
		6	-	6	-	12	Absorção de água por imersão e por capilaridade
0,55	Concreto	-	6	-	6	12	Resistência à compressão
		-	6	-	6	12	Absorção de água por imersão e por capilaridade
0,65	Concreto	6	-	6	-	12	Resistência à compressão
		6	-	6	-	12	Absorção de água por imersão e por capilaridade
TOTAL	Concreto	24	12	24	12	72	

Fonte: produção da autora.

Tabela 11 - Projeto fatorial fracionado para repetição dos ensaios de durabilidade.

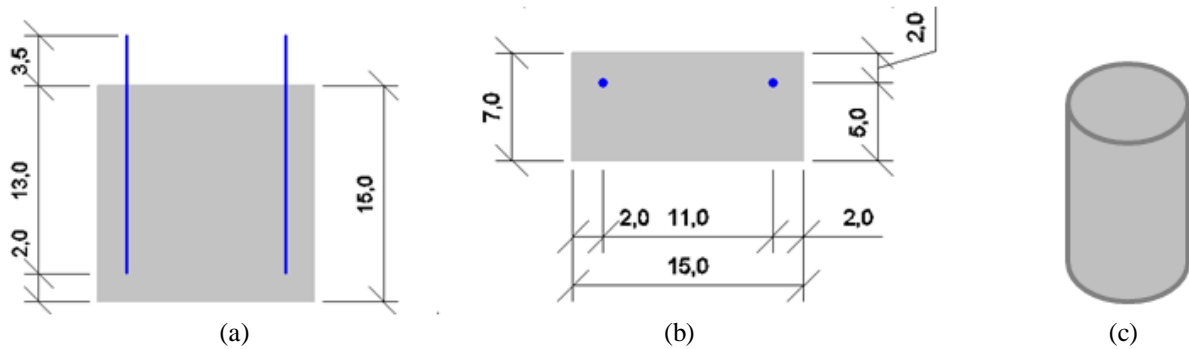
A/C	CORPO DE PROVA	% ADIÇÃO				TOTAL DE CORPOS DE PROVA/ENSAIO	TIPO DE ENSAIO (respectivas normas na Figura 31)
		0	5	10	15		
0,45	CA-50	4	-	4	-	8	Potencial de Corrosão
							Penetração de cloretos por método colorimétrico
0,55	CA-50	-	4	-	4	8	Potencial de Corrosão
							Penetração de cloretos por método colorimétrico
0,65	CA 50	4	-	4	-	8	Potencial de Corrosão
							Penetração de cloretos por método colorimétrico
TOTAL		8	4	8	4	24	-

Fonte: produção da autora.

### 3.3.1 Corpos de prova

Para os ensaios de durabilidade - potencial de corrosão e profundidade de penetração de cloretos por método colorimétrico – foram moldados corpos de prova de geometria prismática, 15 cm x 15 cm x 7 cm como ilustra a Figura 33 (a) e (b). Para os ensaios de massa específica, absorção de água por imersão e fervera, absorção capilar, índice de vazios e resistência à compressão axial foram moldados corpos de prova em formas metálicas, cilíndricas, com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm, conforme Figura 33(c).

Figura 33 - Geometria dos corpos de prova para os ensaios de durabilidade em corte (a) e em planta(b). E corpo de prova cilíndrico (c) para ensaios de em concreto endurecido.



Fonte: produção da autora.

Para a moldagem dos corpos de prova prismáticos foram utilizadas duas formas metálicas de 60 cm x 15 cm x 15 cm complementadas com peças em madeira compensada de forma que formassem 5 volumes independentes. As peças em madeira também garantiram a espessura de cobrimento de 2 cm uma vez que, a armadura era inserida e mantida fixa por meio de orifícios na parte superior da peça, conforme Figura 34 (a). O cobrimento de 2 cm é o mínimo cobrimento nominal permitido na NBR 6118 (ABNT, 2014).

Depois de moldados, todos os corpos de prova permaneceram em cura por 24h no local de moldagem, como recomenda a NBR 5738 (ABNT, 2003)<sup>2</sup>. Em seguida foram colocados em processo de cura saturada em cal, de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007), até atingirem a idade de 28 dias. Tomou-se o cuidado de proteger as armaduras expostas com esmalte sintético antes de coloca-los em cura saturada, como na Figura 34 (b).

Figura 34 –(a) Forma em madeira para a moldagem de corpos de prova prismáticos, (b) corpo de prova após desforma, preparado para o processo de cura submersa.



Fonte: produção da autora.

<sup>2</sup> ANBR 5738 (ABNT, 2003) foi atualizada no ano de 2015, entretanto, as moldagens realizadas neste trabalho foram anteriores a esta atualização.

### 3.4 MATERIAIS

Os materiais utilizados para confecção dos concretos foram adquiridos na região da Grande Vitória, ES. Entre eles estão: agregado miúdo, agregado graúdo, resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO), Cimento Portland e armadura. Todos os procedimentos de caracterização física desses materiais foram realizados no Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção Civil da Universidade Federal do Espírito Santo – LEMAC/UFES.

#### 3.4.1 Água de amassamento

Foi utilizada a água em condições de potabilidade fornecida pela rede de abastecimento público.

#### 3.4.2 Agregados

Neste trabalho foram utilizados agregados minerais naturais, ambos (areia e brita) foram colocados para secagem ao ar em ambiente protegido de intempéries para a remoção de umidade.

##### 3.4.2.1 Agregado Miúdo

A areia natural quartzosa, extraída de jazida e utilizada na produção dos concretos foi proveniente de uma só origem. A caracterização física do agregado miúdo é composta de dimensão máxima característica, módulo de finura, massa específica, massa unitária, material pulverulento, impurezas orgânicas, teor de argila e materiais friáveis, com respectivas normas, conforme Tabela 12.

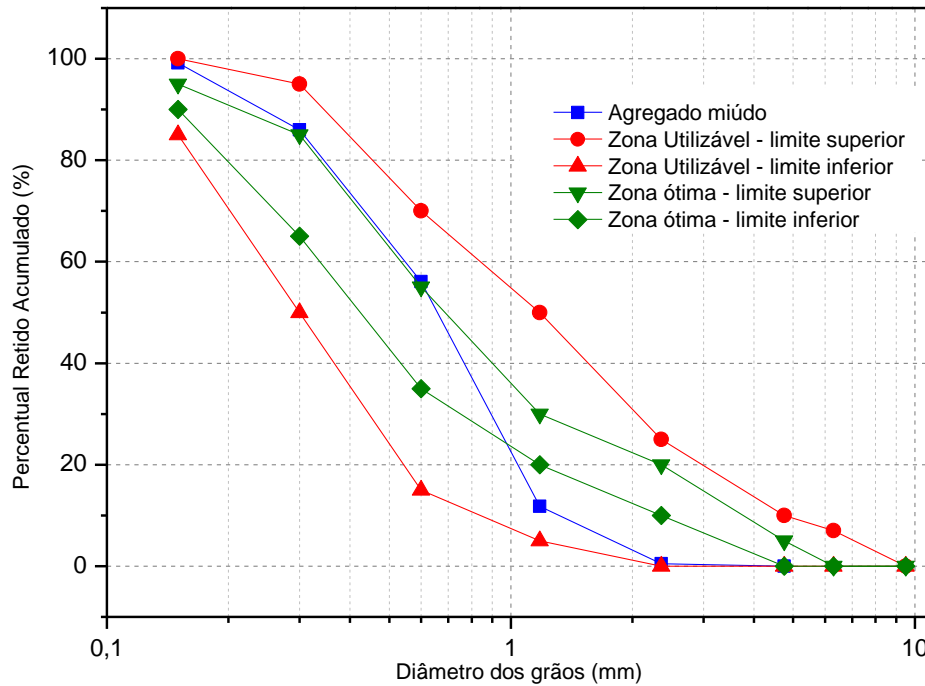
Tabela 12 - Propriedades físicas do agregado miúdo.

PROPRIEDADES	MÉTODO DE ENSAIO	RESULTADO
Dimensão máxima característica (mm)	NBR NM 248 (ABNT, 2009)	2,36
Módulo de Finura	NBR NM 248 (ABNT, 2009)	2,53
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 52 (ABNT, 2009)	2,64
Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1,42
Material Pulverulento (%)	NBR NM 46 (ABNT, 2003)	0,91
Impurezas Orgânicas	NBR NM 49 (ABNT, 2001)	Amostra mais clara
Teor de Argila e Materiais Friáveis(%)	NBR 7218 (ABNT, 2010)	0,09

Fonte - Produção da autora.

A Figura 35 apresenta a composição granulométrica do agregado miúdo, determinada segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003). O agregado utilizado nesta pesquisa atende aos requisitos exigidos na norma NBR 7211 (ABNT, 2009) estando dentro da zona utilizável.

Figura 35 – Composição granulométrica do agregado miúdo.



Fonte: Produção da autora.

### 3.4.2.2 Agregado Graúdo

O agregado graúdo foi produzido a partir da britagem de rochas graníticas e procedente de uma só origem. O material foi lavado para remoção de impurezas antes de ser colocado para secagem ao ar, posteriormente foi estocado em tambores plásticos. Na Tabela 13 estão detalhados os ensaios executados para a caracterização física do agregado graúdo.

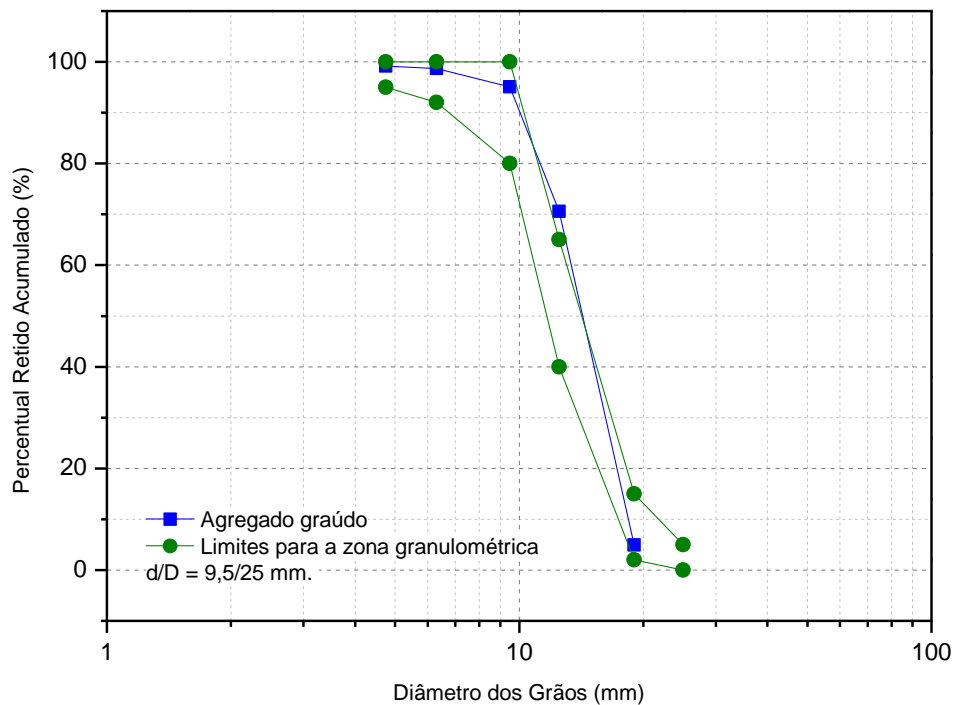
Tabela 13 - Propriedades físicas do agregado graúdo.

PROPRIEDADES	MÉTODO DE ENSAIO	RESULTADO
Dimensão máxima característica (mm)	NBR NM 248 (ABNT, 2009)	19
Módulo de Finura	NBR NM 248 (ABNT, 2009)	3,68
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 53 (ABNT, 2009)	2,76
Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 45 (ABNT, 2003)	1,49
Absorção de água	NBR NM 53 (ABNT, 2003)	0,34

Fonte - Produção da autora.

A composição granulométrica do agregado graúdo foi determinada como específica a NBR NM 248 (ABNT, 2009). As pedras britadas utilizadas pertencem à zona granulométrica de 9,5/25, conforme a NBR 7211(ABNT, 2009), como ilustra a Figura 36.

Figura 36 – Composição granulométrica do agregado graúdo – zona granulométrica correspondente a  $d/D = 9,5/25$  ( $d$  = menor dimensão;  $D$  = maior dimensão).

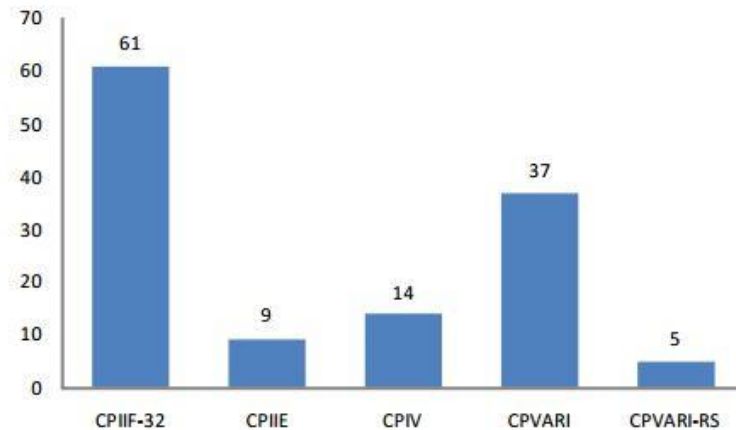


Fonte - Produção da autora.

### 3.4.3 Material Cimentício

Foi empregado na produção dos concretos o Cimento Portland de alta resistência inicial – CPV ARI – este cimento é constituído de 95 a 100% de clínquer e sulfatos de cálcio e de 0 a 5% de material carbonático. O CPV ARI foi escolhido por conter menor teor de adições ativas entre os disponíveis no mercado capixaba. Essa escolha buscou minimizar os fatores de ruído que podem interferir no processo, trabalhando com uma matriz cimentícia mais pura, já que este trabalho busca analisar a influência da adição mineral de RBRO nos concretos. De acordo com Torres (2011) o CPV- ARI é o segundo tipo de cimento mais utilizado em dissertações e teses nacionais que envolvem corrosão por cloretos em concreto armado, como pode ser visualizado na Figura 37.

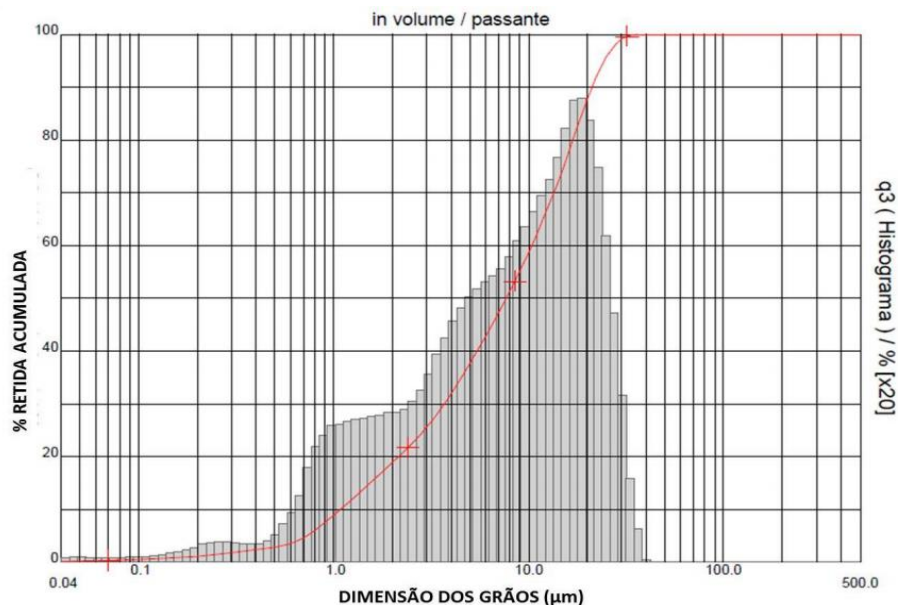
Figura 37 - Quantidade de estudos brasileiros coletados e mapeados por Torres (2001) sobre corrosão por ação de cloretos em função do tipo de cimento.



Fonte : Torres (2011).

O cimento empregado nesta pesquisa foi doado por empresa localizada no município da Serra – ES. Depois de recebido, o produto foi guardado em sacolas plásticas fechadas e empilhado sem contato direto com o chão, em *pallets*, dentro da câmara seca do LEMAC-UFES. Sua caracterização física foi feita no mesmo laboratório, a distribuição granulométrica foi realizada no Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização e Materiais (LDCM) de Santa Catarina por meio de granulômetro à laser modelo 1064 – CILAS. A curva de distribuição granulométrica é apresentada na Figura 38. Pode ser afirmado que 50% dos grãos de cimento tem diâmetro inferior a 7,68  $\mu\text{m}$  e 100% está abaixo de 36,00  $\mu\text{m}$ .

Figura 38- Distribuição Granulométrica do cimento CPV ARI.



Fonte: Uliana, 2013.

A caracterização química do cimento CPV ARI foi cedida pelo fabricante, suas propriedades podem ser vistas na Tabela 14.

Tabela 14 - Caracterização física e química do cimento CPVARI.

PROPRIEDADE	RESULTADO	MÉTODO DE ENSAIO	LIMITE
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,823	NBR NM 23 (ABNT, 2001)	N.E.
Finura	Área específica - Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	NBR NM 76 (ABNT, 1998)	≥ 3000
	Material retido na peneira 200(%)	NBR 9202 (ABNT, 1985)	N.E.
Tempos de Pega	Início de Pega (min)	NBR NM 65 (ABNT, 2003)	≥ 60
	Fim de Pega (min)	NBR NM 65 (ABNT, 2003)	≤ 600
Resistência à Compressão	1 dia (MPa)	NBR 7215 (ABNT, 1997)	≥ 14
	3 dias (MPa)	NBR 7215 (ABNT, 1997)	≥ 24
	7 dias (MPa)	NBR 7215 (ABNT, 1997)	≥ 34
Composição Química	Perda ao fogo (%)	NBR NM 18 (ABNT, 2001)	≤ 4,5
	SiO <sub>2</sub> (%)	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	CaO (%)	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	MgO (%)	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	K <sub>2</sub> O (%)	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	SO <sub>3</sub> (%)	NBR 14656 (ABNT, 2001)	≤ 4,5
	C <sub>3</sub> A teórico	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	Resíduo Insolúvel - RI(%)	0,75	NBR NM 15 (ABNT, 2012)

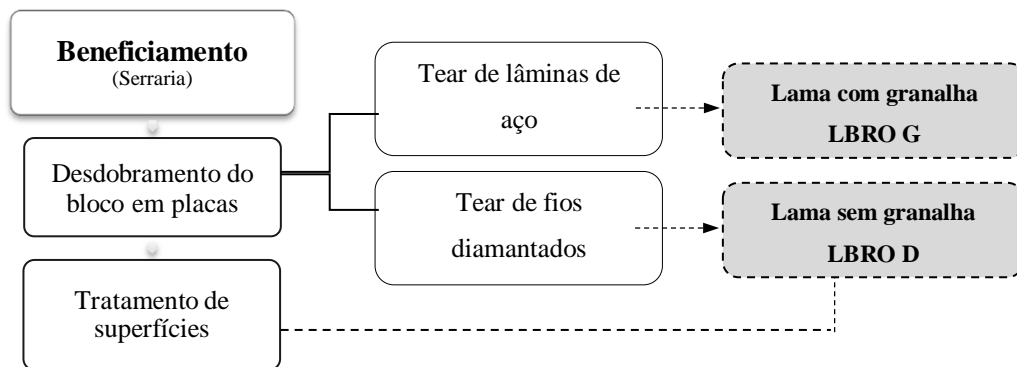
Obs.: Limites estabelecidos com base na NBR 5733(ABNT,1991); N.E. = Não estabelecido.

Fonte: Uliana (2013).

### 3.4.4 Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO)

A lama residual oriunda do beneficiamento de rochas ornamentais foi doada ao LEMAC - UFES por serraria situada no município da Serra, ES. A empresa doadora utiliza dois tipos de teares para o desdobramento dos blocos, os teares de fios diamantados e os teares de lâminas de aço. Após sua utilização nos teares a lama é direcionada para um filtro-prensa e depois é depositada em baias. Os resíduos provenientes de teares distintos não são misturados, conforme Figura 39.

Figura 39 – Resíduos produzidos na etapa de desdobramento dos blocos



Fonte: Uliana (2013).

De acordo com Calmon e Silva (2006), no estado do Espírito Santo estavam em funcionamento 800 teares de lâminas de aço dos 1574 brasileiros, no ano de 2000. De acordo com Chiodi Filho (2014) em agosto do 2013, em virtude do esforço empresarial de modernização pela incorporação os teares de fios diamantados, foi superado o limite logístico da capacidade de exportação brasileira, 270 mil toneladas, exportando-se 300,2 mil toneladas de rochas.

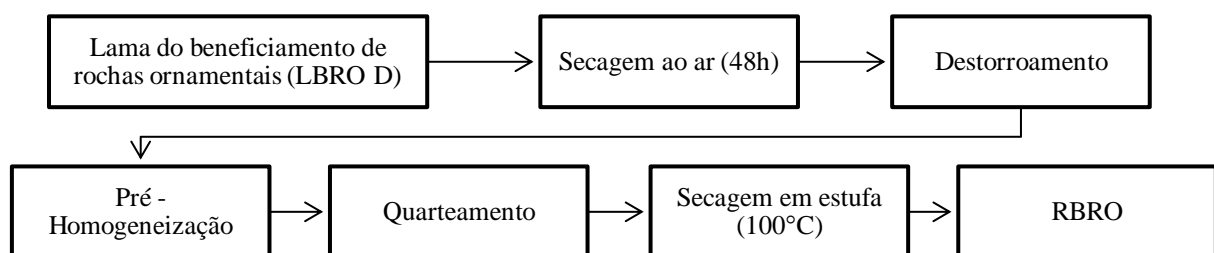
O Brasil tornou-se um dos principais importadores de tecnologia do setor de rochas. Chiodi Filho (2014) no Informe 13, afirma que o Brasil está atrás apenas da China e dos Estados Unidos na busca da modernização. Em levantamento realizado até o mês de setembro de 2014 concluiu-se que o parque de serragem brasileiro possui instalados cerca de 260 teares de fios diamantados, de tecnologia italiana e brasileira. Destaca-se, portanto, como o maior parque mundial de serragem com essa tecnologia. Por haver essa tendência da utilização de teares mais eficientes, este estudo fez uso do resíduo proveniente do tear de fios diamantados.



### 3.4.4.1 Tratamento da Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais

O resíduo utilizado nesta pesquisa foi entregue ao LEMAC ainda úmido, com a consistência de uma lama viscosa. Por esse motivo foi chamado de Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO) proveniente dos teares de fios diamantados. Para a obtenção do RBRO a LBRO foi colocada para secagem ao ar por 48 horas, foi destorroada e pré-homogeneizada. Após a pré-homogeneização o material foi quarteado para a extração de amostras, estas foram colocadas para secagem em estufa até constância de massa, conforme Figura 40.

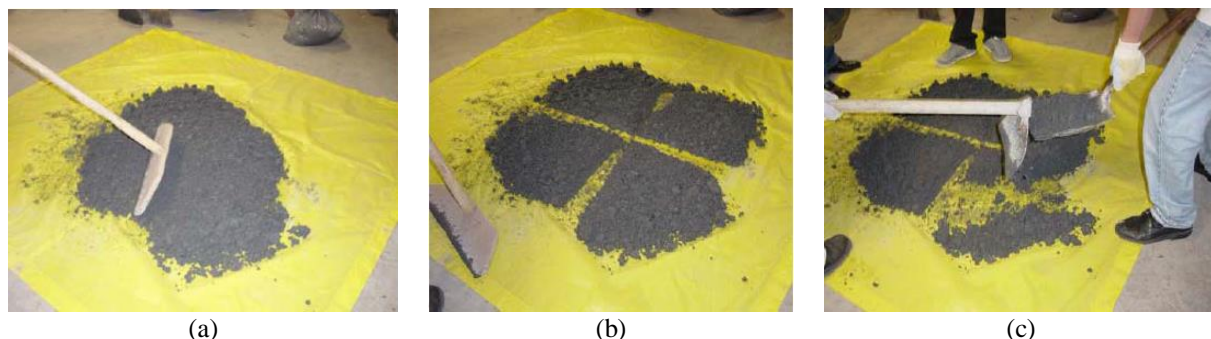
Figura 40 – Tratamento para a produção do resíduo RBRO a partir da Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO D).



Fonte: produção da autora.

O quarteamento é um processo de coleta de amostras sólidas já pré-homogeneizadas. O material é despejado sobre lona limpa, em superfície estável e plana, conforme Figura 41 (a), é dividido em quatro partes, conforme Figura 41 (b) e são descartadas duas partes opostas - Figura 41 (c). As partes que não foram descartadas são misturadas novamente, repetindo-se o processo de quarteamento até que seja obtido o volume desejado de material (ABNT NBR 10007, 2004).

Figura 41 – Procedimento para quarteamento (a) o material pré-homogeneizado é espalhado em local adequado, (b) é dividido em quatro partes aproximadamente iguais e (c) são descartadas duas partes opostas.



Fonte: Souza Filho (2005).

O LBRO foi destorroado em duas etapas devido ao grande volume de material. Na primeira delas foi utilizada uma betoneira para o destorroamento inicial – Figura 42 (a) (b) - e, em seguida, o material voltou à lona para que os torrões menores fossem desfeitos manualmente,

Figura 42 (c). Seguiu-se com a pré-homogeneização por meio de mistura do volume de resíduo, o mesmo foi revirado totalmente várias vezes, Figura 42 (d),(e).

Figura 42 – (a) LBRO após secagem ao ar; (b) destorroamento do material em betoneira, (c) preparação para destorroamento manual; (d).material sendo revirado; (e) resíduo homogeneizado, pronto para o quarteamento.



Fonte: produção da autora.

Após a pré-homogeneização o material foi quarteado e colocado, em pequenas quantidades, para secagem em estufa, por 24 horas, a 100°C. Ao final do processo o RBRO foi acondicionado em sacolas plásticas, como pode ser visto na Figura 43 (a) e colocado em câmara seca. A Figura 43 (b) mostra a aparência final do RBRO.

Figura 43 –(a) Amostras coletadas após quarteamento; (b) aparência final do RBRO.



(a)

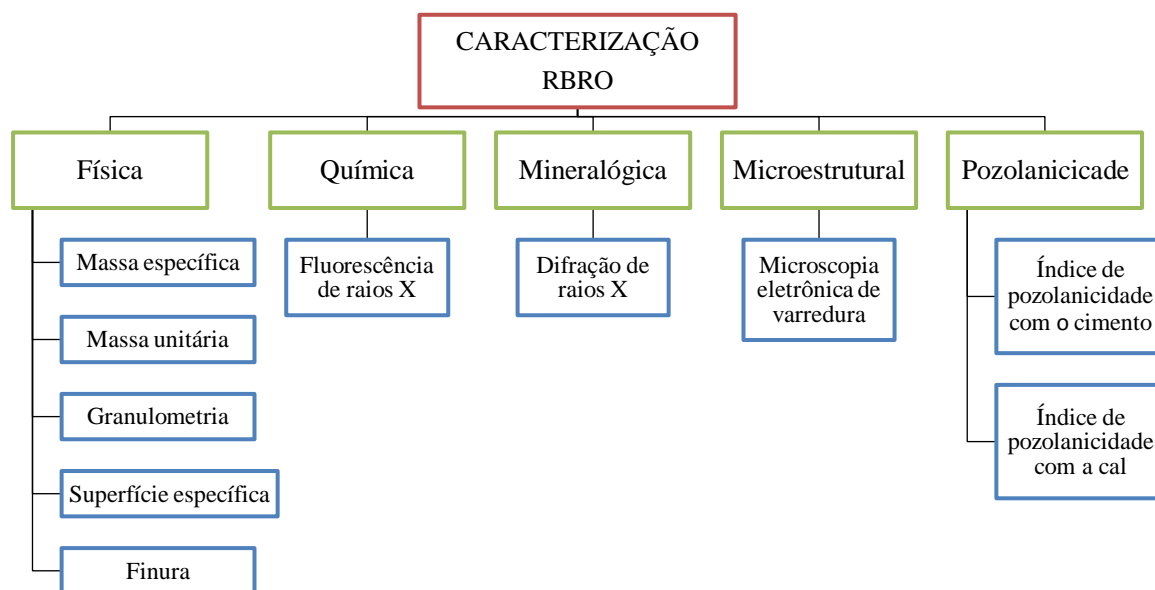
(b)

Fonte: produção da autora.

### 3.4.4.2 Caracterização do RBRO

A caracterização do RBRO foi conduzida por um grupo de pesquisa que trabalhou em conjunto na Universidade Federal do Espírito Santo para o estudo das potencialidades da aplicação do mesmo na produção de concretos e argamassas. Este item aborda os resultados de caracterização física, química, mineralógica, microestrutural e a análise de pozolanicidade do RBRO encontrados por Uliana (2013), conforme Figura 44. A autora estudou o potencial de aplicação do material em argamassas como substituto parcial do cimento. O resíduo foi ainda tratado termicamente com intenção de produzir um material com propriedades vítreas. Os resultados de Uliana (2013) foram também aproveitados por Soares (2014) que investigou a influência da incorporação do RBRO sobre propriedades de durabilidade do concreto relacionadas com a resistência a íons sulfato.

Figura 44 - Caracterização do resíduo RBRO.

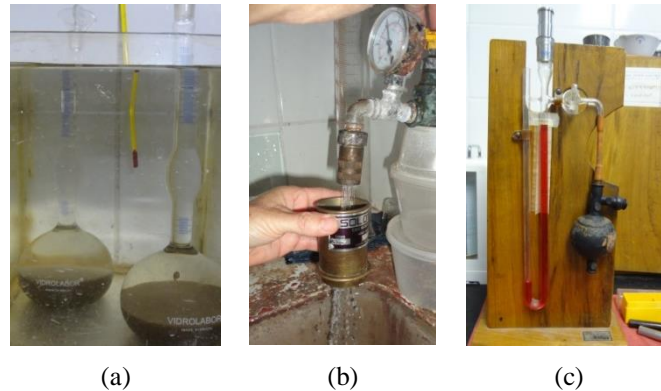


Fonte – Adaptado de Uliana (2013) e Soares (2014).

#### 3.4.4.2.1 Caracterização Física

A caracterização física do RBRO foi realizada no LEMAC – UFES. A massa específica do resíduo foi encontrada por meio do frasco de Le Chatelier, técnica aplicada a cimento Portland e outros materiais em pó, como mostra a Figura 45 (a). A análise da finura do material foi realizada pelo percentual retido nas peneiras n° 200 e n° 325, Figura 45 (b). A superfície específica foi determinada pelo método da permeabilidade de Blaine, conforme Figura 45 (c).

Figura 45 – Caracterização do RBRO: (a) massa específica (Le Chatelier); (b) finura por meio da peneira n°325 e (c) finura pelo método da permeabilidade de Blaine.



Fonte: Uliana (2014).

Os resultados da caracterização física estão descritos na Tabela 15.

Tabela 15– Caracterização física do RBRO.

NORMA	ENSAIO	RESULTADO	LIMITES
NBR NM 23 (ABNT, 2001)	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,5253	N.E
NBR NM 12127 (ABNT, 1991)	Massa Unitária (g/m <sup>3</sup> )	766,284	N.E
NBR NM 24 (ABNT, 2002)	Teor de Umidade inicial (%)	38,27	N.E
NBR NM 24 (ABNT, 2002)	Teor de Umidade para utilização na pesquisa (%)	0,04	≤ 3,0
NBR NM 76 (ABNT, 1998)	Área específica pelo Método de Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	6179,3	N.E.
NBR 11579 (ABNT, 2012)	Material retido na peneira n° 200 (%)	3,08	N.E.
NBR 9202 (ABNT, 1985)	Material retido na peneira n° 325 (%)	7,0	≤ 34

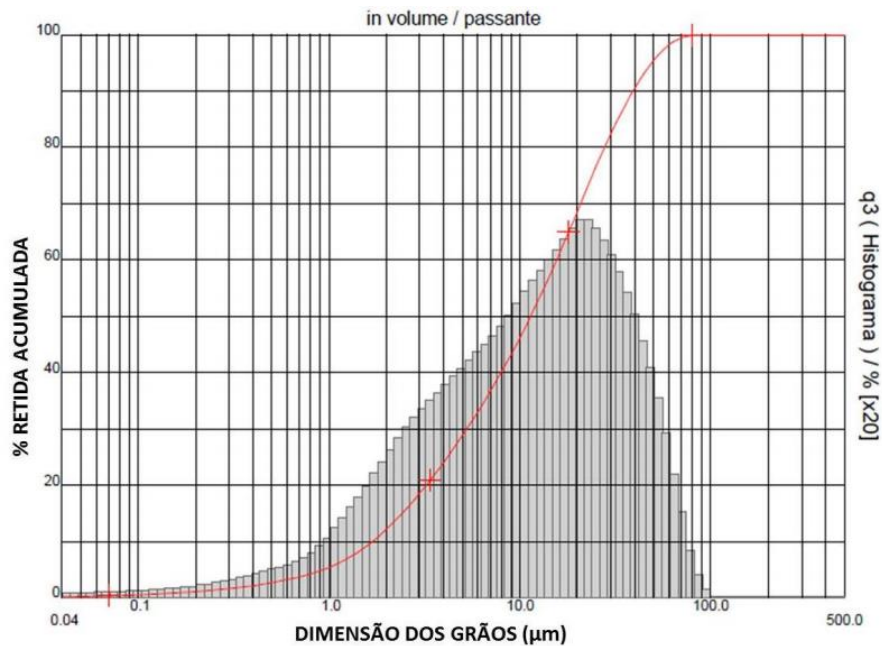
Fonte: Uliana (2013).

A área específica do RBRO (6,1793 m<sup>2</sup>/g) é maior que a do CPV ARI (4,459 m<sup>2</sup>/g), o que indica que o resíduo tem partículas menores do que as do cimento.

#### 3.4.4.2.2 Análise Granulométrica

A análise granulométrica do RBRO foi efetuada no Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais do SENAI de Criciúma, em Santa Catarina. Foi utilizado um aparelho granulômetro à laser da marca Sympatech, que permite a precisão necessária pela presença de grãos finos, menores que 0,075mm. A curva de distribuição granulométrica é apresentada pela Figura 46.

Figura 46 – Curva de distribuição granulométrica do RBRO.



Fonte: Uliana (2013).

A dimensão dos grãos equivalentes ao D10 (diâmetro abaixo do qual se situam 10 % das partículas) está na ordem de 1,7µm, D50 na ordem de 11,0 µm e D90 na ordem de 40µm. De acordo com Gonçalves (2000) o agregado fino geralmente tem diâmetro médio entre 50 e 150 µm e preenche os vazios deixados pela descontinuidade do agregado miúdo. A adição com potencial efeito fíler, por sua vez, tem diâmetro médio menor que 50 µm e atua no preenchimento dos poros deixados pelos produtos de hidratação do cimento. Portanto, o RBRO é um material pulverulento, mais fino que o cimento, que pode ter efeito fíler em matrizes cimentícias.

#### 3.4.4.2.3 Caracterização Química

A caracterização química do RBRO foi elaborada por meio da técnica de espectrometria por fluorescência de raios X (FRX) pelo Laboratório Químico e de Monitoramento Ambiental da empresa Vale. Nessa técnica a absorção dos raios emitidos ocasiona a excitação dos átomos do material estudado que, por sua vez, produz uma radiação conhecida por fluorescência. Essa radiação viabiliza a identificação de cada componente químico em função do comprimento de onda dos raios emitidos.

O RBRO é composto predominantemente por quartzo sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e por feldspato alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) sendo, portanto, um material sílico-aluminoso. Os resultados da caracterização química podem ser vistos na Tabela 16.

Tabela 16 – Composição química do RBRO.

PROPRIEDADES	RBRO	LIMITES	
Perda ao fogo – PF(%)	3,5	≤ 6,0	
Composição Química	SiO <sub>2</sub> (%)	66,80	N.E.
	CaO (%)	3,44	N.E.
	MgO (%)	0,93	N.E.
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	13,50	N.E.
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3,79	N.E.
	K <sub>2</sub> O (%)	3,83	N.E.
	Na <sub>2</sub> O (%)	3,50	N.E.
	C (%)	1,11	N.E.
	TiO <sub>2</sub> (%)	0,16	N.E.
	SO <sub>3</sub> (%)	0,06	N.E.
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	85,08	N.E.	

Obs.: Limites estabelecidos com base nos dados da Classe E de pozolanas descritos na NBR 12653 (ABNT, 2014). N.E.: Não Estabelecido.

Fonte: produção da autora.

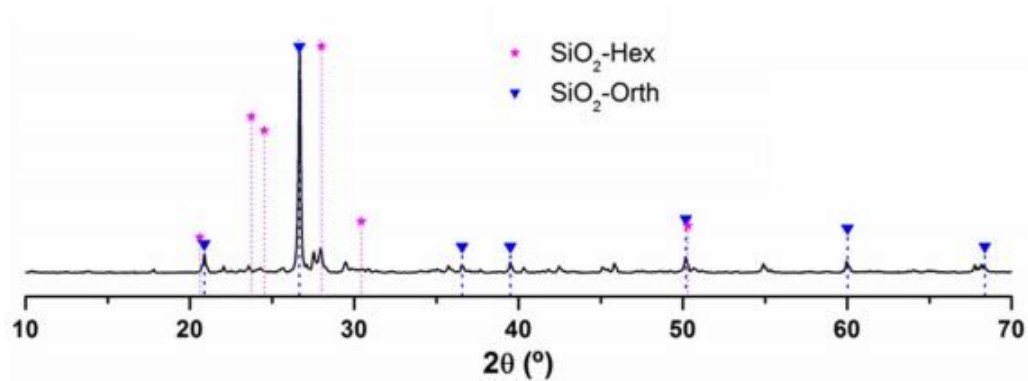
#### 3.4.4.2.4 Caracterização mineralógica

A caracterização mineralógica do RBRO foi feita por meio da difração de raios X, técnica mais indicada para a determinação das fases cristalinas presentes nos materiais. De acordo com Calmon (2010) os difratogramas realizados com o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais coletados no estado do Espírito Santo apresentam como componentes mineralógicos predominantes o quartzo, o feldspato e as micas na forma cristalina. Essa característica indica o resíduo não possui propriedades aglomerantes ou pozolânicas.

O difratômetro utilizado foi o XRD 6000 da marca Shimadzu no Laboratório de Materiais Carbonosos e Plasmas Térmicos (LMC/LPT) do Centro de Ciências Exatas (CCE) da UFES. Empregou-se de radiação CuK $\alpha$ , com 40kV de tensão e 30mA de corrente no tubo e varredura entre 10° e 80°. A escala horizontal (ângulo de difração) fornece o espaçamento do arranjo cristalino, a escala vertical (altura do pico) indica a intensidade do raio.

O difratograma de raios X do RBRO é apresentado por meio da Figura 47. É possível visualizar picos definidos, ou compostos cristalinos estáveis de sílica (SiO<sub>2</sub>), com baixa possibilidade de atividade reativa.

Figura 47 – Difratoograma de raios X do RBRO.



Fonte: Uliana (2013).

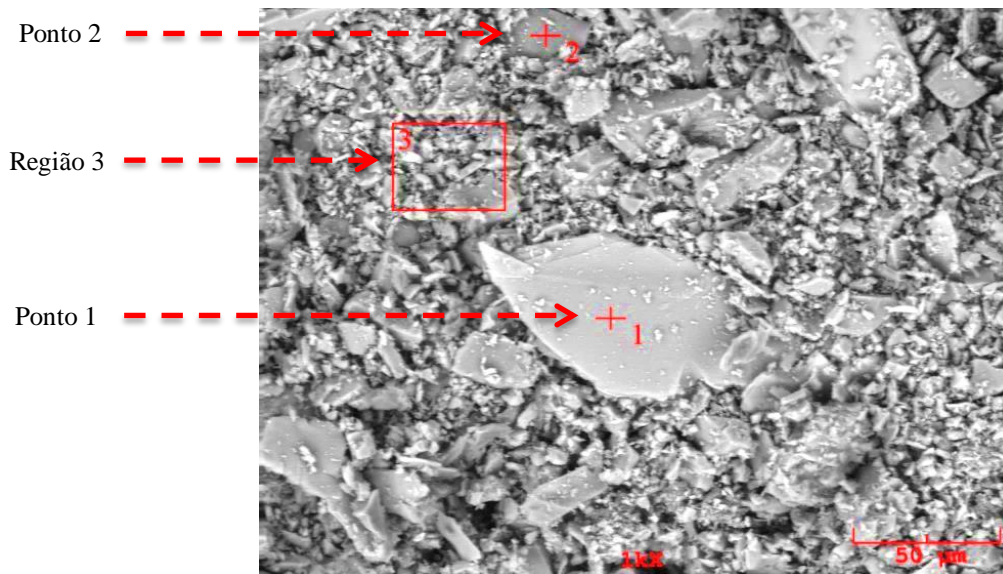
#### 3.4.4.2.5 Caracterização por imagem

Por meio de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) são geradas imagens microscópicas nas quais é possível visualizar a forma e tamanho dos grãos. A análise fornece informações estruturais e químicas de amostras variadas produzindo imagens com aparência tridimensional. Ao microscópio eletrônico de varredura pode ser acoplado o sistema EDS (espectroscopia por energia dispersiva) e fornece a composição qualitativa (elementos presentes) e semiquantitativa das amostras (DAL MOLIN, 2010).

Para a produção de micrografias do RBRO foram utilizados os equipamentos do Laboratório de Caracterização de Superfícies dos Materiais (LCSM - UFES) e o equipamento Shimadzu do Laboratório de Materiais Carbonosos e Plasmas Térmicos (LMC/LPT - UFES).

A Figura 48 apresenta a micrografia do resíduo na qual é possível identificar que o RBRO possui grãos de forma indefinida e angulosa. De acordo com Soares (2014), as dimensões do RBRO variam de 0,8 a 25  $\mu\text{m}$  e alguns grãos maiores de, aproximadamente, 60  $\mu\text{m}$ .

Figura 48 – Micrografia do RBRO com pontos analisados por EDS, ampliação 1000 vezes.



Fonte: Uliana (2013).

A Tabela 17 apresenta o resultado da análise química por espectroscopia por energia dispersiva (EDS) dos pontos especificados na micrografia. O resíduo é constituído principalmente de silício (Si), alumínio (Al) e potássio (K), comprovando a espectrometria de raios X que indicou o resíduo como sendo sílico-aluminoso.

Tabela 17 – Resultado da análise química do EDS para o RBRO.

	O	Mg	Al	Si	S	K	Ti	Fe
Ponto 1	23,551	4,86	13,48	30,124	0,31	10,382	2,605	13,236
Ponto 2	43,946	0,435	19,166	26,364	0,215	6,722	0,113	1,316
Região 3	37,817	0,667	6,971	43,802	0,236	2,742	0,193	0,585

Fonte: Uliana (2013).

#### 3.4.4.2.6 Atividade Pozolânica

A NBR 12653 (ABNT, 2012) define como pozolana um material sílico ou sílico-aluminoso que sozinho possui pouco ou nenhuma propriedade cimentícia. Contudo, em temperatura ambiente e na presença de umidade, pode reagir com o hidróxido de cálcio formando compostos com propriedades cimentantes.

Embora os resultados da caracterização mineralógica do RBRO apontem a ausência de atividade pozolânica, o RBRO atende aos requisitos químicos e à finura exigida pela NBR 12653 (ABNT, 2012) para a classe E de pozolanas. Portanto, Soares (2014) investigou a



atividade pozolânica do RBRO com a cal CHI, conforme NBR 5751 (ABNT, 1992), e com cimento, conforme NBR 5752 (ABNT, 1992).

Foram produzidos três corpos de prova de uma argamassa com 35% de substituição do aglomerante pelo RBRO e três de referência. Foi utilizada areia padrão beneficiada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) nas frações 1,2; 0,6; 0,3 e 0,15 mm, água fornecida pela concessionária pública de abastecimento e em quantidade suficiente para obtenção de um índice de consistência da argamassa em  $225 \pm 5$  mm, conforme a NBR 7215 – Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão (ABNT, 1997). Soares (2014) constatou que o RBRO não se enquadra nos requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2012) em seus aspectos da verificação da pozolanicidade em argamassas, tanto com cal como com cimento. A Tabela 18 apresenta o resultado dos ensaios de pozolanicidade.

Tabela 18 – Resultados do ensaio de pozolanicidade do RBRO com cal e com cimento.

PROPRIEDADES		RBRO	LIMITES
Índice de atividade pozolânica	Com a cal (MPa)	3,17	$\geq 6,0$
	Com o cimento (%)	63,9	$\geq 75$
	Água requerida em IAP-cim (%)	103,3	$\leq 110$

OBS: Limites estabelecidos com base nos dados da Classe E de pozolanas de acordo com a NBR 12653: Materiais pozolânicos – Requisitos (ABNT, 2012).

Fonte: Soares (2014).

### 3.4.5 Armaduras

Para que fossem conduzidos os ensaios de durabilidade, foram embutidas armaduras nos corpos de prova prismáticos de concreto. Cada corpo de prova foi moldado com duas barras de aço CA-50, de diâmetro nominal de 6,3 mm e comprimento de 16,5 cm. Em seu trabalho, Vieira (2003) fez a limpeza das barras de aço em solução de ácido clorídrico e água deionizada na proporção de 1:1 para que fosse neutralizada a possibilidade de serem utilizadas barras com oxidação inicial. Moraes (2008) também submeteu as barras a uma limpeza com a mesma solução acrescentando-se hexametilenotetramina (3,5g/l) conforme ASTM G1 (ASTM, 2011), conforme. Neste trabalho foi utilizado o mesmo procedimento de Moraes (2008) para a remoção dos óxidos, conforme segue:

- Imersão das barras em solução de ácido clorídrico 1:1 com 3,5g/l de hexametilenotetramina, durante 15 minutos, conforme Figura 49 (a) e (b). A norma

ASTM G1 (ASTM, 2011) indica a imersão por 10 minutos, podendo ser necessário mais tempo em casos especiais;

- Lavagem em água corrente e escovação das barras com escova de cerdas plásticas;
- Imersão em acetona, por 2 minutos, para a retirada de elementos gordurosos;
- Secagem com jato de ar quente.

Figura 49 - Limpeza das barras de aço em solução de ácido clorídrico na concentração de 1:1 e 3,5 g de hexametilenotetramina, por um período de 15 minutos



(a)

(b)

Fonte: Ferreira (2003).

Após o procedimento de limpeza e secagem das barras (Figura 50 (a)) suas massas foram aferidas por balança de alta precisão, com resolução de 0,0001g, conforme Figura 50 (b). Logo após, as mesmas foram identificadas com papel adesivo, Figura 50 (c). O processo foi feito imediatamente antes da moldagem dos corpos de prova de concreto. Após os ciclos de indução e aceleração da corrosão e ensaio colorimétrico por indicador químico  $\text{AgNO}_3$  as barras passaram pelo mesmo processo de limpeza para investigação da perda de massa.

Figura 50 – (a) Barras após secagem com jato de ar quente, (b) aferição das massas em balança de alta precisão e (c) barras identificadas.



(a)

(b)

(c)

Fonte: produção da autora.

### 3.5 MÉTODOS E PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS

A dosagem dos concretos, as moldagens dos corpos de prova, os ensaios em concreto fresco e endurecido (resistência à compressão axial) e os ensaios de durabilidade contidos neste programa experimental foram realizados no laboratório LEMAC - UFES.

#### 3.5.1 Dosagem Experimental dos Concretos

Para determinar os traços de concreto que seriam utilizados neste estudo foi aplicado o método IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992). O método relaciona resistência à compressão, relação água/ cimento, traço e consumo de cimento em um diagrama de dosagem que segue três leis de comportamento, as equações (4) Lei de Abrans, (5) Lei de Lyse e (6) lei de Molinari.

$$f_{cj} = \frac{k_1}{k_2^{(a/c)}} \quad (4)$$

$$m = k_3 + k_4 a/c \quad (5)$$

$$C = \frac{1000}{k_5 + k_6 m} \quad (6)$$

Onde:

$f_{cj}$  = resistência à compressão axial à idade j, em MPa;

$a/c$  = relação água /cimento, em kg/kg;

$m$  = relação agregados secos/ cimento em massa, em kg/kg;

$C$  = consumo de cimento por metro cúbico de concreto adensado, em kg/m<sup>3</sup>;

$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$  = constantes que dependem dos materiais (cimento, agregados, aditivos, entre outros).

##### 3.5.1.1 Teor ideal de argamassa

Antes do estudo do teor ideal de argamassa é estabelecido um abatimento adequado à finalidade do concreto. O ensaio de abatimento de tronco de cone é executado conforme a NBR NM 67 (ABNT,1998) e faz parte do processo de avaliação do teor de argamassa do concreto. De acordo com Helene e Terzian (1992) o diagrama de dosagem necessita de três

pontos, ou seja, três traços distintos de concreto - um rico em cimento, um pobre e um intermediário. Inicia-se o estudo com o traço intermediário, no qual é utilizada a proporção de 1 : 5,0, em massa, de cimento e agregados secos totais. É fixada uma quantidade de agregado graúdo e chega-se, por meio de acréscimos sucessivos de materiais, ao teor ideal de argamassa. Antes de moldar o primeiro traço a betoneira é imprimada, ou seja, espalha-se uma mistura de argamassa na superfície interna do equipamento para que não ocorra perda de materiais do traço em questão. O excesso de material de imprimação é descartado.

Na Tabela 19 estão discriminados os acréscimos de cada material componente da argamassa utilizados para aumentar o teor da mesma.

Tabela 19- Determinação do teor ideal de argamassa para o traço intermediário (1:5,0).

TEOR DE ARGAMASSA (%)	TRAÇO UNITÁRIO (1 : a : p)			BRITA (kg)	CIMENTO (kg)		AREIA (kg)		ÁGUA (kg)		RELAÇÃO A/C FINAL
	c	a	p		Total	Acrésc.	Total	Acrésc.	Total	Acrésc.	
50	1	2,00	3,00	40,0	13,33	0,27	26,67	1,36	7,00	0,50	0,52
51	1	2,06	2,94		13,60	0,28	28,03	1,42	7,50	0,35	0,55
52	1	2,12	2,88		13,88	0,30	29,44	1,48	7,85	0,35	0,56
53	1	2,18	2,82		14,18	-	30,92	-	8,20	-	0,58

Obs.: Acrésc. = acréscimo.

Fonte: produção da autora.

O cimento e a areia são previamente pesados e separados nas porções para a dosagem do concreto, como mostra a Figura 51.

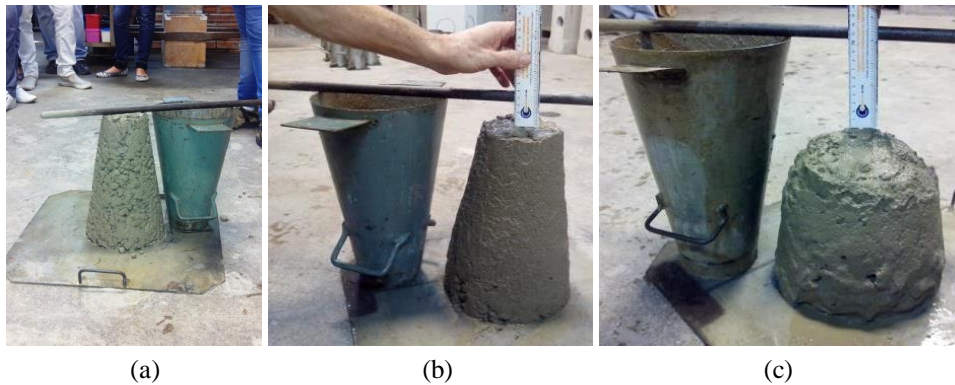
Figura 51 – Cimento CPV ARI e agregado miúdo pesados e separados para a dosagem do concreto.



Fonte: produção da autora.

A cada acréscimo de argamassa o abatimento de tronco de cone é medido, conforme Figura 52 (a), (b) e (c). abatimento de concreto fresco, esta pesquisa foi almejado o abatimento de  $70 \pm 10$  mm, executado conforme a NBR NM 67 (ABNT,1998).

Figura 52 - Abatimento de tronco de cone sofre alteração a medida que se aumenta o teor de argamassa (a) 0,0 mm, (b) de 30 mm e (c) 100 mm.

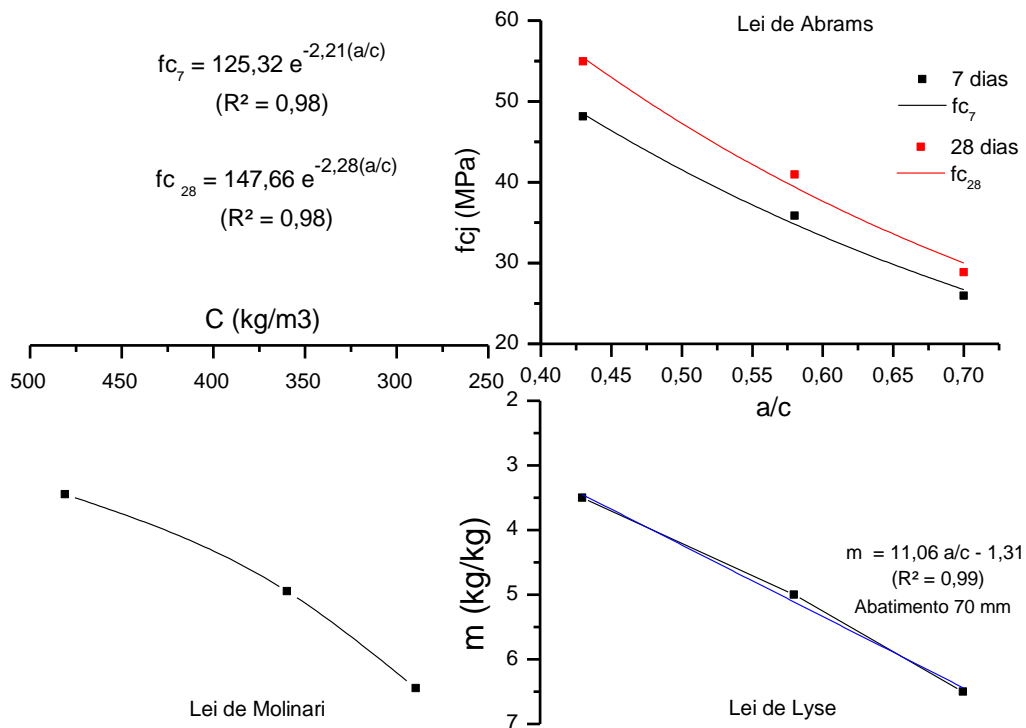


Fonte: produção da autora.

Devido à experiência da equipe do LEMAC-UFES com dosagem de concretos, este estudo teve início com o teor de argamassa de 50% e o teor ideal foi definido em 52%.

Foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos de concreto (10 cm de diâmetro e 20 cm de altura) para que fossem ensaiados em sua propriedade de resistência à compressão axial conforme norma NBR 5739 (ABNT, 2007) nas idades de 7 e 28 dias. Com os resultados foi montado o diagrama da Figura 53, que exhibe de forma prática o comportamento do concreto produzido com cimento Portland CP VARI para o abatimento de 70 mm ±10 mm.

Figura 53 - Diagrama de dosagem do concreto produzido com cimento CPV ARI para abatimento de 70 mm.



Fonte: produção da autora.

### 3.5.1.2 Definição dos traços de concreto

Após montagem do diagrama de dosagem definiu-se os traços unitários para cada relação água/cimento previstos, como exhibe a Tabela 20. A mesma tabela mostra a codificação criada com o intuito de tornar simples a identificação das diferentes famílias de concretos estudadas.

Tabela 20 – Códigos e traços unitários em massa dos concretos produzidos.

CÓDIGO	CIMENTO	AREIA	BRITA	RBRO	RELAÇÃO A/C	CONSUMO DE CIMENTO REAL (kg/m <sup>3</sup> )
<b>REFERÊNCIA</b>						
CREF 45	1	1,46	2,18	-	0,45	465,66
CREF 55	1	2,06	2,72	-	0,55	374,47
CREF 65	1	2,67	3,25	-	0,65	313,13
<b>5% RBRO</b>						
CR5 45	1	1,46	2,18	0,044	0,45	465,66
CR5 55	1	2,06	2,72	0,044	0,55	374,47
CR5 65	1	2,67	3,25	0,044	0,65	313,13
<b>10% RBRO</b>						
CR10 45	1	1,46	2,18	0,089	0,45	465,66
CR10 55	1	2,06	2,72	0,089	0,55	374,47
CR10 65	1	2,67	3,25	0,089	0,65	313,13
<b>15% RBRO</b>						
CR15 45	1	1,46	2,18	0,133	0,45	465,66
CR15 55	1	2,06	2,72	0,133	0,55	374,47
CR15 65	1	2,67	3,25	0,133	0,65	313,13

Fonte: produção da autora.

Os percentuais de adição assumiram os valores de 5, 10 e 15% em relação à massa de cimento, todavia, os teores no traço em massa assumiram valores distintos para que as misturas permanecessem sem alteração de volume devido à diferença entre as massas específicas do RBRO e do cimento. Foi necessário um ajuste realizado a partir da razão entre a massa específica do RBRO e a massa específica do cimento, que obedeceu a equação (7):

$$Q_{RBRO} = p \cdot Q_C \cdot \frac{\rho_{RBRO}}{\rho_C} \quad (7)$$

Onde

$Q_{RBRO}$  : quantidade de RBRO;

$p$  : é o percentual padrão de substituição;

$Q_C$  : é a quantidade de cimento;

$\rho_{RBRO}$  e  $\rho_C$ : massas específicas do RBRO e do CP V ARI, respectivamente.

### 3.5.2 Concreto no estado fresco

Foram analisadas duas características importantes do concreto em suas idades iniciais, seu abatimento e sua massa específica.

#### 3.5.2.1 Consistência do concreto

A consistência dos concretos foi avaliada por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone, conforme NBR NM 67 (ABNT, 1998). Foi especificado o abatimento de  $70 \pm 10$  mm para que a mistura tivesse trabalhabilidade adequada para a moldagem dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos. O ensaio foi executado pelo mesmo operador para todas as famílias de concreto produzidas.

#### 3.5.2.2 Massa Específica

A massa específica é definida por Mehta e Monteiro (2008) como massa do material por unidade de volume, incluindo os poros internos. Para o registro da massa específica dos concretos em seu estado fresco foram moldados dois corpos de prova, conforme NBR 5738 (ABNT, 2008), para cada concreto estudado. Foram escolhidas duas fôrmas metálicas cilíndricas de volumes e pesos conhecidos que, depois de preenchidas com concreto, foram novamente pesadas conforme NBR 9833 (ABNT, 2009). Com esse procedimento identifica-se a massa específica da mistura a partir da equação 8.

$$\gamma_c = \frac{M_{forma+concreto} - M_{forma}}{V_{forma}} \quad (8)$$

Onde:

$\gamma_c$ : massa específica do concreto fresco;

$M_{forma+concreto}$  : massa da forma preenchida com concreto,

$M_{forma}$  : massa da forma;

$V_{forma}$ : volume da forma.

### 3.5.3 Concreto no estado endurecido

A caracterização do concreto no estado endurecido foi efetuada por meio da determinação da resistência à compressão axial na idade de 28 dias.

#### 3.5.3.1 Resistência à compressão axial

Foram produzidos 6 corpos de prova cilíndricos para cada família de concreto, num total de 72 corpos de prova da matriz completa. A matriz de repetição foi composta de 36, ao final havia 108 corpos de prova a serem ensaiados para as duas matrizes. O ensaio foi executado conforme a norma NBR 5739 (ABNT, 2007). Os corpos de prova foram retificados para que a distribuição da força aplicada fosse uniforme na área transversal do mesmo. O valor da força axial aplicada necessária para romper o corpo de prova foi convertida em tensão ( $\sigma$ ) e expressa em MPa.

### 3.5.4 Ensaios de Durabilidade

De acordo com Andrade *et al.* (2013) a penetração de cloretos ao concreto pode ser estudada por três formas distintas: por meio de imersão em solução rica em NaCl, em que os cloretos penetram naturalmente por difusão; por meio de ensaios de migração em que uma queda de tensão é aplicada por meio de dois eletrodos em corpo de prova em contato com a solução; e por testes de resistividade nos quais não há necessidade de haver uma solução rica em cloretos em contato com os corpos de prova.

Neste trabalho a avaliação dos concretos perante a ação dos íons cloreto foi feita por meio de ciclos de indução e aceleração da corrosão em solução rica em , monitoramento eletroquímico por meio da técnica do potencial de corrosão e o ensaio colorimétrico por aspensão do indicador químico nitrato de prata. Também foram conduzidos os ensaios de absorção de água por imersão e fervura e por capilaridade, executados na idade de 28 dias.

#### 3.5.4.1 Absorção de água por imersão e fervura

Foram preparados 3 corpos de prova cilíndricos para cada percentual de adição de RBRO em cada nível de relação água/cimento, conforme NBR 9778 (ABNT, 2005), totalizando 36 corpos de prova para o ensaio de absorção de água e índice de vazios.

O ensaio consiste em colocar os corpos de prova em estufa à temperatura de  $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$  por 72 horas para determinação e registro das massas secas ( $m_s$ ). Em seguida mesmos são levados



até a câmara úmida para saturação ficando imersos em recipiente com água a  $(23\pm 2)$  °C por mais 72 horas. Completada esta etapa, os corpos de prova são levados a um recipiente cheio de água o qual é levado progressivamente à ebulição por 5h, conforme Figura 54 (a) e (b). Ao final os corpos de prova devem ser enxugados com pano úmido para a determinação das massas saturadas ( $m_{sat}$ ) e massas imersas ( $m_i$ ) com auxílio de balança hidrostática.

Figura 54 – (a) Recipiente para manter a ebulição e (b) corpos de prova durante o processo de ebulição.



Fonte: produção da autora.

#### 3.5.4.2 Absorção de água por capilaridade

Foram preparados para o ensaio de absorção de água por capilaridade 3 corpos de prova cilíndricos para cada traço desta pesquisa, totalizando 36 corpos de prova. O ensaio foi efetuado conforme a norma NBR 9779 (ABNT, 2012). Determina-se a massa do corpo de prova ao ar em temperatura de  $(23 \pm 2)$ °C, depois os mesmos são levados à estufa à temperatura de  $(105 \pm 5)$ °C até constância de massa para determinação da massa seca ( $m_s$ ). Em seguida os corpos de prova são colocados sobre suportes em recipiente contendo uma quantidade de água capaz de molhá-los numa altura de  $5 \pm 1$  mm, medida a partir da base do corpo de prova, Figura 55 (a). São determinadas as massas saturadas ( $m_{sat}$ ) dos concretos após 3h, 6h, 24h e 48 horas de ensaio. Na última etapa do ensaio ocorre o rompimento dos corpos de prova por compressão diametral, conforme Figura 55 (b).

Figura 55 – (a) Corpos de prova em recipiente munido de suporte o qual garante o nível d'água de  $5 \pm 1$  mm acima de sua base; (b) corpos de prova após rompimento por compressão diametral.



(a)

(b)

Fonte: produção da autora.

### 3.5.4.3 Indução e aceleração da corrosão por ataque de cloretos

A indução e aceleração da corrosão por cloretos consistem basicamente em submeter os corpos de prova a ciclos semanais de imersão parcial em solução agressiva, rica em cloretos, e posterior secagem em estufa. A solução utilizada nesta pesquisa teve concentração de NaCl de 5% em massa. Buscou-se assemelhar-se à concentração de NaCl da água marinha, que varia de 3 a 4 % (DEBIEB *et al.*, 2010; HIGASHIYAMA *et al.*, 2012).

Foram moldados 24 corpos de prova para a matriz completa e 12 corpos de prova para a matriz de repetição, num total de 36 corpos de prova prismáticos de 7 x 15 x 15 cm. Por dois dias os concretos ficavam parcialmente imersos na solução agressiva dentro de caixas plásticas, como mostra a Figura 56 (a). Em seguida eram acondicionados em estufa ventilada a 50 °C por cinco dias, conforme Figura 56 (b). Os ciclos aconteceram até a despassivação das armaduras.

Figura 56 – Indução e aceleração da corrosão: (a) corpos de prova em imersão em solução rica em cloretos e (b) secagem em estufa ventilada.



(a)

(b)

Fonte: produção da autora.

#### 3.5.4.4 Potencial de Corrosão

O ensaio de Potencial de Corrosão é normalizado pela ASTM C-876: 1991 (ASTM, 2009). Trata-se de um procedimento não destrutivo e qualitativo para obtenção dos potenciais de corrosão em armaduras inseridas em concretos, fornece apenas a probabilidade de despassivação e de corrosão da armadura.

São detectadas nos eletrodos de trabalho – armaduras – as linhas de corrente que ocorrem quando há instalado o processo eletroquímico de corrosão. A presença dos íons cloreto na solução de poros do concreto reduz sua resistividade, tornando os valores de potencial de corrosão mais eletronegativos, o que se traduz na mudança do estado superficial das barras de aço de passivo para ativo. São necessários um multímetro de alta impedância, com resolução ao nível de milivolts; um eletrodo de referência; uma esponja de alta condutividade e conexões elétricas. É medida uma diferença de potencial (ddp) nos eletrodos de trabalho (armaduras) com relação a um eletrodo de referência uma vez que é inviável a medida do valor absoluto da ddp entre metal e o eletrólito (solução) (CASCUDO, 1997).

Os equipamentos utilizados para o ensaio são mostrados na Figura 57 (a) e (b).

Figura 57 – (a) equipamentos utilizados no ensaio de potencial de corrosão; (b) procedimento do ensaio.



Fonte: Ferreira, 2003.

O eletrodo de referência utilizado foi o de calomelano saturado – ECS – cujo intervalo de probabilidade de corrosão está definido na Tabela 21.

Tabela 21 – Probabilidade de haver corrosão eletroquímica como função do intervalo do potencial de corrosão medido por meio dos eletrodos de referência, de acordo com ASTM C-876:91 (ASTM, 2011).

ELETRODO	CORROSÃO ELETROQUÍMICA: PROBABILIDADE		
	< 10%	10% - 90%	> 90%
NHE <sup>a</sup>	>0,118 V	(0,118V) – (0,032 V)	< - 0,032V
Cu/CuSO <sub>4</sub> , Cu <sup>2+</sup> (ASTM C 876)	>-0,200 V	(-0,200 V) – (- 0,350 V)	< - 0,350 V
Hg, Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> /KCl (saturado) <sup>b</sup>	>- 0,124 V	(-0,124V) - (-0,274 V)	< - 0,274 V
Ag, AgCl/KCl (1M)	>-0,104 V	(-0,124 V) – (-0,254 V)	< - 0,254 V

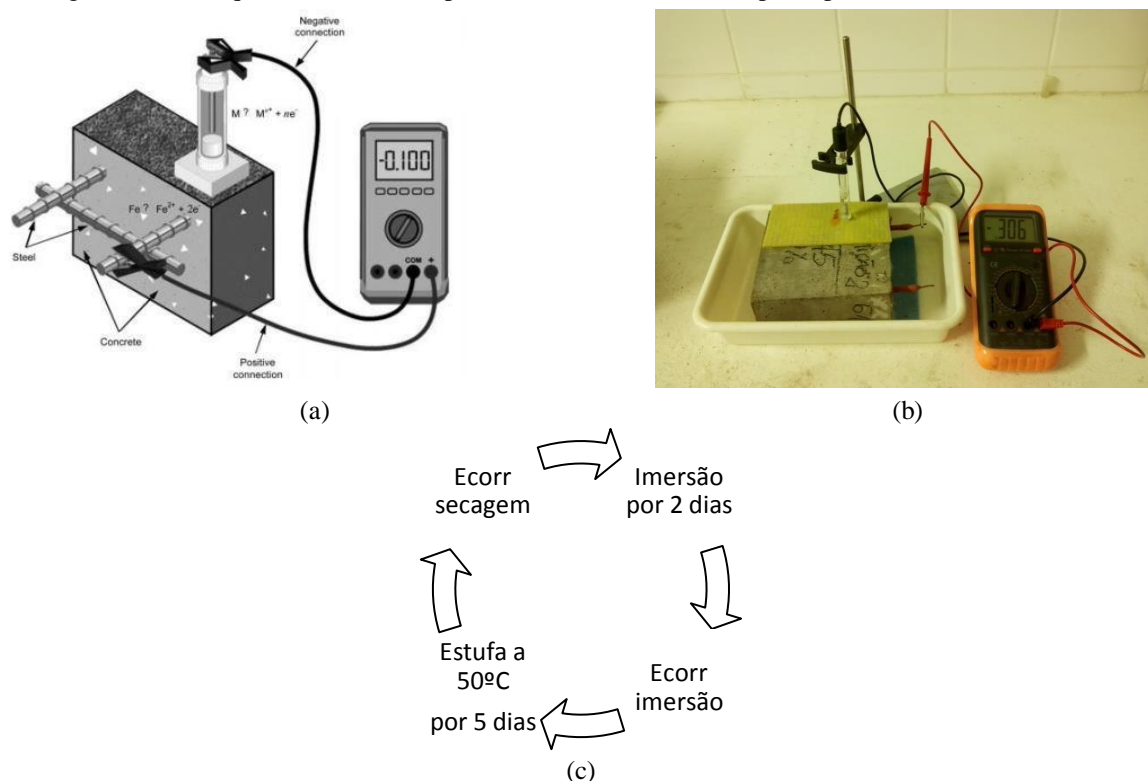
<sup>a</sup> Normal Hydrogen Electrode (NHE).

<sup>b</sup> Eletrodo de Calomelano Saturado (ECS) usado neste trabalho.

Fonte: Adaptado de Ribeiro *et al.* (2012)

O multímetro deve ser conectado ao corpo de prova pelo polo positivo, neste trabalho a conexão foi executada fixando-se um fio de cobre a uma pequena fenda feita na extremidade da armadura. O polo negativo, por sua vez, deve ser conectado ao eletrodo de referência o qual é posicionado na superfície de concreto de cobertura da armadura, conforme Figura 58 (a) e (b). O potencial de corrosão foi monitorado duas vezes a cada ciclo, após a imersão dos corpos de prova e após a secagem dos mesmos, como esquematiza a Figura 59 (c)

Figura 58 –(a) esquema do ensaio de potencial de corrosão; (b) corpo de prova submetido ao ensaio.



Fonte: (a) adaptado de ASTM C 876:91 (ASTM, 2009); (b) e (c) produção da autora.

### 3.5.5 Método Colorimétrico por aspersão de nitrato de prata

Cascudo (1997) afirma que no interior do concreto os cloretos podem ser encontrados quimicamente ligados ao aluminato tricálcico ( $C_3A$ ), formando cloroaluminato de cálcio ou sal de Friedel ( $C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ ). Também podem estar adsorvidos nos poros do concreto ou podem estar na forma de íons livres. Haverá, entretanto, um equilíbrio entre as maneiras com as quais os cloretos são encontrados, ou seja, se houver cloretos combinados haverá também um teor de cloretos livres, que efetivamente contribuem para a iniciação e aceleração do processo de corrosão.

O ensaio colorimétrico por aspersão de nitrato de prata é uma maneira de analisar qualitativamente a presença de cloretos livres em concreto, ou frente de contaminação por cloretos. O método determina visualmente, por meio da mudança de coloração do corpo de prova, se a frente de cloretos alcança as armaduras. Para isso é aspergida sobre uma superfície de concreto recém-fraturada uma solução de  $AgNO_3$  normalmente na concentração de 0,1 mol/L. As reações químicas entre os íons  $Ag^+$  - presentes na solução - e  $Cl^-$  ou  $OH^-$ , presentes no concreto, resultam nos precipitados  $AgCl$ , e  $Ag_2O$ . O primeiro possui coloração esbranquiçada e se forma na região onde são encontrados cloretos livres (nocivos); o segundo é amarronzado, formado onde há cloretos combinados. Dessa forma delimitam-se áreas de cores distintas na superfície de concreto, conforme Quadro 10.

Quadro 10 – Considerações sobre a fronteira de mudança de cor em superfície de concretos ensaiados aspergida com indicador nitrato de prata ( $AgNO_3$ ).

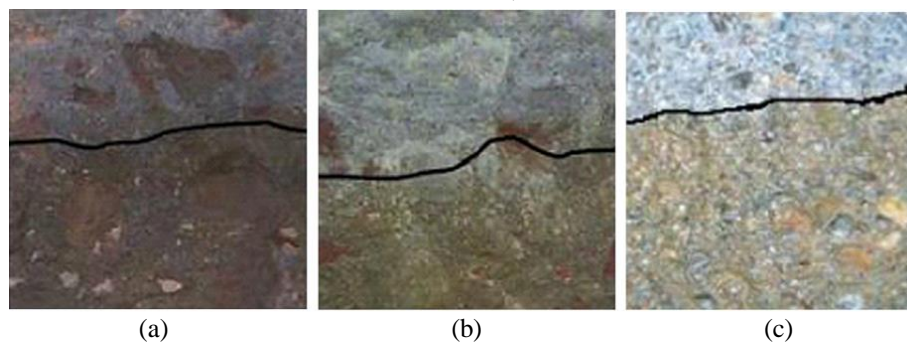
ITENS	$AgNO_3$
Cores	Branco e marrom
Visibilidade da mudança de cor na fronteira	Relativamente alta
Reações químicas na zona de cloretos livres	$Ag^+ + Cl^- \rightarrow AgCl$ (branco)
Reações químicas na zona de cloretos combinados	$Ag^+ + OH^- \rightarrow AgOH \rightarrow Ag_2O$ (marrom)
Fatores que influenciam a visibilidade no limite da alteração de cor	Concreto de baixa alcalinidade causa baixa visibilidade ou o desaparecimento da fronteira de mudança de cor. Concreto cinza escuro pode produzir uma fronteira de mudança de cor pouco visível.

Fonte: Adaptado de He *et al.* (2012).

He *et al.* (2012) acrescentam que podem ser utilizados outros indicadores químicos semelhantes combinados ao  $AgNO_3$ , como a fluoresceína e o  $K_2CrO_4$ , conforme a Figura 59

(a), (b) e (c). Entretanto, os autores consideram a opção de se utilizar a solução  $\text{AgNO}_3$  mais interessante que as demais por sua simplicidade de execução e facilidade de análise.

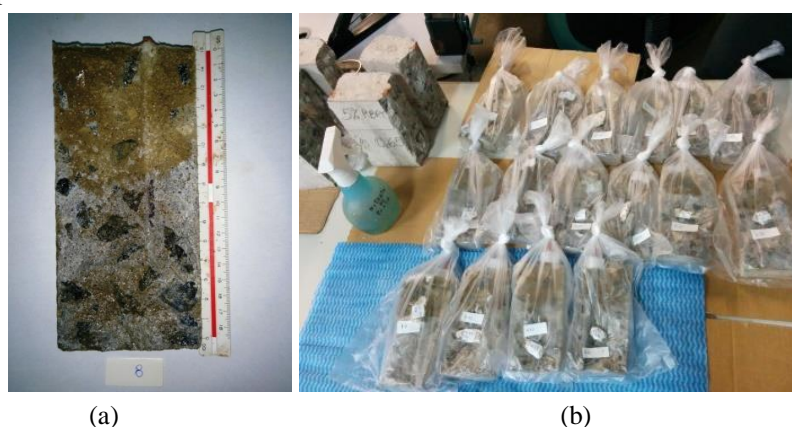
Figura 59 – Aspecto típico da superfície de concreto após aspersão dos indicadores (a)  $\text{AgNO}_3$ +fluoresceína; (b)  $\text{AgNO}_3 + \text{K}_2\text{CrO}_4$ ; (c)  $\text{AgNO}_3$ .



Fonte: He; Shi; Yuan; Chen; Zheng, (2012).

Após a aspersão do indicador químico foi feito o registro fotográfico dos concretos para análise da profundidade de penetração de cloretos, conforme Figura 60 (a). Foram aferidas 5 cotas uniformemente distribuídas em cada corpo de prova com o uso da ferramenta computacional AutoCad®. As cotas (h) são alturas de penetração/contaminação do concreto por íons cloreto livres. A variável resposta altura de penetração (h) foi analisada por meio da ferramenta ANOVA pelo software Statgraphics®. Após a aspersão do indicador químico e registro das imagens, os corpos de prova foram acondicionados em sacolas, conforme Figura 60 (b).

Figura 60 – (a) corpo de prova depois da aspersão de  $\text{AgNO}_3$  exibe a área marrom, contendo cloretos combinados e a área de cor pouco alterada, contaminada com cloretos livres. (b) corpos de prova protegidos em sacolas plásticas após o ensaio.



Fonte – produção da autora.

### 3.5.6 Projeto Estatístico

Existem várias técnicas estatísticas que podem ser aplicadas para a análise e interpretação de dados observados. De acordo com Torres (2011) o estudo da corrosão causada por íons

cloreto em concreto armado pode ser avaliado por meio de Análise de Variância e por Regressão Linear Múltipla. A primeira técnica determina se existem diferenças entre os grupos estudados e, em seguida, observa suas significâncias. A segunda é uma técnica de modelagem para que sejam estabelecidas relações entre as variáveis dependentes e independentes envolvidas.

A Análise de Variância, ANOVA, compara médias dentro dos grupos e entre os diferentes grupos, os chamados tratamentos, com a finalidade de detectar a influência de cada variável independente e mantendo um nível de significância estabelecido ( $\alpha$ ). O nível de significância é a probabilidade máxima de rejeitar uma hipótese nula verdadeira (erro tipo I), geralmente utiliza-se  $\alpha$  igual a 5% no campo da Engenharia de materiais. O valor P significa a probabilidade de se obter o efeito observado sendo a hipótese nula verdadeira, não deve ser confundido com o nível de significância ( $\alpha$ ). Quando o valor P é maior que  $\alpha$ , não se assume o erro tipo I e é aceita hipótese nula.

Montgomery e Runger (2013) explicam que a análise de Regressão é empregada para modelar as relações não determinísticas entre variáveis, isto é, a resposta de interesse (Y) não pode ser prevista simplesmente pelo conhecimento da variável independente, ou regressor, (x). Logo, Y não é explicado perfeitamente por X mas pode ser descrita pelo modelo de regressão linear simples da equação 9. O modelo possui apenas um regressor (x), " $\beta_0$ " e " $\beta_1$ " são coeficientes de regressão (interseção e inclinação da linha, respectivamente) e " $\epsilon$ " representa um erro aleatório.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x + \epsilon \quad (9)$$

A análise de Regressão é aplicada quando se deseja descobrir se existe dependência entre a variável dependente quantitativa y e outra variável independente quantitativa x. Dessa forma, pode-se prever o valor de y a partir do valor de x.

Para explicar a variabilidade dos resultados obtidos em concretos foi utilizado o software Statgraphcs<sup>®</sup>. As variáveis dependentes massa específica do concreto fresco, absorção de água por imersão, absorção capilar e a altura de penetração de cloretos foram avaliadas por meio de ANOVA. As variáveis dependentes resistência à compressão axial, potencial de corrosão após imersão e potencial de corrosão após secagem foram avaliadas por meio de ANOVA e por Regressão Linear Múltipla.

*Capítulo 4*  
**Resultados e Discussões**

---





## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados separadamente os resultados encontrados a partir dos procedimentos descritos no capítulo 3. São abordadas as propriedades do concreto avaliadas no estado fresco, no estado endurecido e suas características de durabilidade.

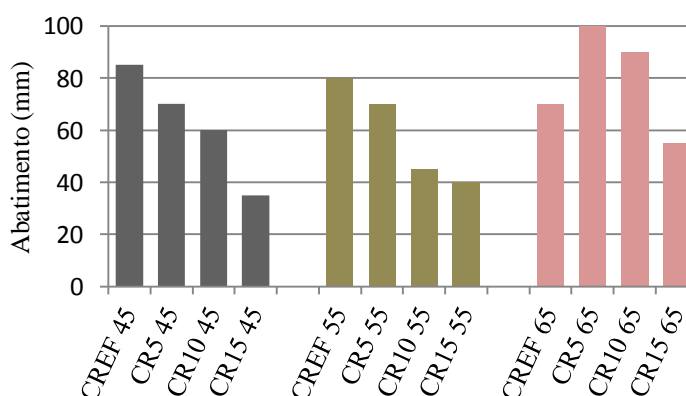
### 4.1 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

Com o interesse de conhecer o comportamento da mistura de concreto em suas primeiras idades em função da adição do RBRO e das diferentes relações água/cimento, foram determinadas duas propriedades do concreto em seu estado fresco: sua consistência e sua massa específica.

#### 4.1.1 Consistência do concreto

Para Gonçalves (2000), a elevada finura das adições pode aumentar da necessidade de água necessária para manter a consistência desejada e, em alguns casos, o efeito pode ser adverso, dependendo das características da adição. O abatimento especificado,  $70 \pm 10$  mm, foi atingido por todos os concretos de referência (CREF 45, CREF 55, CREF 65). Pela Figura 61, pode-se perceber que houve perda de abatimento nos concretos com relação a/c de 0,45 e 0,55 à medida que o percentual de adição aumentou. Os resultados de abatimento de tronco de cone dos concretos produzidos indicam a diminuição da fluidez do concreto à medida que crescem os teores de adição do RBRO.

Figura 61 – Índice de consistência dos concretos produzidos.



Fonte: produção da autora.

Os resultados encontrados por Al-Akhras *et al.* (2010) e Chi-cong Kou *et al.* (2011) também mostraram a tendência de diminuição do abatimento com o aumento da quantidade de finos nos concretos. Devido à elevada superfície específica da adição existe maior demanda de água para manter a consistência do concreto fresco.

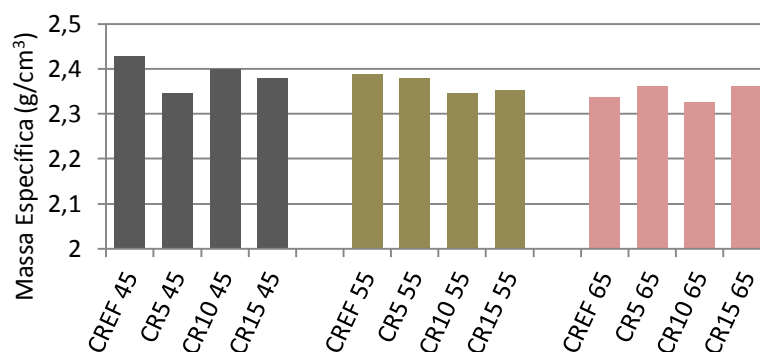
Ainda por meio da Figura 61, nota-se que os concretos CR5 65 e CR10 65 mostraram abatimento 43% e 28% maiores, respectivamente, que o abatimento da mistura de referência CREF 65. O efeito físico visualizado foi equivalente ao aumento do conteúdo de água nessas misturas. A adição de 5% e 10 % de RBRO atrelado à relação a/c de 0,65 causou um efeito semelhante à diluição do cimento, ou seja, houve aumento do abatimento.

Observou-se que mesmo havendo a tendência de diminuição do abatimento, os concretos exibiram aspecto coeso, característica almejada do concreto fresco. Joudi-Bahri *et al.* (2012) também utilizaram filler produzido a partir de calcário em concretos sem a utilização de aditivos superplastificantes. Constataram que a exsudação das misturas diminuiu com o aumento do conteúdo de finos. De acordo com Mehta e Monteiro (2008) a coesão se opõe à ocorrência de segregação dos agregados graúdos e à exsudação da água, sendo uma medida da qualidade da mistura.

#### 4.1.2 Massa Específica do concreto fresco

A massa específica pode ser definida como a massa do material por unidade de volume, incluindo os poros internos. A Figura 62 mostra os resultados médios das massas específicas dos concretos em seu estado fresco, obtidas conforme a NBR 13278 (ABNT, 2005).

Figura 62- Massas específicas médias dos concretos produzidos.



Fonte: produção da autora.

Para a avaliação da propriedade massa específica dos concretos produzidos foi realizada uma análise estatística denominada Análise de Variância (ANOVA) com o auxílio da ferramenta computacional Statgraphics®. Essa análise verifica o grau de diferença entre os concretos estudados sobre a variável resposta (massa específica) considerando sua distribuição próxima da normal. Os parâmetros analisados são a soma dos quadrados, graus de liberdade para as variáveis independentes, médias quadradas a um nível de confiança de 95%. A Tabela 22 mostra a contribuição de cada fator (variáveis independentes) sobre a variável massa específica (variável dependente) com o nível de confiança de 95,0%. O valor p testa a significância estatística de cada um dos fatores, quando o mesmo é inferior a 0,05 o fator tem um efeito estatisticamente significativo sobre a massa específica.

Tabela 22 – Análise de variância do efeito da relação a/c e % RBRO sobre a massa específica dos concretos.

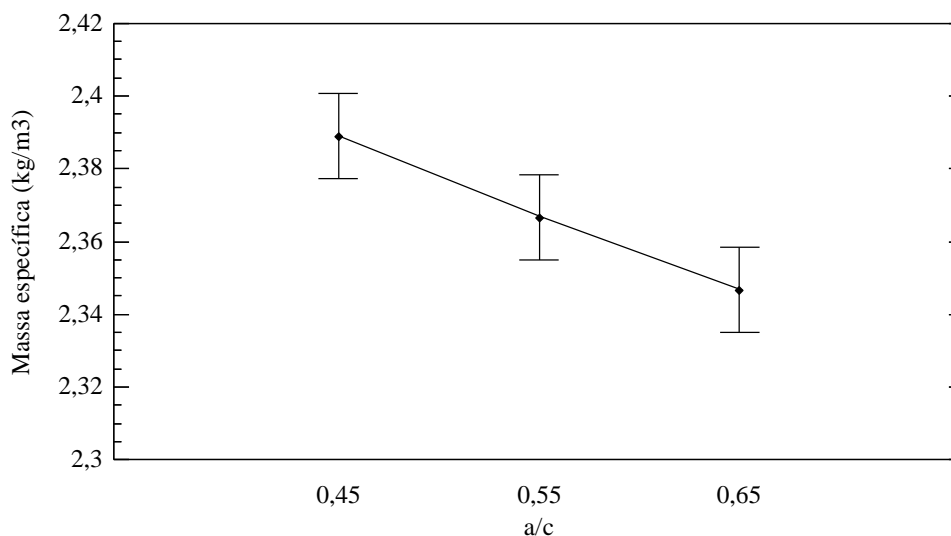
FONTE DE VARIAÇÃO	SQ	GL	MQ	Fcal	VALOR P	RESULTADO
A:a/c	0,0071226	2	0,0035613	15,39	0,0005	S
B:%RBRO	0,0024085	3	0,000802834	3,47	0,0508	NS
AB	0,00927298	6	0,0015455	6,68	0,0027	S
RESÍDUOS	0,00277704	12	0,00023142			
ERRO	0,0215811	23				

SQ - soma dos quadrados; GL – graus de liberdade; MQ – média dos quadraqudos; F – parâmetro de Fischer para o teste de significância dos efeitos; S - Efeito significativo; NS - Efeito não significativo. Fonte: produção da autora.

O resultado foi significativo para a variável independente relação a/c e para a interação AB (a/c\*%RBRO). A intensidade de influência dos fatores, tomando como base a magnitude dos valores de Fcal, mostra que a variável mais influente na massa específica foi a relação a/c e, em segundo lugar, a interação dupla (a/c\*%RBRO). Essa interação demonstra o efeito que uma variável exerce sobre a massa específica é dependente da outra variável associada a ela, ou seja, o percentual de RBRO exerce influência na massa específica das misturas de concreto quando associado à relação a/c.

É possível observar, por meio da Figura 63, que os valores obtidos para a variável massa específica são inversamente proporcionais à relação a/c. O concreto com maior relação a/c, ou maior quantidade de água em sua formulação, possui menor massa específica.

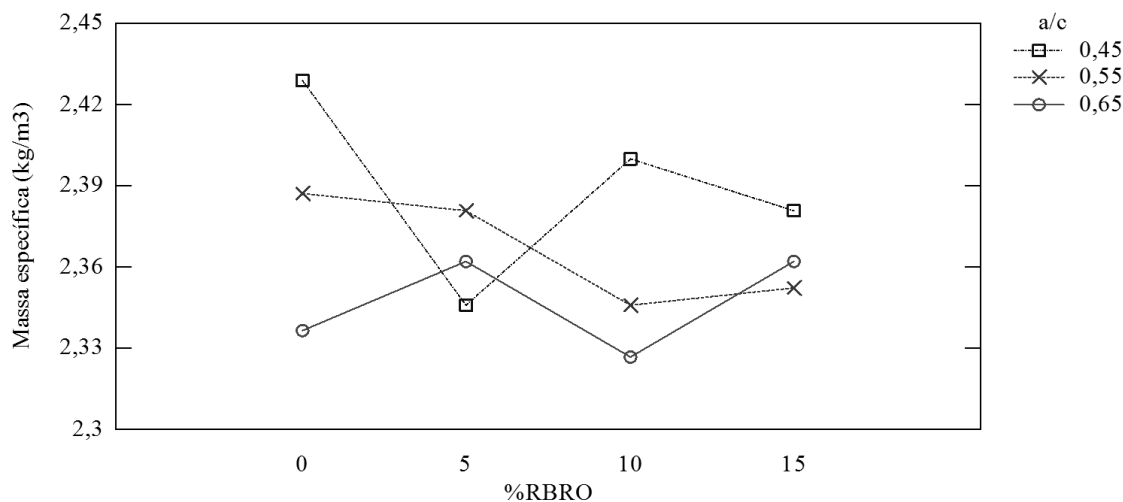
Figura 63 – Efeito isolado da variável independente a/c sobre a massa específica dos concretos.



Fonte: produção da autora.

A Figura 64 mostra a variável resposta, massa específica, em função da interação entre %RBRO e relação a/c. É possível notar que o teor de RBRO atrelado às relações a/c de 0,45 e 0,55 também proporciona a diminuição da massa específica das misturas.

Figura 64 – Massa específica em função da interação entre a relação a/c e %RBRO.



Fonte: produção da autora.

A família CR5 45 mostrou uma queda brusca nos valores de massa específica que pode estar relacionada à incorporação de ar resultante de um adensamento dificultado, devido à pequena quantidade de água de amassamento. Joudi-Bahri *et al.* (2012), por exemplo, observaram que os baixos teores de adição de fíler proveniente de rochas calcárias produzem concretos com vazios intergranulares mal preenchidos.

Nas famílias de relação a/c 0,65 observa-se que a adição de 5% e 15% de RBRO proporcionou o aumento da massa específica nos concretos CR5 65 e CR15 65 quando comparados ao CREF 65 e CR10 65. Esse comportamento pode ter ocorrido devido à melhor distribuição dos finos de RBRO nos vazios intergranulares das misturas, garantida pela maior quantidade de água.

#### 4.2 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

A variável resposta resistência à compressão axial aos 28 dias ( $f_{c28}$ ) foi analisada estatisticamente verificando-se a influência das variáveis independentes nas diferentes categorias de concreto produzidas. Os resultados foram analisados pelos métodos da Análise de Variância e Análise de Regressão Linear Múltipla, desenvolvidas por meio do programa computacional Statgraphics®.

A Tabela 23 mostra o resultado médio das resistências à compressão axial das famílias de concreto produzidas e o incremento na resistência em função da adição de RBRO. Nota-se que houve incremento na resistência nos concretos CR5 45, CR5 55 e CR5 65 quando comparados aos concretos de referência, CREF 45, CREF 55 e CREF 65. Existe, todavia, a tendência de diminuição da resistência à compressão dos concretos com adição de 10% e 15%.

Tabela 23 - Resistência média dos concretos.

CONCRETO	RESISTÊNCIA MÉDIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa)	RAZÃO $\frac{f_{c28\ CRi}}{f_{c\ 28\ REF}}$	INCREMENTO NA RESISTÊNCIA AXIAL (%)
CREF 45	52,43		
<b>CR5 45</b>	<b>56,17</b>	<b>1,07</b>	<b>7,13</b>
CR10 45	51,2	0,98	-2,35
CR15 45	50,68	0,97	-3,34
CREF 55	45,65		
<b>CR5 55</b>	<b>45,77</b>	<b>1,00</b>	<b>0,26</b>
CR10 55	40,57	0,89	-11,13
CR15 55	42,13	0,92	-7,71
CREF 65	34,05		
<b>CR5 65</b>	<b>36,8</b>	<b>1,08</b>	<b>8,08</b>
CR10 65	34,02	1,00	-0,09
CR15 65	33,65	0,99	-1,17

Fonte: produção da autora.

### 4.2.1.1 ANOVA

A Tabela 24 mostra a contribuição de cada variável independente sobre a variável resistência à compressão axial, com o nível de confiança de 95,0%. O valor p exibiu valores inferiores a 0,05, portanto, as variáveis mostraram contribuição estatisticamente significativa sobre a resistência à compressão axial.

Tabela 24 – Análise de Variância das variáveis independentes na resistência à compressão axial.

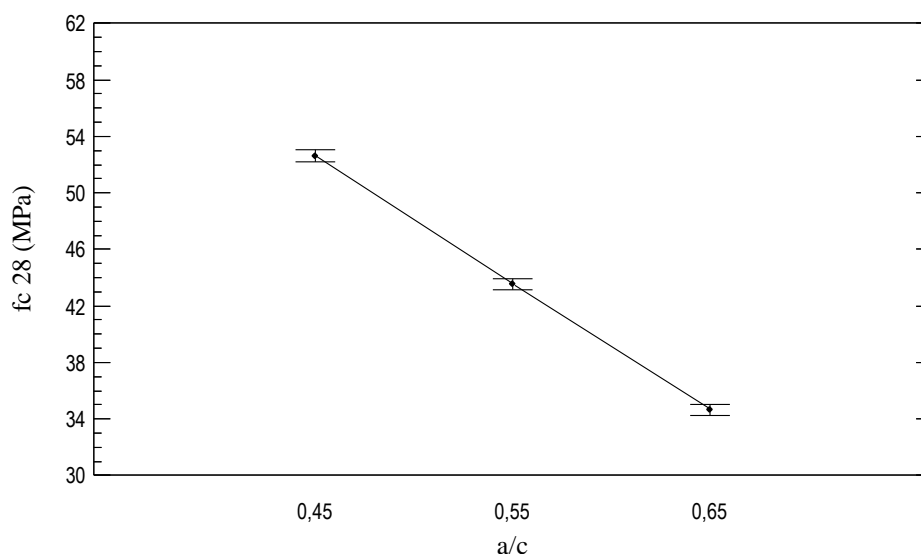
FONTE DE VARIAÇÃO	SQ	GL	MQ	Fcal	VALOR P	RESULTADO
a/c	3891,72	2	1945,86	2005,30	0,0000	S
%RBRO	215,203	3	71,7342	73,93	0,0000	S
a/c*%RBRO	53,0311	6	8,83852	9,11	0,0000	S
RESÍDUOS	58,2217	60	0,970361			
ERRO	4218,18	71				

SQ - soma dos quadrados; GL – graus de liberdade; MQ – média dos quadraçdos; F – parâmetro de Fischer para o teste de significância dos efeitos; S - Efeito significativo; NS - Efeito não significativo. Fonte: produção da autora.

É importante considerar a intensidade de influência dos fatores, tomando como base a magnitude dos valores de Fcal. Pode-se concluir que a variável mais influente na resistência à compressão axial foi a relação a/c e, em segundo lugar, a variável %RBRO. Por último, a interação dupla (a/c\*%RBRO), a qual demonstra que o efeito que uma variável exerce sobre a resistência à compressão é dependente da outra variável associada a ela.

A Figura 65 mostra o efeito isolado da variável independente relação a/c sobre a resistência à compressão axial. A resistência decresce com o aumento de água nas misturas devido ao enfraquecimento da matriz pela elevação da sua porosidade (MEHTA, MONTEIRO; 2008).

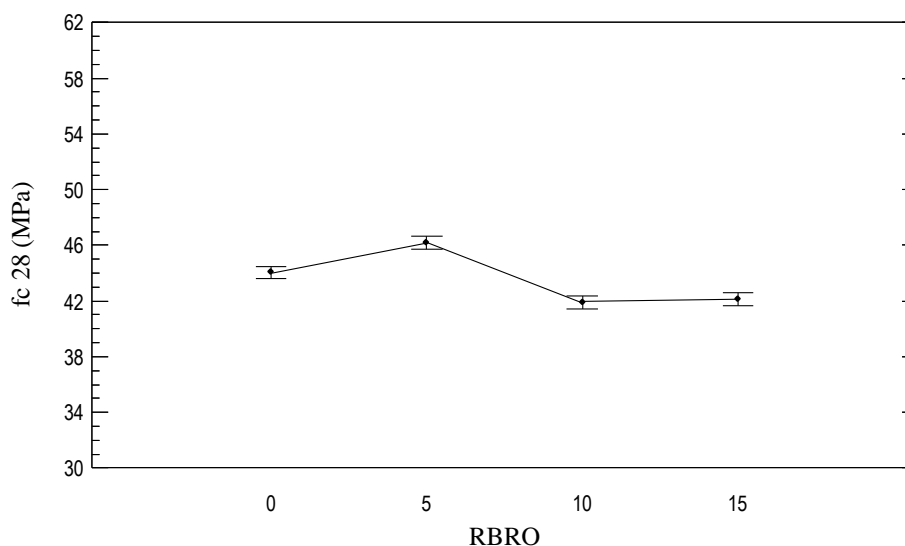
Figura 65 - Efeito isolado da variável independente relação a/c sobre a resistência à compressão axial.



Fonte: produção da autora.

A Figura 66, por sua vez, mostra o efeito isolado da variável %RBRO sobre a resistência à compressão. Existe um crescimento nos valores de resistência à compressão para os concretos com adição de 5% de RBRO.

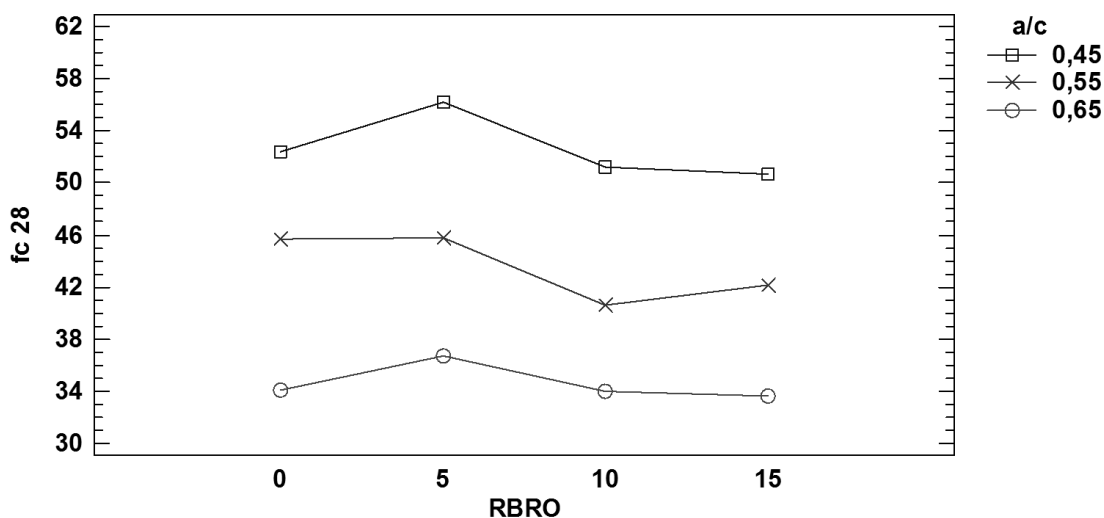
Figura 66 - Efeito isolado da variável independente % RBRO sobre a resistência à compressão axial.



Fonte: produção da autora.

A Figura 67 relaciona a resistência à compressão axial dos concretos em função da interação entre a relação a/c e %RBRO. Os concretos CR5 45, CR5 55 e CR5 65, cujo conteúdo de RBRO é 5%, mostraram desempenho superior ou equivalente aos de referência em sua propriedade de resistência à compressão axial.



Figura 67 – Resistência à compressão axial ( $f_c$ ) em função da interação entre a relação  $a/c$  e %RBRO.

Fonte: produção da autora.

A incorporação de 5% de RBRO pode ter provocado a diminuição da porosidade da argamassa dos concretos devido ao preenchimento dos vazios intergranulares da argamassa.

#### 4.2.1.2 Regressão Múltipla

Foi conduzida uma análise estatística de regressão múltipla por meio do software Statgraphics® para a variável resistência à compressão em função das variáveis independentes  $\frac{1}{a/c}$ , %RBRO e suas interações  $\sqrt{\frac{a}{c}} * RBRO$  e  $RBRO * a/c$ . O método de ajuste utilizado foi o “*Bachward Stepwise Selection*” que parte de uma modelo saturado, que contempla todas as variáveis e interações listadas, e exclui, uma a uma, as variáveis que não possuem significância no modelo. A Tabela 25 mostra as variáveis selecionadas para prever a resistência à compressão dos concretos, o coeficiente angular ou de regressão (inclinação da reta), o erro padrão, o valor de t e a significância destas.

Tabela 25 – Coeficientes de regressão linear para resistência à compressão.

VARIÁVEIS	COEFICIENTE ANGULAR	ERRO PADRÃO	TESTE T	VALOR P	RESULTADO
Constante	-6,59065	1,6741	-3,93684	0,0002	S
$(a/c)^{-1}$	27,3117	0,825871	33,0702	0,0000	S
RBRO	-0,707183	0,134851	-5,24419	0,0000	S
$\sqrt{\frac{a}{c}} * RBRO$	2,7375	0,696832	3,92849	0,0002	S

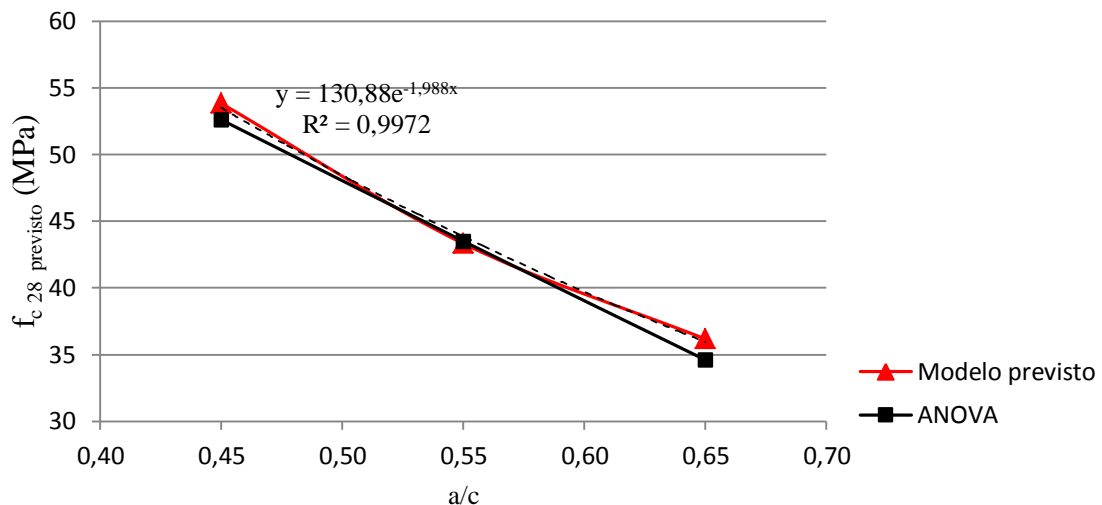
Fonte: produção da autora.

A equação 10 é o resultado da regressão linear múltipla para descrever a relação entre  $f_{c(28)}$  e as 3 variáveis dependentes selecionadas. O coeficiente de determinação encontrado ( $R^2$ ) foi igual a 94,68% e o R ajustado igual a 94,45%.

$$f_{c 28} = -6,59065 + 27,3117*1/a/c - 0,707183*RBRO + 2,7375*(a/c*RBRO)^{(1/2)} \quad (10)$$

Por meio da equação 10 foi montado o gráfico da Figura 68 que determina a curva obtida do comportamento dos concretos em sua resistência à compressão axial aos 28 dias de idade em função da variável relação  $a/c$ , mantendo constante a adição de resíduo RBRO, fixado em 7,5% (ponto médio). A curva obtida na ANOVA foi plotada para efeito de comparação. Nota-se que as curvas encontradas seguem a tendência da curva de Abrams, ou seja, à proporção que a relação  $a/c$  aumenta é diminuída a resistência do concreto numa tendência exponencial. A aproximação das curvas encontradas no modelo e na ANOVA pode ser explicada pela alta influência exercida pela variável relação  $a/c$  sobre a resistência à compressão.

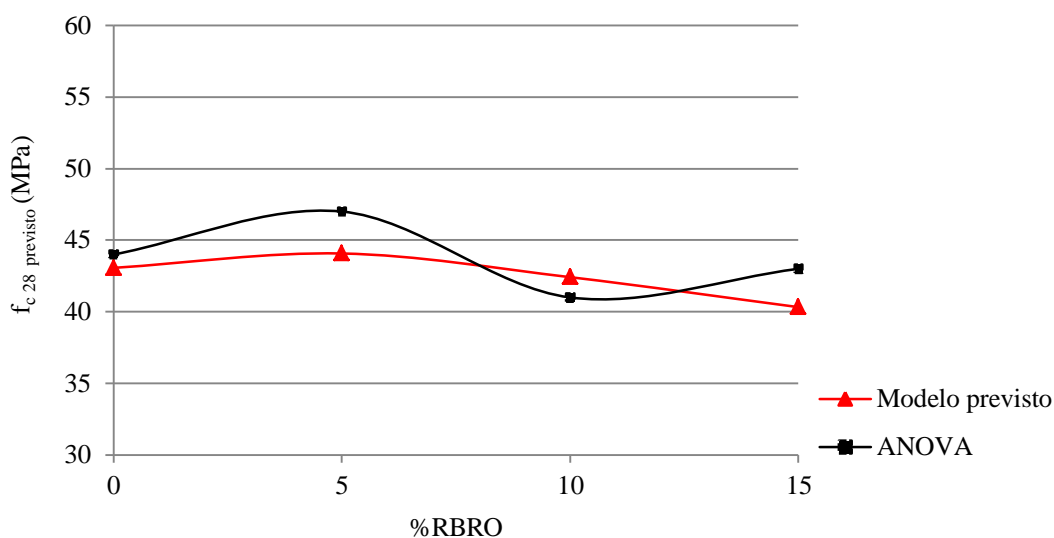
Figura 68 – Efeito isolado da variável relação  $a/c$  sobre o comportamento da resistência à compressão prevista pelo modelo da equação 10



Fonte: produção da autora.

O gráfico da Figura 69 mostra o comportamento isolado da variável percentual de adição (%RBRO) sobre a resistência à compressão. A variável relação  $a/c$  foi mantida constante em seu nível médio (0,55).

Figura 69 – Efeito isolado da variável %RBRO sobre o comportamento da resistência à compressão prevista pelo modelo da equação 10.

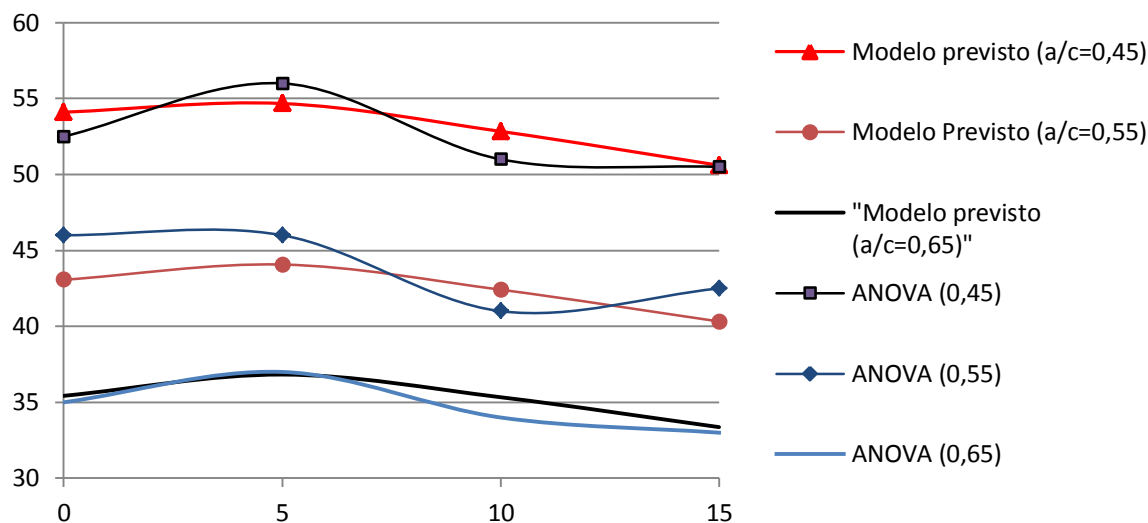


Fonte: produção da autora.

A curva encontrada na ANOVA foi plotada para comparação. Nota-se que, para o modelo previsto por meio da equação 10, existe um aumento da resistência para o teor de 5% de RBRO e um decréscimo da resistência para os teores de 10 e 15%. Na ANOVA as resistências variam mais do que no modelo, essa diferença entre as curvas encontradas pode ser explicada devido à menor influência da variável %RBRO sobre a resistência à compressão.

Por último, a Figura 70 apresenta o efeito da interação entre as variáveis %RBRO e relação a/c sobre a resistência à compressão. As curvas encontradas na ANOVA foram plotadas para comparação.

Figura 70 - Comparação das curvas do comportamento da resistência à compressão axial em função da interação entre relação a/c e %RBRO previstas pelo modelo com a curva obtida na ANOVA.



Fonte: produção da autora.

No modelo previsto existe um incremento de resistência para o teor de 5 % de RBRO para todas as relações a/c. Tal fato é visível nas curvas obtidas na ANOVA, porém, existe um decréscimo de resistência mais acentuado do que no modelo, para o teor de 10% de RBRO. Essa diferença de comportamento entre as curvas mostra que a influência da interação entre as variáveis independentes é pequena. Nota-se, todavia, que para a relação a/c 0,65 as curvas tendem a se aproximar devido à maior quantidade de água que produz concretos de maior porosidade.

### 4.3 AVALIAÇÃO DOS ENSAIOS DE DURABILIDADE

#### 4.3.1 Absorção de água por imersão e fervura

Conforme a NBR 9778 (ABNT, 2005) a absorção de água por imersão é o processo pelo qual a água tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido poroso. Por sua vez, o índice de vazios é a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra. A Tabela 26 mostra a proposta de Helene (1983) *apud* Carrijo (2005) para a qualidade do concreto de acordo com resultados de porosidade e absorção de água.

Tabela 26 - Proposta de classificação para concretos de acordo com a porosidade e a absorção de água.

PROPRIEDADE	QUALIDADE DO CONCRETO	<10%	10 a 15%	>15%
POROSIDADE	Durável	X		
	Normal		X	
	Deficiente			X
		<4,2%	4,2 a 6,3%	>6,3%
ABSORÇÃO DE ÁGUA	Durável	X		
	Normal		X	
	Deficiente			X

Fonte: Helene (1983) *apud* Carrijo (2005).

A Tabela 27 exibe os resultados médios encontrados para a variável absorção por imersão e índice de vazios dos concretos produzidos. Nota-se que entre os concretos com relação a/c 0,45 houve apenas uma família que apresentou qualidade deficiente quanto à absorção de água, a CR15 45. Ribeiro *et al.* (2014) explica que nas misturas de baixa relação a/c contendo adições, a baixa quantidade de água pode ocasionar dificuldade de adensamento e aumento de poros de ar aprisionado.

Tabela 27 – Absorção média dos concretos por imersão e fervura e sua classificação de acordo com Helene (1983) *apud* Carrijo(2005).

CONCRETO	ABSORÇÃO MÉDIA (%)	QUALIDADE (HELENE, 1983)	ÍNDICE DE VAZIOS MÉDIO (%)	QUALIDADE (HELENE, 1983)
CREF 45	5,91	Normal	13,47	
CR5 45	6,04	Normal	13,74	
CR10 45	6,12	Normal	13,90	Normal
CR15 45	6,49	Deficiente	14,54	
CREF 55	6,26		13,75	
CR5 55	5,91	Normal	13,36	Normal
CR10 55	5,72		12,93	
CR15 55	6,15		13,82	
CREF 65	6,56	Deficiente	14,37	
CR5 65	6,36	Deficiente	14,05	
CR10 65	6,29	Normal	13,79	Normal
CR15 65	6,06	Normal	13,45	

Fonte: produção da autora.

A Tabela 27 ainda mostra que os concretos com relação a/c de 0,55 obtiveram qualidade normal, mesmo variando o teor de adição, para absorção de água e índice de vazios. Tal fato

pode estar relacionado à facilidade de adensamento dessas misturas devido ao aumento da quantidade de água.

Os concretos de relação a/c 0,65 exibiram absorção de água correspondente à baixa qualidade de concreto, ou deficiente, para as famílias CREF 65 e CR5 65. Entretanto, a adição de 10 e 15% de RBRO mantiveram a qualidade do concreto na classificação normal. Possivelmente os teores 10 e 15% de RBRO preencheram os vazios intergranulares dessas misturas contribuindo para diminuir sua porosidade.

#### 4.3.1.1 ANOVA

Foi realizada a análise de variância da variável absorção por imersão e fervura. A Tabela 28 mostra a contribuição de cada variável independente sobre a variável resposta absorção por imersão e fervura, com o nível de confiança de 95,0%. As variáveis relação a/c e %RBRO e sua interação (a/c\*%RBRO) foram significativas.

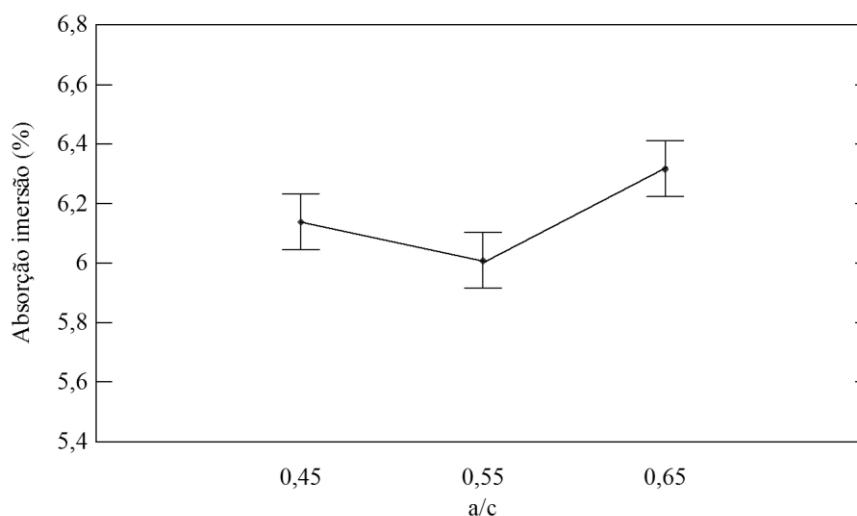
Tabela 28 - Análise de Variância das variáveis independentes na absorção por imersão e fervura.

FONTE DE VARIAÇÃO	SQ	GL	MQ	Fcal	VALOR P	RESULTADO
A:a/c	0,574772	2	0,287386	11,49	0,0003	S
B:%RBRO	0,260497	3	0,0868324	3,47	0,0318	S
AB	1,22076	6	0,20346	8,13	0,0001	S
RESÍDUOS	0,600467	24	0,0250194			
ERRO	2,6565	35				

SQ - soma dos quadrados; GL – graus de liberdade; MQ – média dos quadraqudos; F – parâmetro de Fischer para o teste de significância dos efeitos; S - Efeito significativo; NS - Efeito não significativo. Fonte: produção da autora.

O efeito isolado da variável relação a/c sobre a absorção de água por imersão e fervura é mostrado pela Figura 71, nota-se que é maior a absorção de água nos concretos que contém maior quantidade de água no traço (relação a/c igual a 0,65). Entretanto, esperava-se maior absorção de água nos concretos de relação a/c igual a 0,55 quando comparados aos concretos de relação a/c 0,45. Provavelmente os finos presentes nos concretos de a/c igual a 0,55 promoveram modificação da estrutura de poros, tornando-a descontínua. Esses resultados podem ser associados à etapa de adensamento do concreto no estado fresco que, devido à maior quantidade de água na formulação, permitiu a melhor distribuição dos finos.

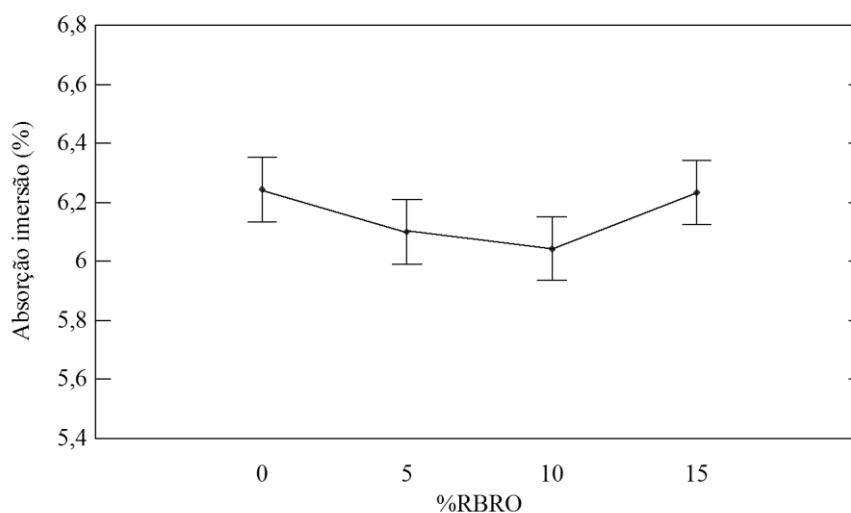
Figura 71 - Efeito isolado da variável independente a/c sobre a absorção por imersão e fervura.



Fonte: produção da autora.

A Figura 72 mostra o efeito isolado da variável %RBRO sobre a absorção de água por imersão e fervura. Observa-se que a absorção de água foi menor nos concretos produzidos com 5% e 10% de resíduo em relação ao concreto de referência. É possível que esses percentuais tenham tornado a estrutura de poros descontínua.

Figura 72 - Efeito isolado da variável independente %RBRO sobre a absorção por imersão e fervura.

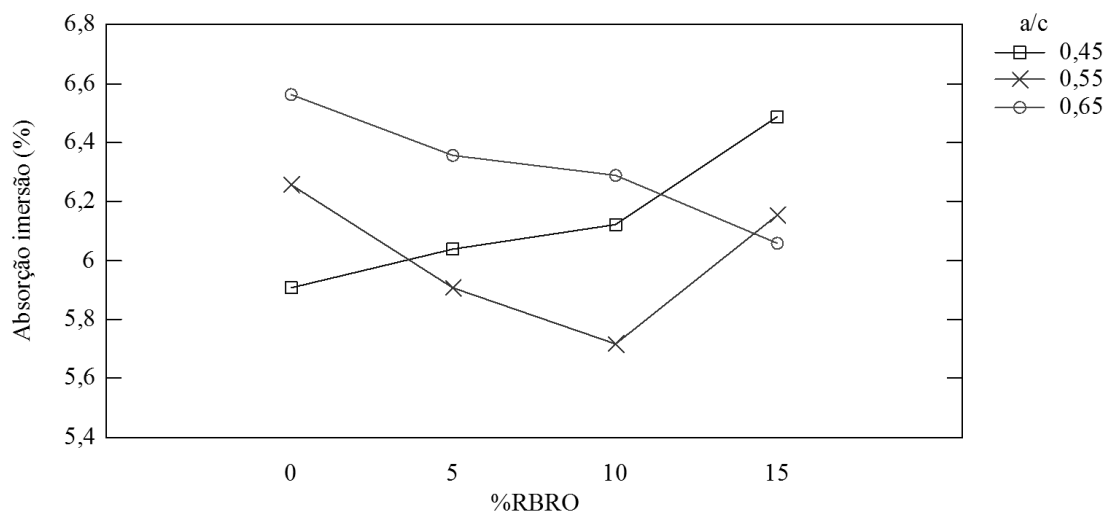


Fonte: produção da autora

A Figura 73, por sua vez, mostra a interação entre as variáveis relação a/c e %RBRO sobre a variável resposta. Observa-se em que, no concreto de referência (0% RBRO), o aumento de água na formulação dos concretos é diretamente proporcional ao aumento da absorção de água. Esse comportamento não se repete nos concretos com adição de resíduo, demonstrando a interferência deste na estrutura de poros do concreto. É possível visualizar que houve

diminuição da quantidade de água absorvida à medida que o percentual de RBRO aumentou para os concretos de  $a/c$  0,65. O oposto ocorreu nos concretos de relação  $a/c$  0,45, possivelmente devido à dificuldade de mistura do concreto fresco proporcionada pela baixa relação  $a/c$ . Os concretos produzidos com relação  $a/c$  igual a 0,55 apresentam menor absorção para os teores de 5, e 10% de RBRO, quando comparados com a referência.

Figura 73- Absorção por imersão e fervura em função da interação entre a relação  $a/c$  e %RBRO.



Fonte: produção da autora.

Os resultados de absorção por imersão e fervura indicam que o resíduo provoca descontinuidade na estrutura de poros dos concretos se a relação  $a/c$  for maior ou igual a 0,55. As relações  $a/c$  inferiores não obtêm resultados de absorção de água inferiores ao de referência quando adicionado o RBRO devido à dificuldade de adensamento das misturas em seu estado fresco.

#### 4.3.2 Absorção de água por capilaridade

A Tabela 29 apresenta os resultados médios de absorção de água por ascensão capilar executados conforme a norma NBR 9779 (ABNT, 2012).



Tabela 29 – Absorção capilar média dos concretos.

CONCRETO	ABSORÇÃO MÉDIA (g/cm <sup>2</sup> )
CREF 45	1,21
CR5 45	1,28
CR10 45	1,29
CR15 45	1,11
CREF 55	1,27
CR5 55	1,20
CR10 55	1,22
CR15 55	1,23
CREF 65	1,25
CR5 65	1,34
CR10 65	1,24
CR15 65	1,24

Fonte: produção da autora.

Foi realizada a análise de variância da variável absorção por capilaridade, a Tabela 30 mostra a contribuição de cada variável independente sobre a variável resposta, com o nível de confiança de 95,0%.

Tabela 30- Análise de variância das variáveis a/c e % RBRO sobre a absorção por capilaridade.

FONTE DE VARIAÇÃO	SQ	GL	MQ	Fcal	VALOR P	RESULTADO
a/c	0,0164222	2	0,00821111	1,44	0,2566	NS
%RBRO	0,0328111	3	0,010937	1,92	0,1535	NS
AB	0,0609556	6	0,0101593	1,78	0,1454	NS
RESÍDUOS	0,1368	24	0,0057			
ERRO	0,246989	35				

SQ - soma dos quadrados; GL – grau de liberdade; MQ – média dos quadraqudos; F – parâmetro de Fischer para o teste de significância dos efeitos; S - Efeito significativo; NS - Efeito não significativo. Fonte: produção da autora.

As variáveis relação a/c e %RBRO e sua interação (a/c\*%RBRO) não foram significativas na absorção por capilaridade. De acordo com Mehta e Monteiro (2008) os poros capilares em pastas com alta relação a/c, nas primeiras idades, podem variar de 3µm a 5µm. Mehta e Monteiro (2008) ainda acrescentam que os concretos na idade de 28 dias ainda poderão ter o volume de poros capilares diminuído em função da hidratação de cimento anidro, diferença que pode ser constatada na idade de 365 dias.

Neste trabalho a absorção capilar não foi influenciada pela relação a/c possivelmente por se tratarem de concretos com 28 dias de idade. O percentual de adição também não foi significativo na análise, ou seja, o RBRO não possibilitou o preenchimento dos poros capilares. Devido ao efeito não significativo de ambas as variáveis independentes não foram necessários os gráficos para maiores discussões.

### 4.3.3 Potencial de corrosão

O potencial de corrosão das armaduras foi medido duas vezes a cada ciclo. Uma medida foi feita após a imersão em solução rica em NaCl (5%) e outra foi feita após secagem em estufa a 50°C. O potencial de corrosão foi medido até que as armaduras exibissem potencial de corrosão na zona de probabilidade maior que 90%, conforme Tabela 31, por duas aferições consecutivas.

Tabela 31 – Zona de probabilidade de corrosão para o eletrodo de calomelano saturado (ECS).

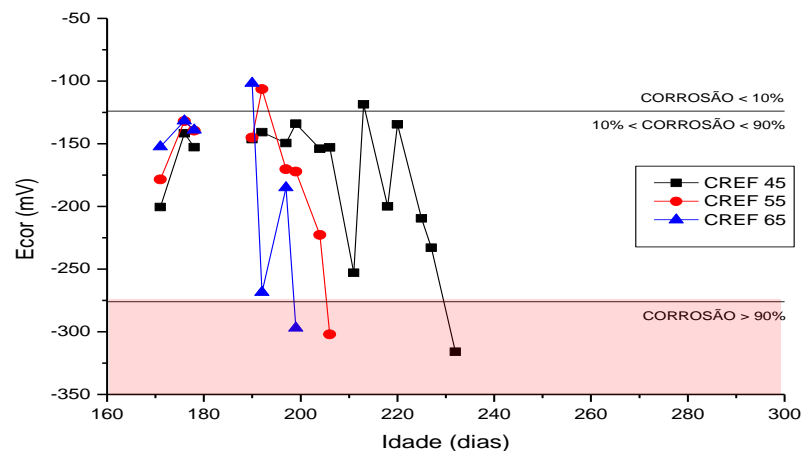
ELETRODO DE CALOMELANO SATURADO (ECS)	ZONA DE PROBABILIDADE DE CORROSÃO		
	< 10%	10% - 90%	> 90%
Hg, Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> /KCl (saturado)	>- 0,124 V	(-0,124V) - (-0,274 V)	< - 0,274 V

Fonte: Adaptado de Ribeiro *et al.* (2012).

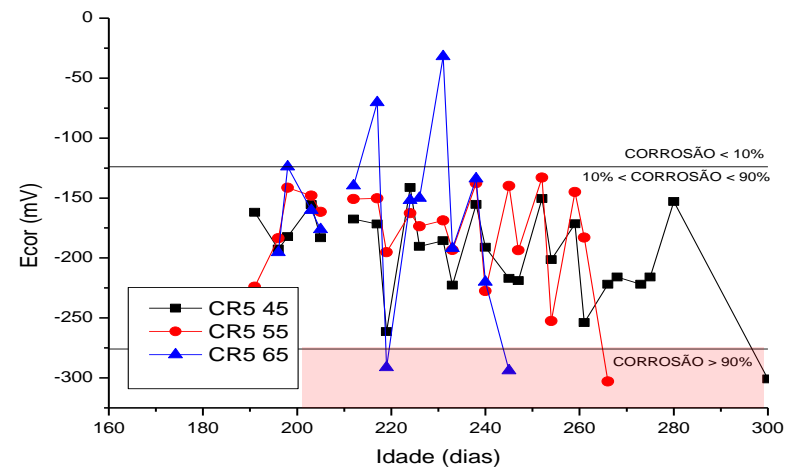
Houve variação do potencial medido nos eletrodos de trabalho (armaduras) em relação ao eletrodo de referência ECS durante todo o ensaio, com valores mais negativos ou menos negativos. Esse fato está relacionado com o procedimento adotado, em função do semi-ciclo de imersão e secagem, ao qual os corpos de prova foram submetidos. Alguns gráficos apresentam descontinuidades em virtude da impossibilidade de coleta dos dados por problemas de origem técnica com o potenciostato PGZ301(VoltaLab 40). Para que os ciclos não fossem interrompidos foi utilizado um multímetro de alta impedância, conforme explicado no Capítulo 3.

O intervalo de tempo transcorrido desde o início dos ciclos de indução da corrosão até a ruptura da camada de proteção passiva das armaduras é denominado tempo de indução da corrosão. É possível afirmar pela Figura 74 (a) que as armaduras inseridas nos concretos CREF 45 apresentaram período de indução da corrosão maior do que o das armaduras inseridas nos concretos CREF 55. Estes, por sua vez, também apresentaram período de indução da corrosão maior do que o das armaduras inseridas nos concretos CREF 65.

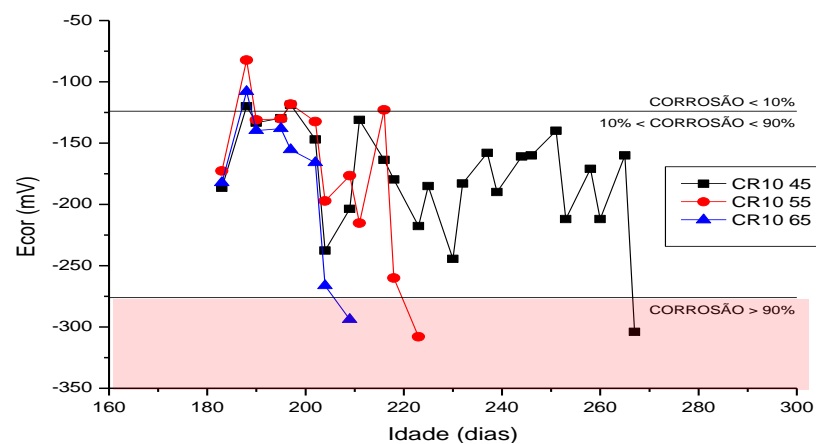
A Figura 74 apresenta os potenciais das armaduras embutidas nos concretos (a) de referência CREF 45, CREF 55, e CREF 65; (b) com 5% de RBRO (CR5 45, CR5 55 e CR5 65); (c). com 10 % de RBRO (CR10 45, CR10 55 e CR10 65); e (d) com 15% de RBRO (CR15 45, CR15 55 e CR15 65).



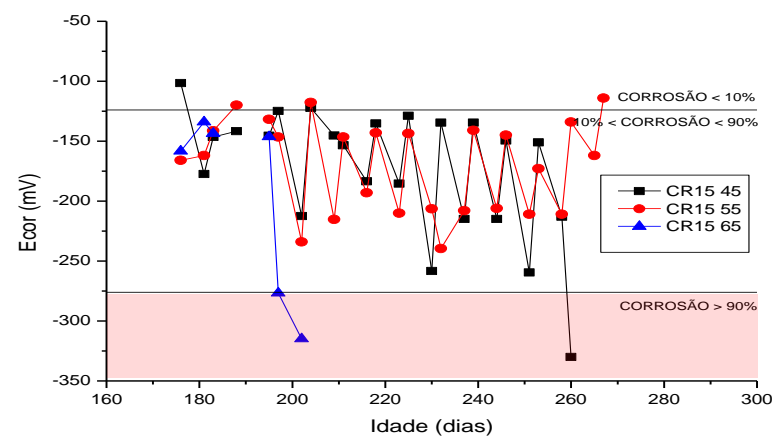
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: produção da autora.

Ou seja, quanto menor a relação  $a/c$ , melhor é a qualidade do concreto e maior é o tempo para que o potencial medido seja mais negativo que  $-274$  mV, que é o valor de referência o qual indica a probabilidade de corrosão maior que 90 %. Ainda pela Figura 74 (b), (c) e (d) nota-se que a adição de RBRO proporcionou aumento do tempo de indução da corrosão. Para cada família de concreto a idade inicial e final dos corpos de prova submetidos aos ciclos, o número de ciclos e o tempo de indução da corrosão estão definidos na Tabela 32.

Tabela 32 – Idades dos concretos no início e no final dos ciclos de indução e aceleração da corrosão.

CONCRETO	IDADE INICIAL (dias)	TEMPO DE INDUÇÃO (dias)	IDADE FINAL (dias)	NÚM. DE CICLOS
REF 45	169	61	230	7
CR5 45	189	69	258	12
CR10 45	183	84	267	12
CR15 45	176	84	260	12
CREF 55	169	35	204	5
CR5 55	189	70	259	10
CR10 55	183	40	223	5
CR15 55	176	91	267	12
CREF 65	169	28	197	4
CR5 65	189	49	238	7
CR10 65	183	26	209	3
CR15 65	176	26	202	3

Fonte: produção da autora.

O observa-se que a adição de RBRO proporcionou um aumento do tempo de indução nos concretos CR5 45, CR10 45, CR15 45, CR5 55, CR10 55, CR15 55 quando comparados com os CREF 45 e CREF 55. Ou seja, a despassivação das armaduras aconteceu mais rapidamente nos concretos de referência.

Os concretos CR5 65 também apresentaram tempo de indução maior que o da referência, CREF 65. Tal resultado não se repetiu para os concretos CR10 65 e CR15 65. Possivelmente os concretos produzidos com adição de RBRO demoraram mais para desenvolver o processo corrosivo devido à sua menor rede de poros capilares e à maior facilidade de perder a umidade absorvida. Os resultados corroboram com os encontrados por Ribeiro *et al.* (2012) que utilizaram lama vermelha como adição em concretos para estudo da corrosão por ataque de cloretos. Os autores constataram que os concretos com 10, 20 e 30% de adição de lama vermelha atingiram a área de risco (probabilidade maior que 90% de haver corrosão) após o

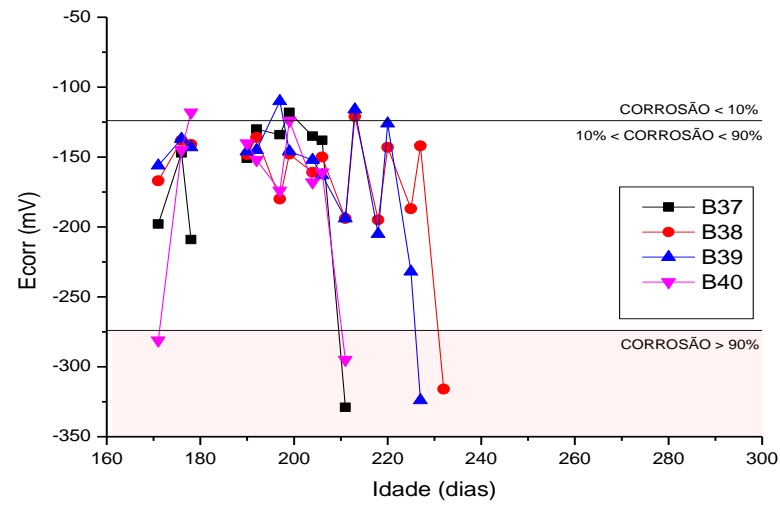
concreto de referência. Os concretos de referência apresentam maior rede de poros capilares e, portanto, maior capacidade de absorção capilar. Dessa forma, possuem maior dificuldade de perder umidade e apresentam o processo corrosivo mais rapidamente do que os concretos com adição.

A Figura 75 apresenta os potenciais aferidos em cada armadura embutida nos concretos de referência (a) CREF 45, (b) CREF 55 e (c) CREF 65. A camada passiva de proteção química é rompida em momentos diferentes para armaduras embutidas na mesma categoria de concreto. Foi observado que, quanto menor a relação a/c dos concretos maior é o tempo necessário para que os potenciais atinjam a área de maior probabilidade de haver corrosão.

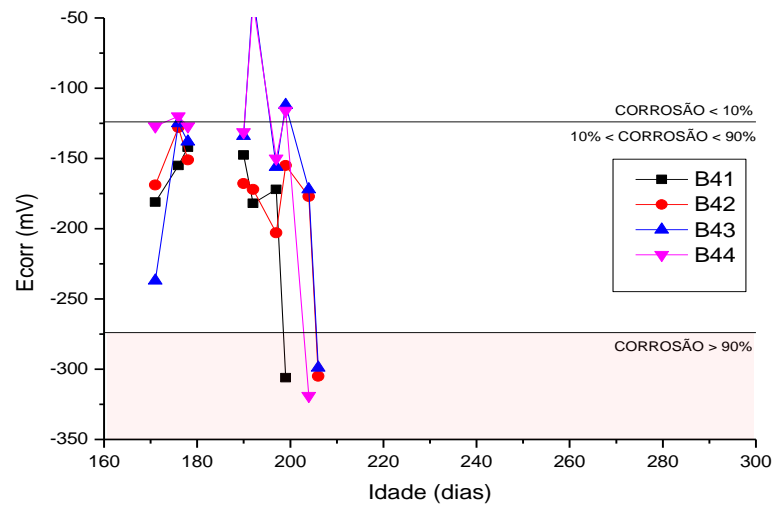
A Figura 76 apresenta os potenciais aferidos em cada armadura embutida nos concretos (a) CR5 45, (b) CR5 55 e (c) CR5 65. Também foi observado que os concretos CR5 65 atingem os potenciais de alta probabilidade de corrosão mais rapidamente em concretos da CR5 55 e CR5 45.

A Figura 77 apresenta os potenciais aferidos em cada armadura embutida nos concretos (a) CR10 45, (b) CR10 55 e (c) CR10 65. A Figura 78 apresenta os potenciais aferidos em cada armadura embutida nos concretos (a) CR15 45, (b) CR15 55 e (c) CR15 65. Foi observado nas figuras 75, 76, 77 e 78 que os potenciais de eletrodo medidos nos concretos de maior relação a/c atingem mais rapidamente a área de grande probabilidade de corrosão (maior que 90%).

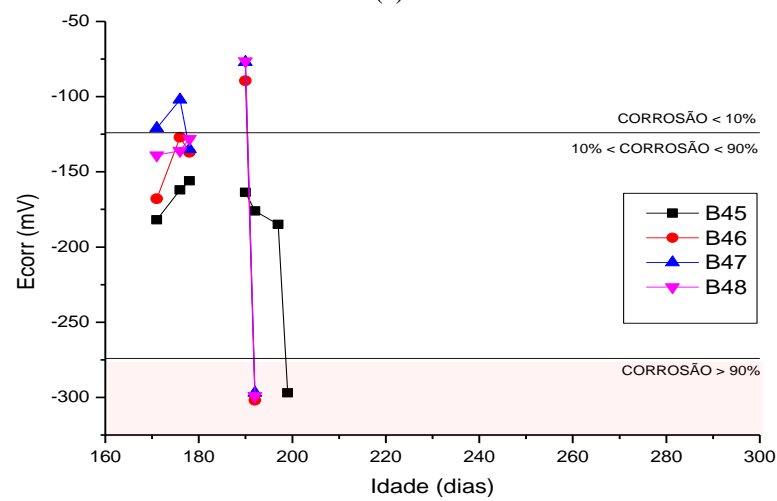
Figura 74- Evolução do potencial de corrosão das armaduras embutidas no concreto (a) CREF 45, (b) CREF 55 e (c) CREF 65.



(a)



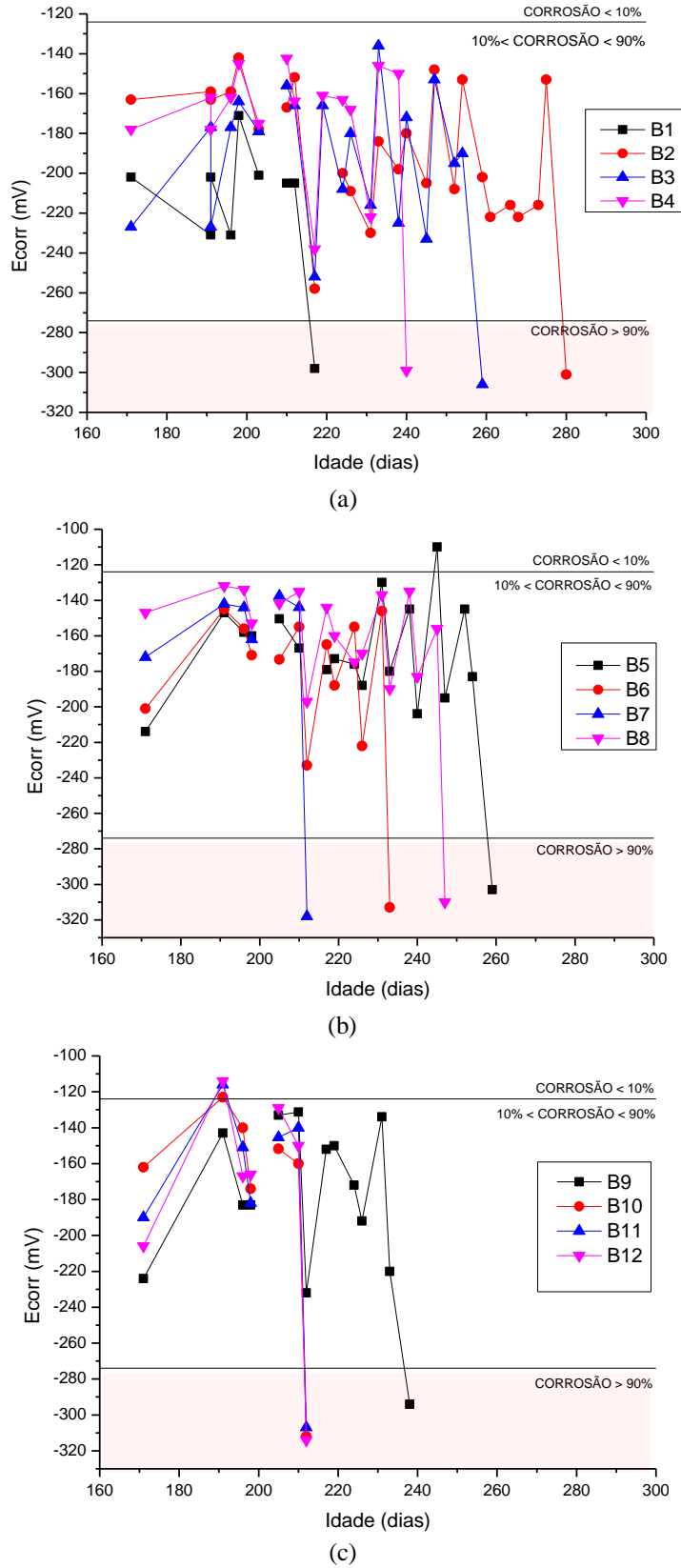
(b)



(c)

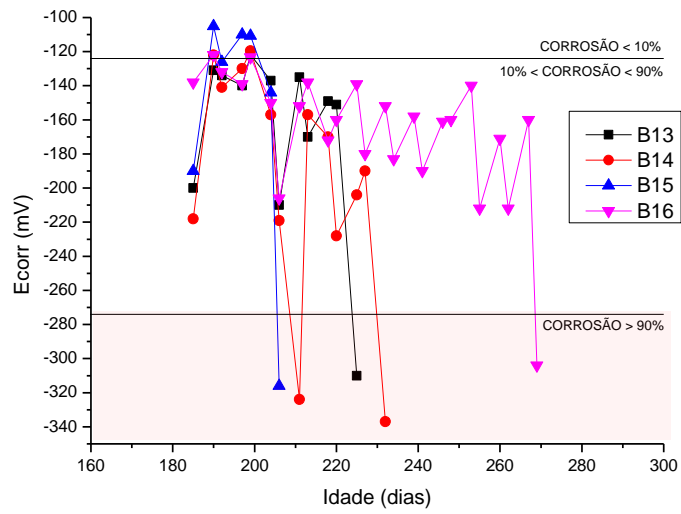
Fonte: produção da autora.

Figura 75 – Evolução do potencial de corrosão das armaduras embutidas no concreto (a) CR5 45, (b) CR5 55 e (c) CR5 65.

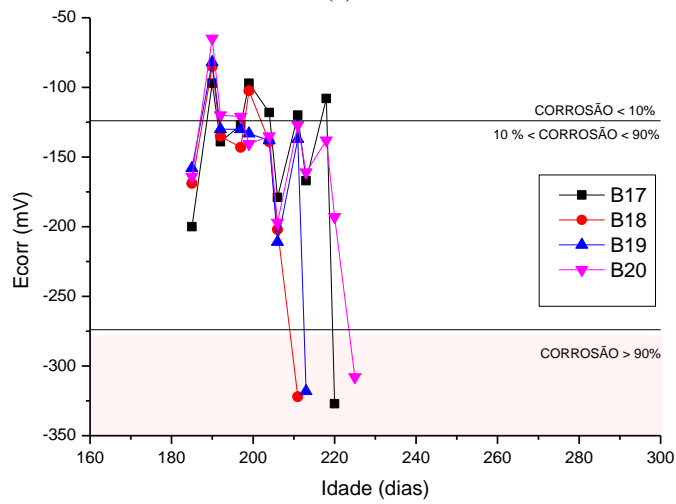


Fonte: produção da autora.

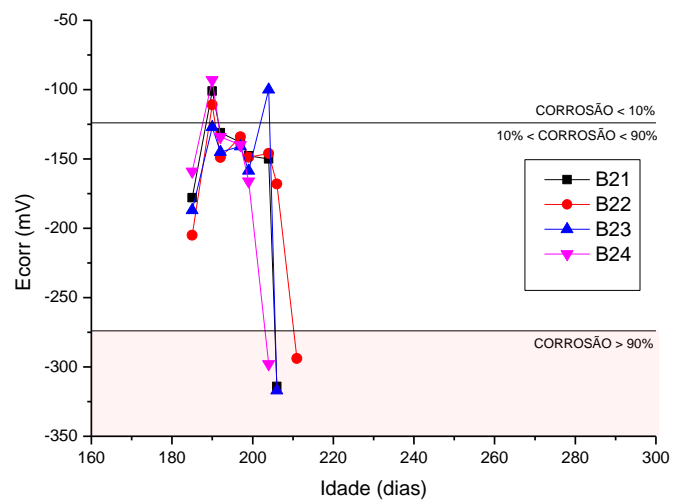
Figura 76 - Evolução do potencial de corrosão das armaduras embutidas no concreto (a) CR10 45, (b) CR10 55 e (c) CR10 65.



(a)



(b)

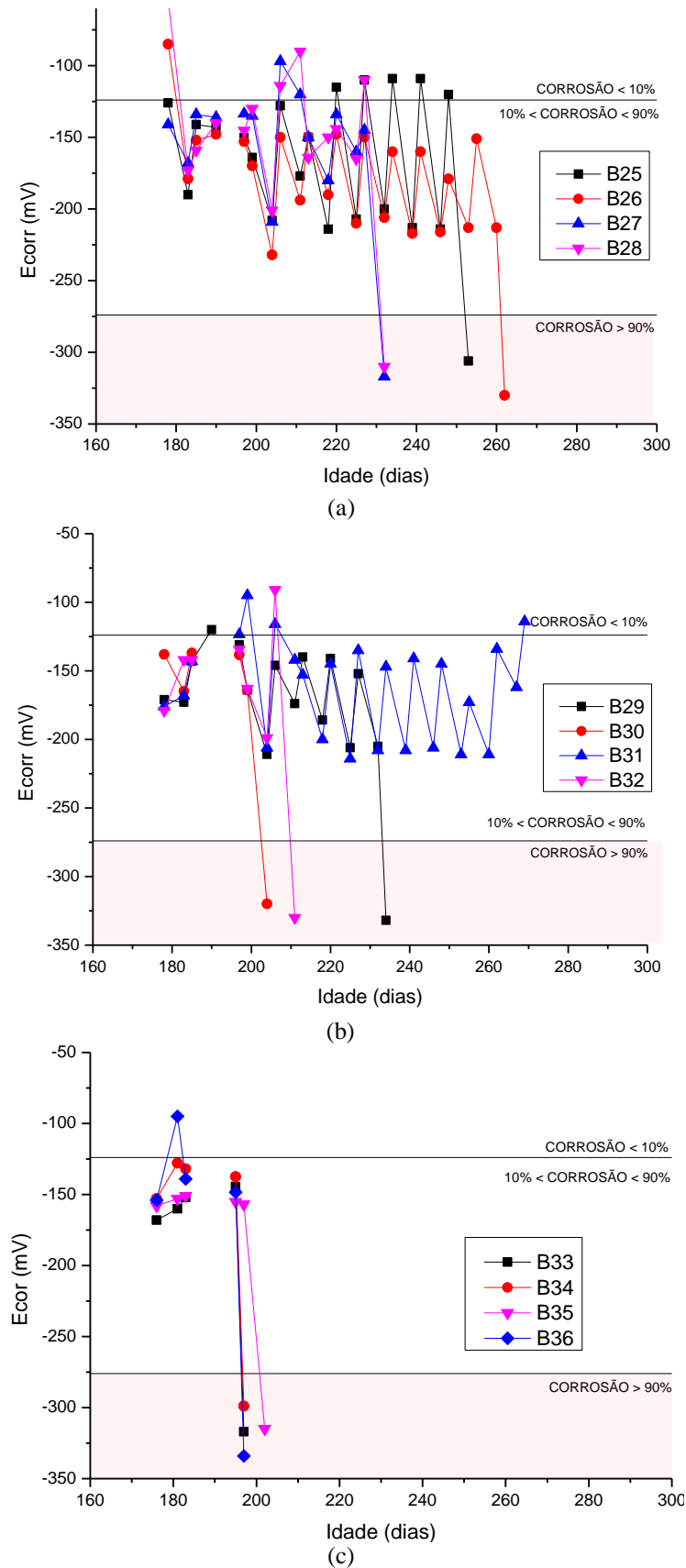


(c)

Fonte: produção da autora.



Figura 77 - Evolução do potencial de corrosão das armaduras embutidas no concreto (a) CR15 45, (b) CR15 55, (c) CR15 65.



### 4.3.3.1 Análise do potencial de corrosão após imersão

O potencial de corrosão foi avaliado estatisticamente por meio do software Statgraphics® por análise de variância (ANOVA) e por regressão múltipla. Os dados brutos coletados estão organizados na Tabela 44 e na Tabela 45 do Apêndice B.

#### 4.3.3.1.1 ANOVA - imersão

A Tabela 33 mostra a contribuição de cada variável independente sobre a variável Potencial de corrosão após imersão, com o nível de confiança de 95,0%. O valor p exibiu valor inferior a 0,05 para a variável relação a/c, portanto, esta mostrou contribuição estatisticamente significativa sobre o potencial de corrosão. O percentual de adição (%RBRO) e a interação foram não significativas.

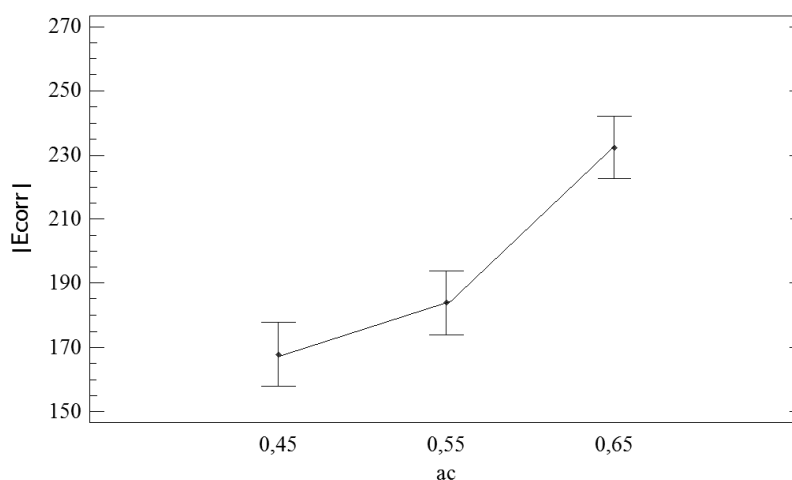
Tabela 33 - Análise de variância das variáveis a/c e % RBRO sobre o potencial de corrosão após imersão.

FONTE DE VARIAÇÃO	SQ	GL	MQ	Fcal	VALOR P	RESULTADO
a/c	217188,	2	108594,	22,44	0,0000	S
%RBRO	15616,8	3	5205,61	1,08	0,3599	NS
AB	59617,3	6	9936,21	2,05	0,0590	NS
RESÍDUOS	2,4394	24	0,101642			
ERRO	4,4389	35				

SQ - soma dos quadrados; GL – grau de liberdade; MQ – média dos quadraqudos; F – parâmetro de Fischer para o teste de significância dos efeitos; S - Efeito significativo; NS - Efeito não significativo. Fonte: produção da autora.

A Figura 79 mostra o efeito isolado da relação a/c sobre a variável dependente potencial de corrosão.

Figura 78 - Efeito isolado da variável independente relação a/c sobre o potencial de corrosão após imersão.



Fonte: produção da autora.

É notório que à medida que a quantidade de água presente na mistura de concreto cresce, o potencial de corrosão atinge valores mais negativos. Esse resultado explica a proporcionalidade entre o tempo de indução da corrosão e a relação a/c, as armaduras inseridas nas famílias de concretos com relação a/c 0,55 e 0,65 desenvolveram a corrosão mais rapidamente do que as famílias de relação a/c igual a 0,45.

#### 4.3.3.1.2 Regressão Múltipla - imersão

Foi realizada a análise de regressão múltipla com o interesse de relacionar as variáveis envolvidas. Foram inseridas as variáveis relação a/c, percentual de RBRO, idade dos concretos e as interações das mesmas. A análise partiu de um modelo saturado que englobava todas as variáveis e interações. Foram removidas as variáveis que não se encaixavam no modelo. As variáveis significativas selecionadas estão discriminadas na Tabela 34.

Tabela 34- Coeficientes da regressão para  $|E_{corr}|_{imersão}$ .

VARIÁVEIS	COEFICIENTE ANGULAR	ERRO PADRÃO	T	VALOR P	RESULTADO
CONSTANTE	334,837	72,3591	4,62744	0,0000	S
ac	-290,101	130,383	-2,22499	0,0271	S
RBRO	-230,348	55,5112	-4,14958	0,0000	S
ac*Idade*RBRO	0,90699	0,172396	5,26108	0,0000	S
RBRO/ac	36,9934	9,65085	3,83318	0,0002	S
RBRO/Idade	12444,2	3928,67	3,16752	0,0018	S

Fonte: produção da autora.

A equação 11 é o modelo encontrado para descrever a relação entre a variável potencial de corrosão em módulo  $|E_{corr}|$  (após imersão) e as variáveis independentes. O coeficiente de determinação encontrado ( $R^2$ ) foi igual a 39,92% e o R ajustado igual a 38,49%.

$$|E_{corr}|_{imersão} = 334,837 - 290,101*ac - 230,348*RBRO + 0,90699*ac*Idade*RBRO + 36,9934*RBRO/ac + 12444,2*RBRO/Idade \quad (11)$$

O coeficiente de determinação encontrado foi muito baixo, isso significa que a equação encontrada explica apenas 39,92% dos casos estudados. Por esse motivo não foi prolongada a discussão para a análise de regressão múltipla deste item. O coeficiente de determinação foi baixo possivelmente devido à alta complexidade das variáveis envolvidas, relação a/c, percentual de RBRO, e os níveis em que foram estudadas. A variável potencial de corrosão também apresenta complexidade de análise devido ao seu caráter qualitativo.

### 4.3.3.2 Análise do potencial de corrosão após secagem

#### 4.3.3.2.1 ANOVA – secagem

A Tabela 35 mostra a contribuição de cada variável independente sobre a variável Potencial de corrosão após secagem, com o nível de confiança de 95,0%. O valor p exibiu valor inferior a 0,05 para relação a/c e para a interação (a/c\*%RBRO), portanto, estas mostraram contribuição estatisticamente significativa sobre o potencial de corrosão após secagem.

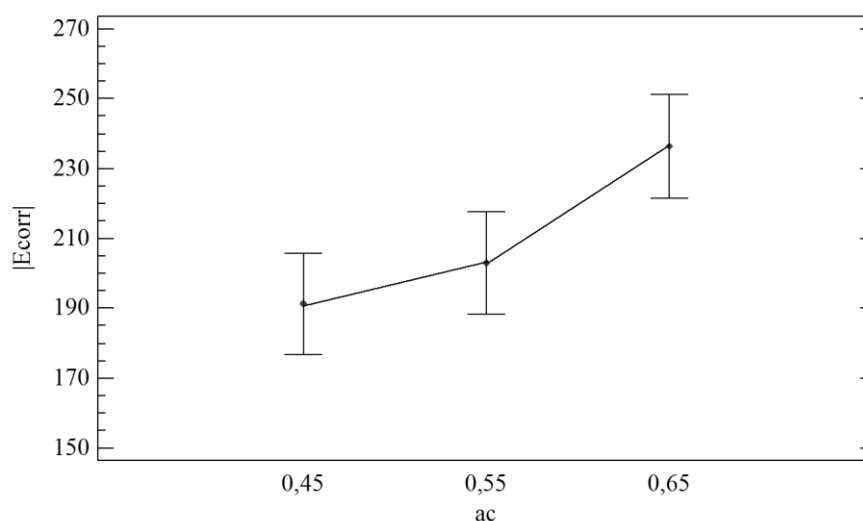
Tabela 35 - Análise de variância das variáveis a/c e % RBRO sobre o potencial de corrosão após imersão.

FONTE DE VARIACÃO	SQ	GL	MQ	Fcal	VALOR P	RESULTADO
a/c	118592,	2	59296,2	10,15	0,0001	S
%RBRO	10324,0	3	3441,34	0,59	0,6227	NS
AB	81633,4	6	13605,6	2,33	0,0326	S
RESÍDUOS	1,78215E6	305	5843,11			
ERRO	1,98861E6	316				

SQ - soma dos quadrados; GL – graus de liberdade; MQ – média dos quadraqudos; F – parâmetro de Fischer para o teste de significância dos efeitos; S - Efeito significativo; NS - Efeito não significativo. Fonte: produção da autora.

A Figura 80 mostra o efeito isolado da relação a/c sobre o módulo do potencial de corrosão. Pode-se afirmar que o potencial de corrosão é proporcional à relação a/c, quanto maior a quantidade de água no concreto maiores serão os potenciais de eletrodo atingidos.

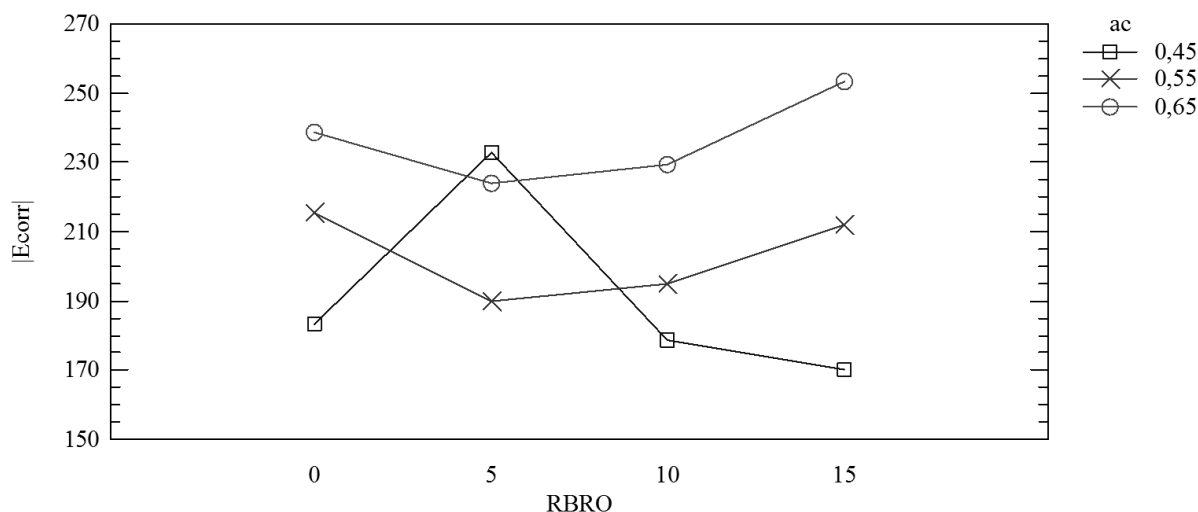
Figura 79 – Efeito isolado da variável independente relação a/c sobre o potencial de corrosão após secagem.



Fonte: produção da autora.

A Figura 81 apresenta a interação entre a relação a/c e %RBRO sobre o potencial de corrosão. Os concretos de relação a/c 0,65 e 0,55 se comportam de maneira similar, havendo diminuição no módulo do potencial de corrosão nos concretos com adição de 5% (CR5 55, CR5 65) e 10% (CR10 55, CR10 65) quando comparados com a referência (CREF 55, CREF 65). A adição de 15% de RBRO aponta o crescimento do módulo do potencial de corrosão para os concretos CR15 55 e CR15 65 quando comparados com a referência. Para as famílias de relação a/c 0,45 o gráfico apresenta um pico para os concretos CR5 45. É possível que a adição de 5% tenha proporcionado uma matriz mais porosa em virtude da dificuldade de adensamento. Todavia, a adição de 10 e 15% de RBRO (CR10 45 e CR15 45) resultou numa diminuição do potencial de corrosão quando comparados com CREF 45.

Figura 80 – Potencial de corrosão após secagem em função da interação entre a relação a/c e %RBRO



Fonte: produção da autora

#### 4.3.3.2.2 Regressão Múltipla - secagem

Foram inseridas as variáveis relação água/cimento, percentual de RBRO e idade dos concretos e as interações (a/c\*Idade\*RBRO; RBRO/a/c). A análise partiu de um modelo saturado, que englobava todas as variáveis e interações sugeridas pela autora. As variáveis que não se encaixavam no modelo foram retiradas. As variáveis significativas selecionadas estão discriminadas na Tabela 36.

Tabela 36- Coeficientes da regressão para  $|E_{corr}|_{secagem}$ .

VARIÁVEL	COEFICIENTE ANGULAR	ERRO PADRÃO	T	VALOR P	RESULTADO
Constante	-556,289	80,1516	-6,94045	0,0000	S
ac	139,701	66,1629	2,11148	0,0355	S
RBRO	-162,534	53,721	-3,02553	0,0027	S
Idade	3,41903	0,345307	9,90142	0,0000	S
ac*Idade*RBRO	0,477204	0,151841	3,14279	0,0018	S
RBRO/ac	26,6674	9,52241	2,80049	0,0054	S

Fonte: produção a autora.

A equação 12 é o modelo encontrado para descrever a relação entre a variável potencial de corrosão em módulo  $|E_{corr}|$  (após secagem) e as variáveis independentes. O coeficiente de determinação encontrado ( $R^2$ ) foi igual a 50,46% e o R ajustado igual a 49,50%.

$$|E_{corr}|_{secagem} = -556,289 + 139,701*ac - 162,534*RBRO + 3,41903*Idade + 0,477204*ac*Idade*RBRO + 26,6674*RBRO/ac + 11213,3*RBRO/Idade \quad (12)$$

O coeficiente de determinação encontrado para a análise de regressão múltipla da variável potencial de corrosão após secagem também foi baixo, conforme o encontrado para a análise do potencial de corrosão após imersão, provavelmente pelos mesmos motivos relacionados à complexidade das variáveis analisadas.

#### 4.3.4 Ensaio colorimétrico por aspensão do indicador químico nitrato de prata

A Tabela 37 mostra as médias das alturas aferidas nas superfícies de concreto ensaiadas com o indicador químico  $AgNO_3$ , aferidas por meio do software Autocad®. É possível notar que o aumento da relação a/c acarreta maior avanço da frente de cloretos, uma vez que as alturas tornam-se maiores. Esse comportamento está relacionado com a porosidade do concreto, que é proporcional à quantidade de água utilizada na sua formulação.

Tabela 37 - Alturas médias de penetração de cloretos nas famílias de concreto estudadas.

FAMÍLIA	ALTURAS MÉDIAS				
	h1 (cm)	h2 (cm)	h3 (cm)	h4 (cm)	h5 (cm)
<b>CREF 45</b>	7,98	7,12	6,59	7,56	8,31
<b>CR5 45</b>	8,03	7,48	7,02	6,58	5,90
<b>CR10 45</b>	7,75	7,35	7,14	7,42	7,81
<b>CR15 45</b>	7,14	7,42	6,79	7,38	8,08
<b>CREF 55</b>	9,66	9,21	8,75	9,39	9,43
<b>CR5 55</b>	9,54	8,96	8,54	8,25	7,77
<b>CR10 55</b>	9,53	8,71	7,61	8,72	10,24
<b>CR15 55</b>	8,62	9,03	8,63	8,69	9,06
<b>CREF 65</b>	11,09	10,59	10,47	10,30	10,87
<b>CR5 65</b>	10,67	10,46	10,27	10,16	9,74
<b>CR10 65</b>	10,64	10,13	10,24	10,66	10,86
<b>CR15 65</b>	10,78	10,84	10,32	10,78	11,32

Fonte: produção da autora.

Para determinar quais variáveis independentes, relação água/ cimento e percentual de adição de RBRO, têm um efeito estatisticamente significativo sobre a varável dependente “h”, ou altura de penetração de cloretos, foi conduzida uma análise de variância por meio da ferramenta Statgraphics®. A Tabela 38 decompõe a variabilidade da variável “h” em contribuições devidas aos fatores a/c e RBRO. Ambas as variáveis (a/c e RBRO) se mostraram significativas, somente a interação (a/c\*%RBRO) foi não significativa.

Tabela 38 – ANOVA para a análise da altura de penetração de cloretos.

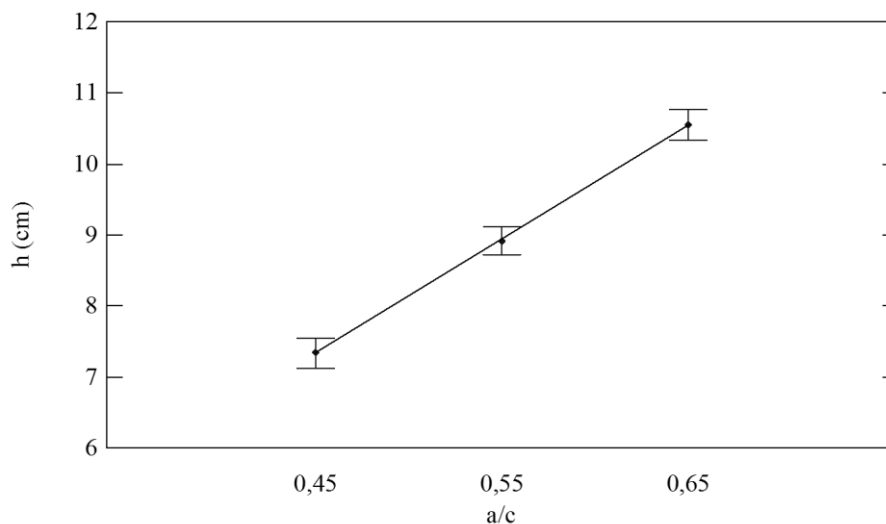
VARIÁVEIS	SQ	GL	MQ	F	VALOR P	RESULTADO
A: a/c	353,436	2	176,718	214,61	0,0000	S
B: RBRO	8,72621	3	2,90874	3,53	0,0157	S
AB	2,16158	6	0,360263	0,44	0,8532	NS
RESÍDUOS	175,39	213	0,823429			
ERRO	550,958	224				

SQ - soma dos quadrados; GL – graus de liberdade; MQ – média dos quadraquos; F – parâmetro de Fischer para o teste de significância dos efeitos; S - Efeito significativo; NS - Efeito não significativo. Fonte: produção da autora.

O efeito isolado da variável a/c sobre a altura de penetração de cloretos livres é retratado pela Figura 82. Pode-se concluir que, conforme esperado, os concretos moldados com menor quantidade de água (a/c igual a 0,45) obtiveram menor altura de penetração de cloretos

nocivos às armaduras. As alturas de penetração dos cloretos livres aumentaram conforme a relação a/c aumentou.

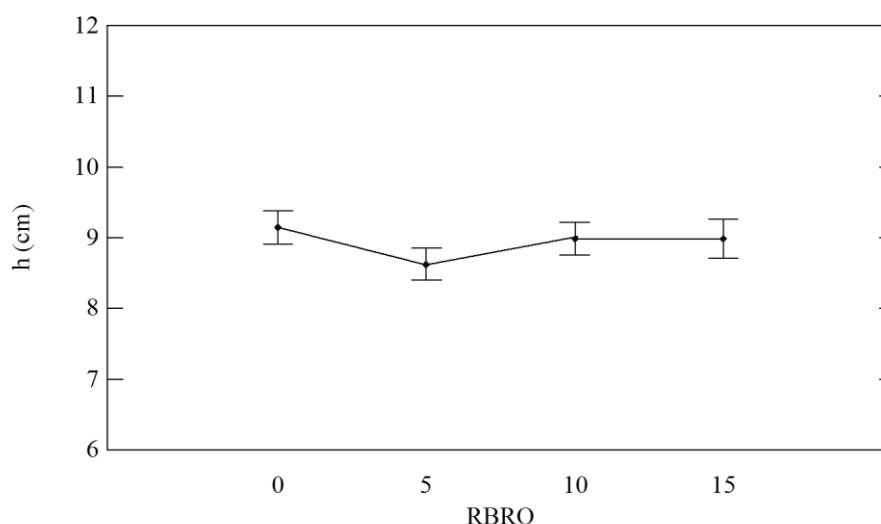
Figura 81 - Efeito isolado da variável independente relação a/c sobre a altura de penetração de cloretos.



Fonte: produção da autora.

Com relação à adição de RBRO pode-se afirmar que a quantidade de 5% de resíduo obteve melhor comportamento na altura de penetração de cloretos livres, conforme Figura 83. A adição de 5% de RBRO mostrou as menores alturas de penetração de cloretos livres para todas os níveis de a/c.

Figura 82 - Efeito isolado da variável independente %RBRO sobre a altura de penetração de cloretos.



Fonte: produção da autora.

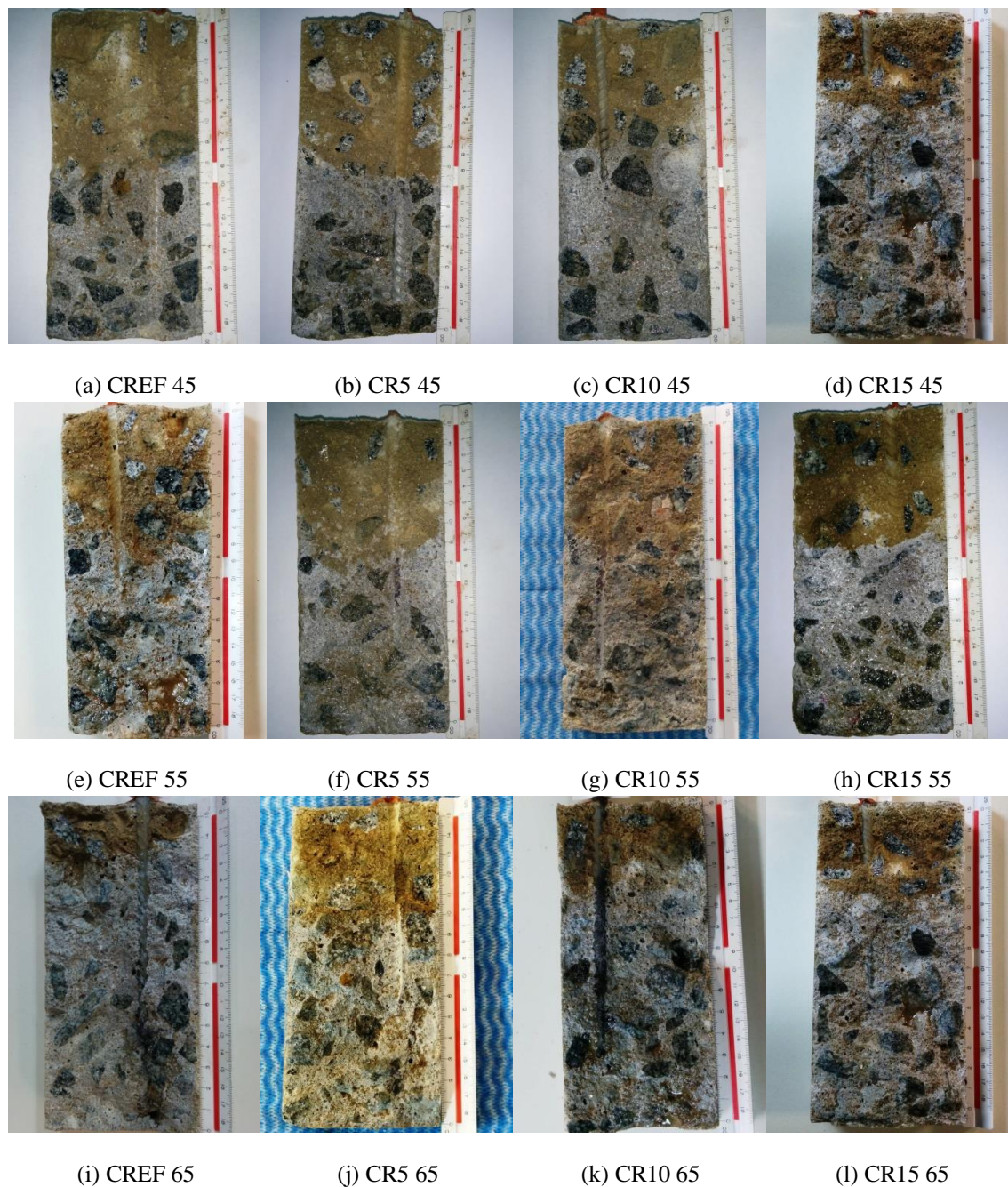
A Figura 84 mostra as superfícies de concreto após aspersão do indicador químico nitrato de prata. As imagens estão organizadas para comparação entre os concretos de mesma relação



a/c para melhor visualização da influência do percentual de RBRO. Os concretos (a) CREF 45, (b) CR5 45 e (c) CR10 45 apresentaram alturas aproximadas de cloretos livres, medidas na área de pouca modificação na cor do concreto convencional (cinza). A área marrom indica a localização de cloretos combinados, inativos no processo corrosivo. A Figura 84 (d), entretanto, mostra que a penetração de cloretos livres foi maior no concreto CR15 45 quando comparado aos concretos de mesma relação a/c. Esse fato pode estar relacionado com a dificuldade de mistura dos finos em concretos com baixas relações a/c. Quanto maior a quantidade de finos, maior a dificuldade de moldagem, uma vez que não foi utilizado aditivo plastificante.

Ainda pela figura 84 é possível notar uma pequena diferença na penetração de cloretos livres nos concretos com adição, (f) CR5 55, (g) CR10 55 e (h) CR15 55, quando comparados ao concreto de referência (e) CREF 55. Todavia, há uma diminuição da altura de cloretos livres nos concretos (j) CR5 65, (k) CR10 65 e (l) CR15 65) quando comparados ao concreto de referência (i) CREF 65. Esse comportamento pode estar associado ao preenchimento de vazios intergranulares na matriz pela adição de RBRO.

Figura 83 – Formação de duas áreas de coloração distintas na superfície dos concretos formadas pela aspersão de nitrato de prata nos concretos (a) (b) (c) e (d) de relação a/c igual a 0,45; (e).(f).(g).(e.) e (h) de relação a/c igual a 0,55; (i), (j), (l), (m) de relação a/c igual a 0,65.

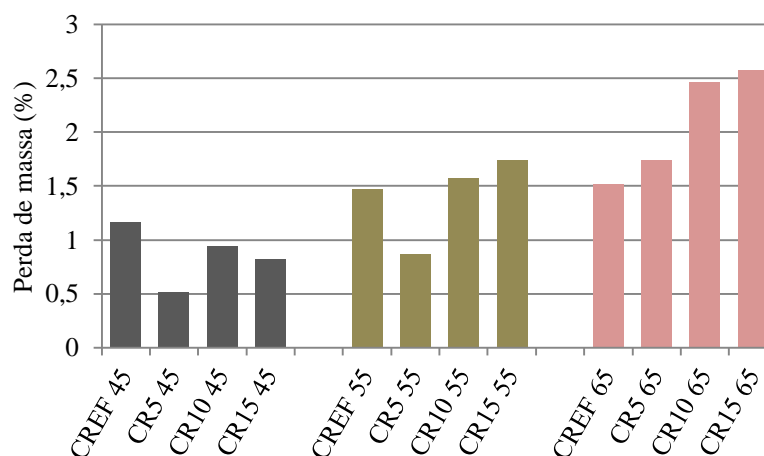


Fonte: produção da autora.

### 4.3.5 Perda de massa das armaduras

Foi constatada uma pequena perda de massa nas armaduras, conforme a Figura 85. O percentual de perda de massa aumentou à medida que cresceu a quantidade de água na mistura de concreto.

Figura 84 – Percentual de perda de massa das armaduras.



Fonte: produção da autora.

Ainda por meio da Figura 85 é possível afirmar que a adição de 5% (CR5 45 e CR5 55) é a mais interessante do ponto de vista da menor perda de massa das armaduras, pois nestes concretos a perda foi menor que a constatada nos concretos de referência (CREF 45 e CREF 55). Possivelmente esse comportamento ocorreu devido à maior rede de poros capilares dos concretos de referência, que ocasiona maior sucção capilar e maior dificuldade de perder a umidade absorvida.

Os concretos com adição de 10% e 15% de RBRO mostraram aumento na perda de massa das barras para os concretos com a/c de 0,55 e 0,65 (CR10 55, CR15 55, CR10 65 e CR15 65) quando comparados com os concretos de referência (CREF 55 e CREF 65). A perda de massa das armaduras é proporcional à propriedade relação a/c dos concretos produzidos.

A Figura 86 (“a” a “l”) mostra as fotografias tiradas com microscópio estereoscópio de barras de aço submetidas aos ciclos de indução e aceleração da corrosão. São visíveis os pites causados pelo processo de corrosão eletroquímica por contaminação de íons cloreto.

Figura 85 – Fotografias das barras após ciclos de indução e aceleração da corrosão



(a) Barra 51 - CREF 45



(b) Barra 1 - CR5 45



(c) Barra 16 - CR10 45



(d) Barra 26 - CR 15 45



(e) Barra 42 - CREF 55



(f) Barra 53 - CR5 55



(g) Barra 18 - CR10 55



(h) Barra 65 - CR 15 55



(i) Barra 59 - CREF 65



(j) Barra 12 - CR5 65



(k) Barra 16 - CR10 65



(l) Barra 26 - CR 15 65

Fonte: produção da autora.

*Capítulo 5*  
**Conclusão**

---

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho representa uma contribuição ao estudo de durabilidade do concreto armado submetido à contaminação por íons cloreto. Foram avaliadas famílias de concreto produzidas com adição de teores de resíduo proveniente do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO). Foi examinada a consistência do concreto por meio do abatimento de tronco de cone e a sua massa específica no estado fresco. No estado endurecido foram investigadas sua resistência à compressão axial na idade de 28 dias, sua absorção de água por imersão e fervura e sua absorção capilar. O potencial de corrosão foi aferido em armaduras inseridas nas diferentes categorias de concretos, também foi avaliada a penetração de cloretos por meio do indicador químico nitrato de prata e a perda de massa das armaduras ensaiadas.

O objetivo do trabalho foi avaliar a influência do aproveitamento do RBRO como adição mineral em sua condição natural, em concretos estruturais expostos a ambientes de forte agressividade ambiental – Classe III, de acordo com a classificação estabelecida na NBR 6118 (ABNT, 2014). Pode-se concluir de forma geral que o emprego do RBRO na construção civil é praticável para a produção de concretos estruturais expostos à ação de íons cloreto. Neste capítulo serão apresentadas as conclusões específicas desta pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros.

### 5.1 CONCLUSÃO GERAL

O material proveniente do beneficiamento de rochas ornamentais produzido por meio de teares de fios diamantados é um sólido pulverulento cuja superfície específica ( $6179,3 \text{ m}^2/\text{kg}$ ) é 38,6% maior que a do cimento Portland utilizado nesta pesquisa ( $4459 \text{ m}^2/\text{kg}$ ). Portanto, os grãos de RBRO possuem diâmetro menor que os grãos do CPV ARI. 90% dos grãos de RBRO têm diâmetro menor que  $30 \mu\text{m}$  e 10% dos grãos são menores que  $1,5 \mu\text{m}$ . Existem, entretanto alguns grãos de RBRO na ordem de  $60 \mu\text{m}$ .

Sua composição química tem predominância de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e feldspato alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Em virtude das suas composição química e finura, o resíduo foi testado em seu índice de atividade pozolânica conforme NBR 12653 (ABNT, 2012) para a Classe E. Entretanto, o RBRO não apresentou resultados dentro dos limites estabelecidos para reatividade com a cal e com o cimento. A não reatividade do RBRO foi confirmada pela sua caracterização mineralógica, a qual exibiu formações cristalinas de sílica, compostos quimicamente estáveis de baixa

reatividade. Por esse motivo o RBRO tal como utilizado nesta pesquisa pode ser utilizado em matrizes cimentícias como adição mineral para preenchimento de poros intergranulares.

Os resultados encontrados a partir do programa experimental proposto neste trabalho demonstraram que a adição mineral RBRO em concretos para finalidade estrutural pode ser utilizada em baixos teores. A utilização de RBRO traz benefícios de ordem ambiental visto que proporciona um destino útil para o material que é descartado pelas empresas de beneficiamento de rochas ornamentais em todo o Brasil.

O teor de 5% de adição de RBRO, em relação à massa do material cimentício, proporcionou desempenho equivalente ao concreto de referência quanto à propriedade de resistência à compressão axial. Também demonstrou ser benéfico na propriedade de absorção de água por imersão e fervura, principalmente para os concretos com relação a/c 0,55.

No ensaio de monitoramento do potencial de corrosão dos concretos notou-se que o tempo de indução da corrosão das armaduras embutidas em concretos com adição de RBRO foi maior do que o tempo apresentado pelos concretos de referência. A variável relação a/c é a maior responsável pela manutenção dos potenciais abaixo do limite de 90% de probabilidade de haver corrosão no eletrodo (armadura).

A avaliação da frente de cloretos por meio do ensaio colorimétrico confirmou o benefício trazido pela incorporação de 5% de RBRO nas formulações, sendo esta proporção capaz de diminuir a altura de penetração dos íons. A perda de massa das armaduras inseridas em concretos com esse teor de RBRO também foi menor do que a perda de massa das armaduras inseridas nos concretos de referência, salvo os concretos com relação a/c 0,65, por serem muito porosos.

## **5.2 CONCLUSÕES ESPECÍFICAS**

### **5.2.1 Concreto em seu estado fresco**

A produção dos concretos com adição dos teores de 5, 10 e 15% de RBRO seguiu o mesmo método de produção dos concretos de referência. O aumento do teor de finos nas misturas não culminou na necessidade de utilização de aditivo superplastificante para a correção da consistência. Todavia, houve alteração no ensaio de abatimento de tronco de cone, o abatimento diminuiu nos concretos das famílias de relação a/c igual a 0,45 e 0,55, conforme o teor de adição aumentou. O mesmo não ocorreu nos concretos de relação a/c 0,65. Nesses, o

abatimento aumentou com a adição de 5% e 10% de RBRO, em relação à referência. O abatimento voltou a diminuir com a adição de 15%, na família CR15 65. A adição de 5% e 10% de RBRO atreladas à relação a/c de 0,65, causou um efeito semelhante à diluição do cimento, ou seja, houve aumento do abatimento.

O ensaio de abatimento de tronco de cone é um procedimento rápido e barato, excelente para análise da consistência do concreto em canteiro de obras. Entretanto, para aumentar a compreensão da influência da incorporação de RBRO na consistência de matrizes cimentícias, a propriedade deve ser mais bem avaliada por meio de aparelhos refinados, tais como viscosímetros ou reômetro.

A propriedade massa específica dos concretos no estado fresco também é influenciada pela adição mineral. Por meio da ANOVA, foi possível observar que a relação a/c está fortemente relacionada com a massa específica do concreto. O percentual de RBRO, por sua vez, só exerce alguma influência sobre a massa específica dos concretos quando associado à relação a/c. A massa específica dos concretos estudados tende a diminuir com o aumento do teor de RBRO. Esse comportamento ocorre principalmente nas famílias de relação a/c igual a 0,45 (CREF 45, CR5 45, CR10 45 e CR15 45). Isso pode estar relacionado ao aumento do conteúdo de ar nas misturas em função da dificuldade de moldagem, visto que os concretos de relação a/c 0,45 possuem menor quantidade de água do que os concretos com relação a/c 0,55 e 0,65.

### **5.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL**

A propriedade mecânica de resistência à compressão axial é a característica do concreto mais investigada pela indústria da construção civil. Essa propriedade foi abordada neste trabalho para que servisse de medida de referência para a análise dos resultados de durabilidade e como um parâmetro de controle da produção, de forma a garantir que os concretos produzidos se comportassem conforme os concretos utilizados na indústria. A resistência à compressão axial dos concretos está atrelada ao objetivo da pesquisa, que foi avaliar os parâmetros de durabilidade dos concretos produzidos com adição de RBRO.

A utilização do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais como adição nos concretos, mostrou-se significativa no estudo estatístico da propriedade de resistência à compressão axial. Os resultados de ambas as análises efetuadas, ANOVA e regressão múltipla, mostraram



que as variáveis %RBRO e relação a/c são significativas no desenvolvimento dessa propriedade.

Notou-se que a adição no teor de 5% (CR5 45, CR5 55 e CR5 65) obteve desempenho superior na resistência à compressão axial quando comparados ao desempenho alcançado pelas famílias de referência. Houve incremento de 7% da resistência à compressão nos concretos CR5 45 e 8% nos concretos CR5 65. As demais famílias (CR10 45, CR10 55, CR10 65, CR15 45, CR15 55 e CR15 65) mostraram declínio nos valores de resistência à compressão, entretanto, todas alcançaram resistências médias superiores a 30 MPa.

A modelagem por regressão múltipla evidenciou que a variável resposta resistência à compressão axial ( $y$ ) pode ser prevista pelas variáveis independentes ( $x_i$ ) %RBRO, relação a/c e pela interação das mesmas com alto coeficiente de determinação (94,45%). A curva produzida a partir da equação encontrada segue a tendência da curva de Abrams, ou seja, a medida que a relação a/c aumenta a resistência do concreto diminui numa tendência exponencial. Dessa forma, é possível antecipar com confiabilidade a propriedade de resistência à compressão axial dos concretos produzidos com a utilização de adição de RBRO.

Mais estudos são interessantes para ampliar a compreensão da influência da adição RBRO sobre a resistência à compressão de concretos produzidos com outros tipos de cimento Portland visando também a construção de diagramas de dosagem e desempenho.

## **5.4 ENSAIOS DE DURABILIDADE**

### **5.4.1 Absorção de água por imersão e fervura**

A variável absorção de água dos concretos aumentou para os concretos de relação a/c 0,45 à medida que o conteúdo de RBRO aumentou. Possivelmente houve aumento dos poros de ar aprisionado devido à baixa quantidade de água na formulação. Para os concretos com relação a/c 0,55 o aumento de finos não acarretou aumento da absorção de água, os concretos produzidos obtiveram desempenho equivalente ou superior ao concreto de referência CREF 55 na propriedade de absorção de água por imersão. Os concretos com relação a/c 0,65, por sua vez, apresentaram menor absorção de água à medida que o teor de finos aumentou. Possivelmente o RBRO contribuiu com a descontinuidade da estrutura de poros desses concretos.

Ambas as variáveis analisadas por meio de ANOVA, relação a/c, %RBRO e a interação a/c\*%RBRO foram significativas na propriedade de absorção de água por imersão e fervera dos concretos produzidos. Foi constatada uma modificação na estrutura de poros dos concretos produzidos especialmente nas famílias de relação a/c 0,55 e 0,65. A adição de 5% e 10% de RBRO demonstrou diminuir a absorção de água dos concretos, principalmente nas famílias CR5 55 e CR10 55.

#### **5.4.2 Absorção de água por capilaridade**

A análise de variância demonstrou que as variáveis relação a/c, %RBRO e interação a/c\*%RBRO sobre a variável resposta absorção de água por capilaridade dos concretos ensaiados não explicam a variabilidade dos dados. O resultado foi não significativo para todas as variáveis. É possível concluir que os vazios capilares não preenchidos pela pasta de cimento hidratada não foram ocupados pelos sólidos de RBRO adicionados às misturas nos teores estudados.

A influência da relação a/c não foi detectada sobre a variável resposta possivelmente por se tratarem de concretos com 28 dias de idade. O volume de poros capilares ainda pode ser reduzido devido à hidratação do cimento anidro.

#### **5.4.3 Potencial de Corrosão**

##### **5.4.3.1 Potencial de corrosão após imersão**

A variável relação a/c foi significativa na análise de variância do potencial de corrosão após imersão. A adição de RBRO e a interação entre as variáveis independentes (a/c\*%RBRO) foram não significativas. Foi possível observar que as famílias de relação a/c 0,65 foram as primeiras a apresentar potenciais de corrosão mais negativos do que -276 mV, atingindo mais rapidamente a área de probabilidade maior que 90% de haver corrosão. Quanto menor a relação a/c maior é o tempo de indução da corrosão, ou seja, concretos menos porosos contribuem para a manutenção dos potenciais de eletrodo fora da área de maior probabilidade de corrosão.

A análise de regressão múltipla da variável potencial de corrosão após imersão considerou todas as variáveis envolvidas significativas, todavia, conduziu a um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) muito baixo. A equação gerada só é capaz de explicar 39,92% dos casos estudados devido à complexidade da análise por técnicas eletroquímicas.

De uma forma geral, pode-se afirmar que os teores de RBRO aumentaram o tempo de indução da corrosão das armaduras dos concretos em relação aos concretos de referência. Os concretos com incorporação de RBRO permaneceram mais tempo fora da área de probabilidade maior que 90% de haver corrosão nas armaduras. Os concretos de referência CREF 45 e CREF 55 desenvolveram o processo de corrosão eletroquímica mais rapidamente que os concretos produzidos com adição. A adição de RBRO pode ter contribuído com a descontinuidade da estrutura de poros dos concretos.

Vale lembrar que a rede de poros capilares é maior nos concretos com baixa relação a/c. Essa característica pode influenciar a capacidade de absorção capilar e maior dificuldade de perder a umidade absorvida. Logo, apresentam o processo corrosivo mais rapidamente do que os concretos com adição.

#### **5.4.3.2 Potencial de corrosão após secagem**

As variáveis relação a/c e a interação a/c\*%RBRO foram significativas na análise de variância do potencial de corrosão após secagem. A adição de RBRO, associada à relação a/c, pode ter contribuído com a descontinuidade da estrutura de poros dos concretos.

A análise de regressão múltipla considerou todas as variáveis envolvidas significativas, todavia, também conduziu a um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) muito baixo. A equação gerada só é capaz de explicar 50,46% dos casos estudados devido à complexidade da análise por técnicas eletroquímicas.

#### **5.4.4 Ensaio colorimétrico**

O ensaio colorimétrico conduzido por meio do indicador químico nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ ) mostrou resultados significativos do ponto de vista estatístico. A ANOVA constatou a significância das variáveis relação a/c e %RBRO em sua influência sobre a variável de “h”, penetração de cloretos livres. Os concretos das famílias que continham 5 % de adição de RBRO mostraram as menores alturas de penetração dos íons agressivos, confirmando os outros resultados significativos para este teor de adição.

#### **5.4.5 Perda de Massa**

A perda de massa das armaduras é proporcional à propriedade relação a/c dos concretos produzidos. Ou seja, os concretos de relação a/c 0,55 e 0,65, devido à sua maior porosidade,

apresentaram armaduras com maiores perdas de massa do que os concretos de relação a/c 0,45. A adição de 5% de RBRO mostrou-se a mais interessante no critério perda de massa, pois nestes concretos a perda foi menor que a constatada nos concretos de referência.

*Capítulo 6*  
**Considerações Finais**

---

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A produção de concretos com adição de RBRO provocou decréscimo no abatimento de tronco de cone das misturas na medida em que cresceu o teor de finos, devido ao formato anguloso e irregular dos grãos. O abatimento ( $70 \pm 10\text{mm}$ ) foi alcançado em todas as misturas de referência. Para as misturas com relação a/c 0,65 os teores de 5, 10 e 15% aumentaram o abatimento do concreto.

Houve diminuição da massa específica nos concretos com adição quando comparados ao concreto de referência, entretanto, para o teor de 5 % houve um aumento nessa variável nas famílias de concreto com relação a/c 0,55 e 0,65. A adição de 5 % de RBRO também se mostrou benéfica para o concreto do ponto de vista mecânico, nos resultados de resistência à compressão axial, e sob a ótica da durabilidade, nos resultados de absorção por imersão e fervura, no ensaio colorimétrico por meio de indicador químico  $\text{AgNO}_3$  e na perda de massa das armaduras.

Com relação aos ensaios de potencial de corrosão, pode-se concluir que a variável de maior influência sobre a qualidade do concreto é a variável relação a/c. Quanto menor a relação a/c, menor é a sua porosidade e maior é sua capacidade de proteger as armaduras frente à ação dos íons cloreto. As baixas relações a/c também proporcionam maior capacidade de absorção capilar, característica que pode facilitar o acesso de cloretos ao interior do concreto. Logo, a produção de concretos com baixas relações a/c e baixos teores de adição de RBRO podem proporcionar maior proteção física para as armaduras embutidas em estruturas de concreto armado expostas a ambientes marinhos. Fica, portanto, comprovada a hipótese de que a utilização de RBRO como adição mineral na fabricação de concretos para fins estruturais pode torná-los menos susceptíveis à frente de cloretos.

## 6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudo da consistência do concreto com adição de RBRO por meio de equipamentos refinados tais como viscosímetro e reômetro.
- Estudo do processo de hidratação do cimento em argamassas com adição de teores até 5% de RBRO.
- Estudo da durabilidade de concretos com vários teores de adição de RBRO fixando-se a relação a/c em 0,55.
- Estudo de concretos com substituição de agregado miúdo por BRRO.
- Estudo da ação conjunta da carbonatação e frente de cloreto em concretos com adição de 5% de RBRO.
- Estudo da microestrutura por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) de concretos formulados com adição de RBRO sob contaminação de íons cloreto.
- Estudar a possibilidade da utilização de RBRO para a produção de cimentos, devido à sua composição química, 85% de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ , matérias-primas necessárias para produção do aglomerante.
- Estudar a possibilidade de reação destrutiva álcali agregado devido ao alto teor de álcalis na composição do RBRO.

*Referências Normativas e  
Bibliográficas*

---



## REFERÊNCIAS NORMATIVAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-157**. Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-490**. Standard practice for use of apparatus for the determination of length change of hardened cement paste, mortar and concrete, 2004.

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **ASTM - C 1202**. Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **ASTM – G1**. Standard practice for prepreparing, cleaning and evaluating corrosion test specimens. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733** - Cimento Portland de alta resistência inicial – Especificação. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738** - Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 5751** - Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com a cal. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 5752** - Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com o cimento. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118** - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 6211** - Corrosão atmosférica - Determinação de cloretos na atmosfera pelo método da vela úmida. . Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211** – Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215** - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_. **NBR 7218** - Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 9202** - Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da finura por meio da peneira 0,044 mm (nº 325) - Método de ensaio. São Paulo, 1985.

\_\_\_\_\_. **NBR 9778** - Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 9779** - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade, Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 9833** - Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 10004**. Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 10007**. Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 11579** - Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (nº 200) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 12653** - Materiais pozolânicos – Especificação. Rio de Janeiro. 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 14656** - Cimento Portland e matérias-primas - Análise química por espectrometria de raios X - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR 15575** - Coletânea de Normas Técnicas – Edificações Habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 15**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 18** - Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 23** – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

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

\_\_\_\_\_. **NBR NM 76** – Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248** – Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2009.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKBULUT, H.; GÜRER, C. Use of aggregates produced from marble quarry waste in asphalt pavements. **Building and Environment**, v.42, p.1921-1930. 2007.

ALMEIDA, N; BRANCO, F.; BRITO, J.; SANTOS, J. R. High-performance concrete with recycled stone slurry. In: **Cement and Concrete Research**. v. 37, p. 210–220, 2007.

ALMEIDA, N.; BRANCO, F.; SANTOS, J.R. Recycling of stone slurry in industrial activities: Application to concrete mixtures. **Building and Environment**. V.42. p. 810–819. 2007.

AL-AKHRAS, N.M.; ABABNEH, A.; ALARAJI, W.A. Using burnt stone slurry in mortar mixes. **Construction and Building Materials**. 24, p. 2658-2663. 2010.

ANDRADE, C.; BUJÁK, R. Effects of some mineral additions to Portland cement on reinforcement corrosion. **Cement and Concrete Research**.v.53.p. 59-67. 2013.

ANDRADE, C.; GONZALEZ, J. A. Tendencias Actuales en la Investigación sobre Corrosion de Armaduras. **Informes de la Construcción**, v. 40, m. 398, p.7-14, 1988.

ANDRADE, C.; PRIETO, M.; TANNER, P.; TAVARES, F.; D`ANDREA, R. Testing and modeling chloride penetration into concrete. **Construction and Building Materials**. 39. P. 9-18. 2013.

BABAEI, K. **Evaluation of Half-Cell Corrosion Detection Test for Concrete Bridge Decks: final report**. Seattle, Washington State Department of Transportation, 1986.

BARROS, Alexandre R.; GOMES, Paulo C. C.; BARBOZA, Aline S. R.; SILVA, João L. **Estudos e resultados sobre a utilização do resíduo do corte do mármore e granito em materiais à base de cimento**. In: XI ENTAC - Encontro Nacional do Ambiente Construído. Florianópolis. 2006.

BIJEN, J. M. Maintenance and Repair of Concrete Structures. **Heron**, v. 34, n.2, 1989.

CALMON, J. L. Resíduos industriais e agrícolas. In: Isaia, Geraldo Cechella. (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 1 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2007, v. 2, p. 1590-1627.

CALMON, J. L.; SILVA, S. A. C. Mármore e granito no Espírito Santo: problemas ambientais e soluções. In: Domingues, A. F.; Boson, P. H. G.; Alípaz, S. (Org.). **A gestão dos recursos hídricos e a mineração**. Brasília. Agência Nacional das Águas e Instituto Brasileiro de Mineração. Capítulo 5, p. 199-231, 2006.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. **Desempenho de edificações habitacionais: guia orientavo para atendimento à norma ABNT NBR 15575/2013**. Brasília, DF, 2013, 308p.

CAO, C.; CHEUNG, M.M.S.; CHAN, B.Y.B. Modelling of interaction between corrosion-induced concrete cover crack and steel corrosion rate. In: **Corrosion Science**. V.69. p. 97-109. 2013.

CARRIJO, P. M. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. Dissertação (Mestrado). Engenharia Civil, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

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

CHI-CONG KOU; CHI-SUN POON; AGRELA, Francisco. Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of diferente admixtures. **Cement & Concrete Composites**. V.33, p. 788-795. 2011.

CHINDAPRASIRT, P.; RUKZON, S.; SIRIVIVATNANON, V. Effect of carbon dioxide on chloride penetration and chloride ion diffusion coefficient of blended Portland cement mortar. **Construction and Building Materials**. v.22. p. 1701-1707. 2008.

CHIODI FILHO, C. **Balanco das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais e de Revestimento em 2012**. Informe 01/2013. ABIROCHAS. Minas Gerais. 2013. Disponível em: <<http://www.abirochas.com.br>>. Acesso em: 05 de fevereiro de 2013.

CHIODI FILHO, C. **Balanco da Produção Mundial e do Comércio Internacional de Rochas Ornamentais em 2011**. Informe 011/2012. ABIROCHAS. Minas Gerais. 2013. Disponível em: <<http://www.abirochas.com.br>>. Acesso em: 10 de março de 2013.

CHIODI FILHO, C. **Balanco das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais e de Revestimento em 2012**. Informe 01/2014. ABIROCHAS. Minas Gerais. 2014. Disponível em: <<http://www.abirochas.com.br>>. Acesso em: 01 de setembro de 2014.

CHIODI FILHO, C.. **Panorama mundial do setor de rochas ornamentais e de revestimento em 2013**. Informe 13/2014. ABIROCHAS. Minas Gerais. 2014. Disponível em: <<http://www.abirochas.com.br>>. Acesso em: 29 de março de 2015.

CHIODI FILHO, C. **Balanco das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais em janeiro de 2015**. Informe 02/2015. ABIROCHAS. Minas Gerais. 2015. Disponível em: <<http://www.abirochas.com.br>>. Acesso em: 29 de março de 2015

CHIODI FILHO, C.; CHIODI, D.K. **Perfil de rochas ornamentais e de revestimento**. **Boletim Técnico 33**. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. 2009. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 30 mar. 2015.

CORDEIRO, G.C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e de casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. 2006. 445 f. Tese (Doutorado) COPPE-Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

CORDEIRO, G.C.; TOLEDO FILHO,R.D.; FAIRBAIRN, E.M.R. Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash. **Construction and Building Materials**. 23. p. 3301–3303. 2009.

CHENG, A.; LIN, W.; HUANG, R. Application of rock wool waste in cement-based composites. **Materials and Design**. 32. P.636-642. 2011.

DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com adição de microsilica**. 1995. Tese de D.Sc., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 286 p. 1995.

DAL MOLIN, D. C. C.. **Técnicas experimentais para estudo da microestrutura**. In: Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. Ed. G.C.Isaia. 1ed. IBRACON, 2010. 1v. p.405-438.

DAL MOLIN, D. C. C.. **Adições Minerais**. In: Concreto: Ciência e Tecnologia. Ed. G.C.Isaia. 2 ed. São Paulo, IBRACON, 2011. 1v. p.261-309.

DEBIEB,F; COURARD,L.; KENAI, S.; DEGEIMBRE, R. Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates. **Cement & Concrete Composites**, v.32 , p.421–426. 2010.

DELLINGHAUSEN, L.M.; GASTALDINI, A.L.G.; ISAIA, G.C.; VEIGA, K.K. Retração total e penetração de cloretos com Cimento Portland Branco e escória de alto forno. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 49-65, out./dez. 2009.

EUROSTAT. **Waste Statistics 2010**. European Commission. 2013 .Disponível em: <ec.europa.eu >. Acesso em: 19 set. 2014.

FERREIRA, R.B. **Influência das adições minerais nas características do concreto de cobrimento e seu efeito na corrosão da armadura induzida por cloretos**. 2003. Pag. 244. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

FARIA K.C.P.; GURGEL, R.F.; HOLANDA, J.N.F. Recycling of sugarcane bagasse ash waste in the production of clay bricks. **Journal of Environmental Management**. 101. p.7-12. 2012.

FIGUEIREDO, C.P.; SANTOS,F.B.; CASCUDO, O.; CARASEK, H.; CACHIM, P.; VELOSA, A. Papel do metacaulim na proteção dos concretos contra a ação deletéria de cloretos. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v.7. n.4 p.685-708. 2014.

FIGUEIREDO, E.J.P. **Ação dos cloretos no concreto**. In: Concreto: Ciência e Tecnologia. Ed. G.C.Isaia. 1ed. IBRACON, 2011. 1v. p.887-901. 2011.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. Ed. Guanabara Dois S.A. 2ed. Rio de Janeiro.1982. 453p.

GJØRV, O.E.; VENNESLAND, O.; EL-BUSAIDY, A.H,S. Diffusion of Dissolved Oxygen Through Concrete. **Materials Performance**, v.25, n.12, p.39-44, 1986.

GONÇALVES, J.P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos**. Dissertação (Mestrado). Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.

HE, F.; SHI, C.; YUAN, Q.; CHEN, C.; ZHENG, K. AgNO<sub>3</sub>- based colorimetric methods for measurement of chloride penetration in concrete. **Construction and Building Materials**. V. 26, p. 1-8. 2012.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. Pini; Brasília, DF.SENAI, 1992.

HIGASHIYAMA, H.; SAPPAKITTIPAKORN,M.; SANO, M.; YAGISHITA,F. Chloride ion penetration into mortar containing ceramic waste aggregate. **Construction and Building Materials**, v.33, p. 48–54. 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Indicadores de Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: < www.ibge.gov.br>. Acesso em: 17 set. 2014.

JANI, Y.; HOGLAND, W. Waste glass in the production of cement and concrete – A review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 2, p.1767-1775. 2014.

JAYAPALAN, A. R.; LEE, B.Y.;KURTIS, K.E. Can nanotechnology be green? Comparing efficacy of nano and mocoparticles in cimenticious particles. In: **Cement & Concrete Composites**. V.36. p. 16-24. 2013.

JOUDI-BAHRI, I.; LECOMTE, A.; QUEZDOU, M.B.; ACHOUR, T. Use of limestonesands and fillers in concrete without superplasticizer. **Cement and Concrete Composites**, v.34, p.771-780. 2012.

LAWRENCE P.; CYR, M.; RINGOT, E. Mineral admixtures in mortars: effect of inert materials on short-term hydration. **Cement and Concrete Research**, v.33, p.1939-1947. 2003.

LEE, Ming-Yu. *et alli*. Artificial stone slab production using waste glass, stone fragments and vacuum vibratory compaction. **Cement & Concrete Composites**, v.30. p. 583-587. 2008.

LI, Y.; YU, H.; ZHENG, L.; WEN,J; WU, C.; TAN,Y. Compressive strength of fly ash oxychloride cement containing granite wastes. **Construction and Building Materials**,v.38, p.1-7. 2013.

LIMA, P.R.; LEITE, M.B.; SANTIAGO, E.Q.R. Recycled lightweight concrete made from footwear industry waste and CDW. **Waste Management**, v.30, p.1107-1113, 2010.

LORYUENYONG, V.; PANYACHAI, T.; KAEWSIMORK, K.; SIRITAI, C. Effects of recycled glass substitution on the physical and mechanical properties of clay bricks. **Waste Management**. v29. p. 2717-2721. 2009.

MÁLIA, M.; BRITO, J.; PINHEIRO, M.D.; BRAVO, M. Construction and demolition waste indicators. **Waste Management and Research**, v.31, p.241-255. 2013.

- MARÇAL, R. L. S. B.. **Fabricação de vidros especiais a partir de resíduos da indústria de rochas ornamentais**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Ciência dos Materiais. Instituto Militar de Engenharia, 2011.
- MÁRMOL, I; BALLESTER, P.; CERRO, S.; MONRÓS, G.; MORALES, J.; SÁNCHEZ, L. Use of granite sludge wastes for the production of coloured cement based mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, p. 617-622. 2010.
- MATOS, A.M.; SOUSA-COUTINHO, J. Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. **Construction and Building Materials**, v.36. p.205-215. 2012.
- MORAES, S.G. **A capacidade de proteção de cobrimento de concretos com elevados teores de escória de alto forno: avaliação da corrosão das armaduras**. 2008. 167f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFES, Vitória. 2008.
- SILVA, T. J. **Mecanismos de transporte de massa** In: **Concreto: Ciência e Tecnologia**. Ed. G.C.Isaia. 1ed. IBRACON, 2011. 1v. p.809-847. 2011.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutural, propriedades e materiais**, 3 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, p. 674, 2008.
- MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 5ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 521 p. ISBN
- MOREIRA, J.M.S.; MANHÃES, J.P.V.T.; HOLANDA, J.N.F. Processing of red ceramic using ornamental rock powder waste. **Journal of Materials Processing Technology I**, v.96, p.88-93. 2008.
- MUTHULINGAM, S.; RAO, B.N. Non-uniform time-to-corrosion initiation in steel reinforced concrete under chloride environment. In: **Corrosion Science**. V.82. p.304-3015. 2014.
- NIELSEN, E. P.; GEIKER, M.R. Chloride diffusion in partially saturated cementitious material. **Cement and Concrete Research**. v.33. p.133-138. 2003.
- NITA, C.; JOHN, V.M. **Materiais pozolânicos: o metacaulim e a sílica ativa**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. BT/PCC/451. ISSN 0103-9830. São Paulo, SP, 2007.
- OIKONOMOU, N.; MAVRIDOU, S. Improvement of chloride ion penetration resistance in cement mortars modified with rubber from worn automobile tires. **Cement and Concrete Composites**, v31, p. 403-407. 2009.
- OZGA, I.; BONAZZA, A.; BERNARDI, E.; TITTARELLI, F.; FAVONI, O.; GHEDINI, N.; MORSELLI, L.; SABBIONI, C. Diagnosis of surface damage induced by air pollution on 20th-century concrete buildings. **Atmospheric Environment**, v.45, p.4986-4995. 2011.
- POLITO, G. **Corrosão em estruturas de concreto armado: causas, mecanismos, prevenção e recuperação**. 2006. Pag.191. Dissertação (Especialização em Avaliação e Perícia) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

RAMANATHAN, L.V. **Corrosão e seu controle**. Ed.Hemus s.d. São Paulo.

REIS, A.S. **Estudo do aproveitamento do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais na fabricação de ladrilho hidráulico piso tátil**. 2008. Pag. 218. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008.

RIBEIRO, D.V.; LABRINCHA, J.A.; MORELLI, M.R. Effect of the addition of red mud on the corrosion parameters of reinforced concrete. **Cement & Concrete Research**. 42. P.124-133. 2012.

RIBEIRO, D.V.; LABRINCHA, J. A.; MORELLI, M.R. Efeito da adição da lama vermelha na corrosibilidade do concreto armado avaliado por meio de técnicas eletroquímicas. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v.5, n4, p.451-467. 2012.

RIBEIRO, D.V.; SALES, A.; SOUZA, C.A.C.;ALMEIDA, F.C.R.; CUNHA, M. P.; LOURENÇO, M.Z.; HELENE, P. **Corrosão em estruturas de concreto armado: Teoria, controle e métodos de análise**. 1.ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. 272p.

SINGH, Ramesh. Hapter One – Need for the Study of Corrosion. **Corrosion Control for Offshore Structures**, v., p.3-6, 2014.

SIM, J.; PARK, C. Compressive strength and resistance chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate. **Waste Management**. 31. p. 2352-2360. 2011.

SOARES, Rubielly Bastos. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com a incorporação de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais**. 2014. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

SOUZA FILHO, M.L.S. **A utilização de co-produtos da siderurgia e da indústria de beneficiamento de rochas ornamentais na produção de tijolos prensados**. 2005.218f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2005.

SOUZA, A.J.; PINHEIRO, B.C.A.; HOLANDA J.N.F. Recycling of gneiss rock waste in the manufacture of vitrified floor tiles. **Journal of Environmental Management**. 91, p.685–689. 2010.

SOZEN, M.A. Maintenance and Repair. **Concrete International**, v. 12, n. 9, p. 71-3. 1990.

STRATFULL, R.F. Half-Cell Potentials and the Corrosion of Steel em Concrete. **Highway Research Record**, n.433, p.12-21, 1973.

TAN, K.H.; DU, H. use of waste glass as sand in mortar: Part I – Fresh, mechanical and durability properties. **Cement & Concrete Composites**. 35. p. 109-117. 2013.

TORRES, A.S. **Corrosão por cloretos em estruturas de concreto armado: uma meta-análise**. 2011. Pag. 186. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.



TUUTTI, K. Corrosion of Steel in Concrete, **Swedish Cement and Concrete Research**, nº504, p.469, 1982.

ULIANA, Juliana Gavini. **Estudo de tratamento térmico para aplicação da lama do beneficiamento de rochas ornamentais como substituição parcial de cimento**. 2013. 205 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013.

ULIANA, J.G.; FALCÃO, A.F.O.; SOARES R.B.; MAIOLI, R.N. E VIEIRA, G.L. **Estudo das incidências patológicas em fachadas de edifícios localizados em região litorânea**. In: 1º Congresso Brasileiro de Patologia das Construções. ALCONPAT Brasil (Foz do Iguaçu-PR). 2014.

VIEIRA, G. L. **Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados de resíduos de construção e demolição**. 2003. 151f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

VIEIRA, C.M.F.; SOARES, T.M.; SANCHEZ, R.;MONTEIRO, S.N. Incorporation of granite waste in red ceramics. **Materials Science & Engeneering**, A 373, p. 115-121. 2004.

WIN, P.P.; WATANABE, M.; MACHIDA A. Penetration profile of chloride ion in cracked reinforced concrete. **Cement and Concrete Research**, v.34, p. 1073-1079, 2004.

XAVIER, G.C.; SABOYA, F.; MAIA, P.C.A.; ALEXANDRE, J. Análise de processos de degradação acelerada em laboratório para estudo da durabilidade de peças cerâmicas vermelhas incorporadas com resíduo de granito. **Cerâmica**. V.55, p. 1-10. 2009.

YADAV, R.N.; SINGH, U.; GUPTA, P.; SHARMA, M. Influence of inert filler on cimenting properties of magnesium Oxychloride cement MOC with MOC-friendly cement. **Indian Journal of Applied Research**, v.3, p.1-3. 2013.

YUANTAI MA; YING LI; FUHUI WANG. Corrosion of low carbon steel in atmosphere environments of different chloride content. **Corrosion Science**. v.51. p.997-1006. 2009.

*Apêndice*

---

**APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS.**

Tabela 39 – Abatimento e massa específica dos concretos em seu estado fresco.

CONCRETO	ABATIMENTO	MASSA ESPECÍFICA	MASSA ESPECÍFICA MÉDIA
CREF 45	75	2,4128	2,4287
		2,4446	
CR5 45	70	2,3555	2,3459
		2,3364	
CR10 45	60	2,3873	2,4001
		2,4128	
CR15 45	35	2,3873	2,3810
		2,3746	
CREF 55	80	2,3873	2,3873
		2,3873	
CR5 55	70	2,3746	2,3810
		2,3873	
CR10 55	45	2,3555	2,3459
		2,3364	
CR15 55	40	2,3746	2,3523
		2,3300	
CREF 65	65	2,3364	2,3364
		2,3364	
CR5 65	70	2,3555	2,3619
		2,3682	
CR10 65	90	2,3237	2,3268
		2,3300	
CR15 65	55	2,3746	2,3619
		2,3491	

Fonte: produção da autora.

Tabela 40 - Resultados de Resistência à Compressão Axial aos 28 dias dos concretos com relação a/c 0,45.

Concreto	Nº do CP	Diâmetro 1 (cm)	Diâmetro 2 (cm)	Altura (cm)	Carga (kgf)	Resistência à compressão axial (MPa)
CREF 45	1	10,03	10,02	19,6	42.300	53,6
	2	10,01	10,04	19,7	40.300	51,3
	3	10,02	10	19,7	41.100	52,2
	4	10	10,01	19,7	40.300	51,4
	5	9,91	10	19,7	41.200	53,5
	6	10	9,99	19,7	41.300	52,6
CR5 45	1	10	10,02	19,8	44.700	55,8
	2	10,01	9,98	19,8	46.500	58,2
	3	10	10	19,8	45.200	56,5
	4	10,01	10	19,8	45.300	56,6
	5	10,01	9,98	19,8	43.800	54,8
	6	9,96	10,04	19,9	44.100	55,1
CR10 45	1	10	10	19,7	40.500	51,6
	2	10	10	19,6	39.100	49,8
	3	9,95	9,96	19,5	39.600	51
	4	10	10	19,6	40.700	51,9
	5	9,96	9,98	19,7	40.200	51,6
	6	10,06	10	19,5	40.700	51,3
CR15 45	1	10	10,05	19,8	40.300	51,4
	2	10	10,02	19,9	39.000	49,7
	3	10	10	19,7	40.400	51,5
	4	9,98	10	19,7	39.700	50,8
	5	10	10	19,8	40.000	51
	6	10	10	19,7	39.000	49,7

Fonte: produção da autora.

Tabela 41 - Resultados de Resistência à Compressão Axial aos 28 dias dos concretos com relação a/c 0,55.

Concreto	Nº CP	Diâmetro 1 (cm)	Diâmetro 2 (cm)	Altura (cm)	Carga (kgf)	Resistência à compressão axial (MPa)
CREF 55	1	10	9,98	19,8	36.300	46,3
	2	9,99	10,02	19,7	33.600	42,9
	3	10,01	10	19,6	37.400	47,6
	4	10,04	9,98	19,8	35.800	45,3
	5	10,01	9,97	19,7	35.600	45,3
	6	9,98	9,99	19,6	36.300	46,5
CR5 55	1	10,05	9,99	19,7	36.500	45,5
	2	10	9,95	19,7	35.600	44,7
	3	10	10	19,7	36.400	45,5
	4	10	10,02	19,6	37.800	47,2
	5	10,01	10,01	19,8	36.000	44,9
	6	9,99	10	19,6	37.400	46,8
CR10 55	1	10	10	19,8	32.100	40,9
	2	10	10,06	19,5	31.500	40,2
	3	10	10	19,7	32.400	41,3
	4	10,02	10,02	19,7	31.600	40,1
	5	10	9,98	19,8	31.800	40,5
	6	10	10,01	19,7	31.700	40,4
CR15 55	1	9,95	10	19,8	33.500	43,1
	2	10	9,95	19,8	31.600	40,3
	3	10	9,98	19,8	32.300	41,2
	4	9,98	10,02	19,7	34.100	43,6
	5	10,02	10	19,8	33.600	42,7
	6	10,02	9,93	19,7	33.000	41,9

Fonte: produção da autora

Tabela 42 - Resultados de Resistência à Compressão Axial aos 28 dias dos concretos com relação a/c 0,65.

Concreto	Nº CP	Diâmetro 1 (cm)	Diâmetro 2 (cm)	Altura (cm)	Carga (kgf)	Resistência à compressão axial (MPa)
CREF 65	1	9,98	9,99	19,6	26.300	33,7
	2	9,99	10	19,7	26.300	33,6
	3	10	10,01	19,7	26.700	34
	4	9,97	10	19,7	26.400	33,9
	5	10,02	10,01	19,5	26.600	33,8
	6	10	9,9	19,7	27.700	35,3
CR5 65	1	10	9,96	19,6	28.800	36,2
	2	10	9,98	19,7	29.700	37,2
	3	9,98	9,97	19,7	29.100	36,6
	4	10,04	9,98	19,6	28.800	36
	5	10,02	9,99	19,6	29.800	37,2
	6	10	9,99	19,6	29.700	37,2
CR10 65	1	10,05	10	19,7	27.400	34,6
	2	10,05	10,07	19,7	25.400	32,1
	3	10	10	19,7	27.300	34,8
	4	9,98	10,05	19,7	27.500	35,2
	5	10	10,05	19,7	25.700	32,8
	6	10	10,1	19,7	27.100	34,6
CR15 65	1	9,95	10,05	19,6	26.800	34,5
	2	10	9,92	19,8	26.400	33,7
	3	10	9,94	19,8	26.000	33,2
	4	9,95	10	19,7	26.500	34,1
	5	10,02	9,94	19,8	26.400	33,5
	6	10	10	19,8	25.800	32,9

Fonte: produção da autora

**APÊNDICE B – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DURABILIDADE**

Tabela 43 – Dados coletados de potencial de corrosão (mV) após imersão dos corpos de prova em solução rica em NaCl (5%).

		<b>IMERSÃO</b>										
A/C	AÇO	Ciclo 01	Ciclo 02	Ciclo 03	Ciclo 04	Ciclo 05	Ciclo 06	Ciclo 07	Ciclo 08	Ciclo 09	Ciclo 10	Ciclo 11
<b>CREF 45</b>	37	-198	-209		-130	-118	-138	-313	-313	-312		
	38	-167	-141		-136	-148	-150	-121	-143	-142		
	39	-156	-143		-145	-146	-163	-116	-126	-324	-294	
	40	-281	-118		-152	-124	-161	-338	-320	-250	-302	
<b>CREF 55</b>	41	-181	-142		-182	-306	-306	-310				
	42	-169	-151		-172	-155	-305	-306				
	43	-237	-138		-33	-112	-299	-302				
	44	-127	-127		-39	-116	-170	-321				
<b>CREF 65</b>	45	-182	-156		-176	-297	-294	-297				
	46	-168	-137		-302	-294	-296	-299				
	47	-121	-135		-297	-294	-296	-299				
	48	-139	-128		-299	-293	-297	-299				
<b>CR5 45</b>	1	-202	-171		-205	-298	-303	-301	-302	-298	-293	-305
	2	-163	-142		-151,8	-97	-209	-184	-180	-148	-153	-222
	3	-227	-164		-166	-166	-180	-136	-172	-153	-190	
	4	-178	-145		-163,9	-161	-168	-146	-299	-303	-297	
<b>CR5 55</b>	5	-214	-158		-166,9	-179	-176	-130	-145	-110	-145	-303
	6	-201	-156		-155	-165	-155	-146	-296	-297	-296	-296
	7	-172	-144		-143,9	-307	-300	-303	-297	-299		
	8	-147	-134		-135,1	-144	-175	-137	-135	-156		
<b>CR5 65</b>	9	-224	-183		-131,3	-152	-32	-134	-294			
	10	-162	-140		-160	-295	-299	-300	-293			
	11	-190	-151		-140	-297	-296	-299				
	12	-206	-167		150	-309	-298	-300				
<b>CR10 45</b>	13	-200	-134		-137	-135	-149	-310	-306			
	14	-218	-141		-157	-324	-170	-204	-337			
	15	-190	-126		-144	-302	-304	-310	-302	-300	-296	-297
	16	-138	-132		-150	-152	-172	-139	-152	-158	-161	-140
<b>CR10 55</b>	17	-200	-139		-118	-120	-108	-308				
	18	-169	-135		-139	-322	-313	-306				
	19	-158	-130		-138	-137	-305	-305				
	20	-164	-120		-135	-127	-138	-308				

A/C	AÇO	Ciclo 01	Ciclo 02	Ciclo 03	Ciclo 04	Ciclo 05	Ciclo 06	Ciclo 07	Ciclo 08	Ciclo 09	Ciclo 10	Ciclo 11
CR10 65	21	-178	-131		-150	-294	-295	-299				
	22	-205	-149		-146	-294	-299	-303				
	23	-187	-145		-70	-295	-296	-301				
	24	-159	-134		-298	-300	-298	-301				
CR15 45	25	-126	-141		-164	-128	-150	-115	-110	-109	-109	-120
	26	-85	-152		-170	-150	-150	-148	-150	-160	-160	-179
	27	-141	-134		-135	-97	-150	-134	-145			
	28	-54	-159		-30	-114	-164	-144	-110			
CR15 55	29	-171	-143		-164	-146	-140	-141	-152	-332		
	30	-138	-137		-164	-299	-302	-307	-302	-300		
	31	-176	-143		-95	-116	-153	-145	-135	-147	-141	-145
	32	-179	-142		-163	-91	-312	-334	-338	-336	-318	-303
CR15 65	33	-158	-151		-157	-298	-297	-301				
	34	-168	-152		-317	-297	-300	-303				
	35	-153	-132		-299	-292	-298	-300				
	36	-154	-139		-334	-294	-295	-301				
CREF 45	49	-167	-139		-105	-90	-100	-87	-125	-133	-131	-304
	50	-157	-139		-202	-300	-300	-300	-304	-305	-297	-296
	51	-194	-150		-171	-93	-140	-109				
	52	-304	-377		-305	-305	-298	-301				
CR5 55	53	-167	-154		-177	-33	-142	-304				
	54	-158	-148		-152	-305	-304	-300				
	55	-181	-156		-160	-324	-298	-298				
	56		-175		-187	-124	-253	-300				
CREF 65	57		-208		-171	-299	-297	-297				
	58		-148		-297	-298	-295	-296				
	59		-151		-298	-298	-301	-302				
	60		-152		-305	-302	-295	-295				
CR10 45	61		-149		-176	-100	-327	-303	-302	-307	-299	
	62		-150		-195	-163	-161	-31	-150	-160	-298	
	63		-143		-196	-55	-150	-310				
	64		-140		-190	-153	-100	-313				
CR15 55	65		-139		-162	-300	-299	-304				
	66		-184		-166	-63	-150	-307				
	67		-148		-162	-311	-301	-307				
	68		-148		-161	-136	-80	-133				



CR 10 65	69	-148	-127	-305	-297	-300	
	70	-155	-147	-118	-170	-311	
	71	-179	-306	-303	-299	-301	-295
	72	-204	-84	-155	-200	-190	-296

Tabela 44 – Dados coletados de potencial de corrosão (mV) após secagem em estufa ventilada a 50°C.

SECAGEM												
A/C	AÇO	Ciclo 01	Ciclo 02	Ciclo 03	Ciclo 04	Ciclo 05	Ciclo 06	Ciclo 07	Ciclo 08	Ciclo 09	Ciclo 10	Ciclo 11
CREF 45	37	-147		-150,8	-134	-135	-329	-318	-339	-336		
	38	-138		-148,2	-180	-161	-194	-195	-187	-316		
	39	-137		-146	-110	-152	-194	-205	-232	-309		
	40	-145		-140,1	-174	-168	-295	-300	-278	-256		
CREF 55	41	-155		-147,5	-172	-322	-318	-316				
	42	-128		-167,9	-203	-177	-308	-309				
	43	-125		-134,1	-156	-172	-206	-310				
	44	-120		-131,3	-150	-319	-311	-309				
CREF 65	45	-162		-163,7	-185	-309	-306	-305				
	46	-127		-89,5	-317	-309	-311	-307				
	47	-102		-77,1	-321	-315	-308	-323				
	48	-136		-76,4	-314	-312	-313	-313				
CR5 45	1	-231	-201	-205	-298	-324	-337	-329	-320	-321	-297	-323
	2	-159	-178	-167	-258	-200	-230	-198	-205	-208	-202	-216
	3	177	-179	-156	-252	-208	-216	-225	-233	-195	-306	
	4	-162	-175	-142,3	-238	-163	-222	-150	-311	-311	-315	
CR5 55	5	-147	-160	-150,5	-33	-173	-188	-180	-204	-195	-183	
	6	-145	-171	-173,3	-233	-188	-222	-313	-304	-310	-310	
	7	-142	-162	-137,6	-318	-313	-315	-308	-311	-307		
	8	-132	-153	-141,8	-197	-160	-170	-190	-183	-310		
CR5 65	9	-143	-183	-133	-232	-150	-192	-220				
	10	-123	-174	-151,8	-312	-310	-308	-310				
	11	-116	-182	-145,4	-307	-310	-307	-303				
	12	-114	-166	-129	-314	-310	-312	-313				
CR10 45	13	-131	-140	-121,8	-210	-170	-151	-319				
	14	-122	-130	-119,5	-219	-85	-228	-190				
	15	-105	-110	-110,7	-316	-316	-324	-319	-318	-311	-319	-313
	16	-122	-139	-123,3	-206	-138	-160	-180	-183	-190	-160	-212
CR10 55	17	-97	-127	-97	-179	-167	-327	-309				
	18	-85	-143	-102,4	-202	-303	-320	-318				
	19	-82	-130	-133,2	-211	-318	-316	-308				
	20	-65	-121	-140,6	-197	-161	-193	-310				

CR10 65	21	-101	-138	-147,8	-314	-310	-306	-306				
	22	-111	-134	-148,8	-168	-311	-308	-310				
	23	-127	-141	-158,5	-317	-308	-307	-307				
	24	-93	-140	-166,2	-310	-319	-309	-304				
CR15 45	25	-190	-143	-150,3	-208	-177	-214	-207	-200	-213	-214	-306
	26	-179	-148	-153	-232	-194	-190	-210	-206	-217	-216	-213
	27	-168	-136	-133,5	-209	-120	-180	-160	-317			
	28	-173	-140	-145,3	-201	-90	-150	-165	-310			
CR15 55	29	-173	-120	-131,1	-211	-174	-186	-206	-205			
	30	-165		-138,3	-320	-323	-320	-315	-316			
	31	-168		-123,5	-206	-142	-200	-214	-208	-208	-206	-211
	32	-142		-134,3	-199	-330	-335	-323	-315	-298	-267	-237
CR15 65	33	-153		-155,2	-315	-306	-305	-307				
	34	-160		-144,4	-321	-310	-310	-308				
	35	-128		-137,5	-310	-308	-312	-305				
	36	-95		-148,4	-310	-306	-311	-311				
CREF 45	49	-134		-138,6	-231	-140	-230	-135	-209	-178	-200	
	50	-89		-142,8	-214	-306	-318	-323	-322	-316	-308	
	51	-134		-141,2	-228	-218	-207	-318				
	52	-123		-223	-325	-314	-326	-330				
CR5 55	53	-122		-146,3	-233	-231	-234	-309				
	54	-120		-139,5	-203	-320	-324	-315				
	55	-123		-151,3	-220	-327	-310	-315				
	56	-134		-142,3	-226	-211	-319	-312				
CREF 65	57	-151		-134,3	-332	-307	-311	-315				
	58	-102		-63,7	-311	-308	-307	-308				
	59	-103		-120,4	-312	-306	-319	-327				
	60	-124		-150,5	-312	-322	-309	-323				
CR10 45	61	-122		-127,5	-193	-216	-314	-313	-314	-314		
	62	-124		-130,3	-212	-213	-225	-210	-190	-206		
	63	-128		-117	-202	-213	-227	-320				
	64	-128		-106,2	-197	-214	-314	-318				
CR15 55	65	-95		137,5	-191	-306	-314	-317				
	66	-121		-153,6	-233	-244	-250	-309				
	67	-120		-138	-321	-310	-310	-323				
	68	-126		-141	-200	-205	-202	-311				
CR 10 65	69	-106		-150,4	-316	-304	-305	-313				
	70	-117		-158	-221	-216	-224	-309				
	71	-114		-147	-311	-308	-311	-318	-308			
	72	-129		-185,7	-247	-213	-255	-226	-307			

Tabela 45 –Potencial de corrosão médio (mV) do ciclo C 01 ao C 11.

	C 01	C 02	C 03	C 04	C 05	C 06	C 07	C 08	C 09	C 10	C 11
<b>APÓS IMERSÃO</b>											
<b>CREF 45</b>	-200,5	-152,75		140,75	-134	-153	-222	-225,5	-257	-298	
<b>CREF 55</b>	-178,5	-139,5		-106,5	-172,3	-270	-309,75				
<b>CREF 65</b>	-152,5	-139		-268,5	-294,5	295,75	-298,5				
<b>CR5 45</b>	-192,5	-155,5		-171,7	-180,5	-215	191,75	238,25	-225,5	233,25	-263,5
<b>CR5 55</b>	-183,5	-148		-150,23	-198,75	-201,5	-179	-218,25	-215,5	-220,5	-299,5
<b>CR5 65</b>	-195,5	-160,25		-70,325	-263,25	-231,25	-258,25	-293,5			
<b>CR10 45</b>	-186,5	-133,25		-147	-228,25	-198,75	-240,75	-274,25	-229	-228,5	-218,5
<b>CR10 55</b>	-172,75	-131		-132,5	-176,5	-216	-306,75				
<b>CR10 65</b>	-182,25	-139,75		-166	-295,75	-297	-301				
<b>CR15 45</b>	-101,5	-146,5		-124,75	-122,25	-153,5	-135,25	-128,75	-134,5	-134,5	-149,5
<b>CR15 55</b>	-166	-141,25		-146,5	-163	-226,75	-231,75	-231,75	-278,75	-229,5	-224
<b>CR15 65</b>	-158,25	-143,5		-276,75	-295,25	-297,5	-301,25				
<b>APÓS SECAGEM</b>											
<b>CREF 45</b>	-141,75		-	146,28	-149,5	-154	-253	-254,5	-259	-304,25	
<b>CREF 55</b>	-132		-	-145,2	-170,25	-247,5	-285,75	-311			
<b>CREF 65</b>	-131,75		-	101,68	-284,25	-311,25	-309,5	-312			
<b>CR5 45</b>	-93,75	-183,25	-	167,58	-261,5	-223,75	-251,25	-225,5	-267,25	-258,75	-280
<b>CR5 55</b>	-141,5	-161,5	-	-150,8	-195,25	-208,5	-223,75	-247,75	-250,5	-280,5	-246,5
<b>CR5 65</b>	-124	-176,25	-	-139,8	-291,25	-270	-279,75	-286,5			
<b>CR10 45</b>	-120	-129,75	-	118,83	-237,75	-177,25	-215,75	-252	-250,5	-250,5	-239,5
<b>CR10 55</b>	-82,25	-130,25	-	-118,3	-197,25	-237,25	-289	-311,25			
<b>CR10 65</b>	-108	-138,25	-	155,33	-277,25	-312	-307,5	-306,75			
<b>CR15 45</b>	-177,5	-141,75	-	145,53	-212,5	-145,25	-183,5	-185,5	-258,25	-215	-215
<b>CR15 55</b>	-162	-120	-	-131,8	-234	-242,25	-260,25	-264,5	-261	-253	-236,5
<b>CR15 65</b>	-134		-	146,38	-314	-307,5	-309,5	-307,75			

Fonte: produção da autora.