

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

MAXWELL KLEIN DEGEN

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO MECÂNICO E DE DURABILIDADE EM  
CONCRETOS PRODUZIDOS COM RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE  
ROCHAS ORNAMENTAIS TRATADO TERMICAMENTE (RBROTT)**

VITÓRIA  
2017

**MAXWELL KLEIN DEGEN**

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO MECÂNICO E DE DURABILIDADE EM  
CONCRETOS PRODUZIDOS COM RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE  
ROCHAS ORNAMENTAIS TRATADO TERMICAMENTE (RBROTT)**

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.

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dra. Geilma Lima Vieira.

VITÓRIA

2017

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

---

D317a Degen, Maxwell Klein, 1990-  
Avaliação de desempenho mecânico e de durabilidade em concretos produzidos com resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente (RBROTT) / Maxwell Klein Degen. – 2017.  
125 f. : il.

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

1. Rochas ornamentais – Resíduos industriais – Tratamento térmico. 2. Concreto. 3. Corrosão. 4. Durabilidade (Engenharia). 5. Resistência de materiais. 6. Pozolanicidade. I. Vieira, Geilma Lima. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

---

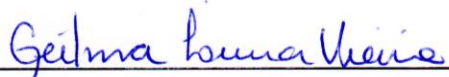
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO MECÂNICO E DE DURABILIDADE  
EM CONCRETOS PRODUZIDOS COM RESÍDUO DE  
BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS TRATADO  
TERMICAMENTE (RBROTT)**

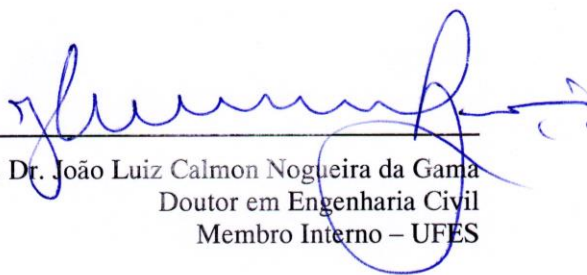
**Maxwell Klein Degen**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Construção Civil.

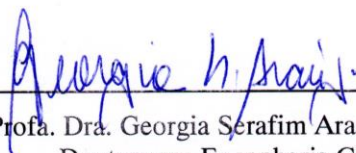
Aprovada no dia **03 de julho de 2017** por:



Prof. Dra. Geilma Lima Vieira  
Doutora em Engenharia Civil  
Orientadora - UFES



Prof. Dr. João Luiz Calmon Nogueira da Gama  
Doutor em Engenharia Civil  
Membro Interno - UFES



Prof. Dra. Georgia Serafim Araujo  
Doutora em Engenharia Civil  
Membro Externo - UFES

**Vitória – ES, julho de 2017**

Aos meus Pais,  
Elena Klein Degen e  
Jodelson Degen.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu Amor, Roberta Arlêu que esteve sempre ao meu lado, me apoiando nos momentos difíceis e nas noites em claro, e aproveitando a vida nas viagens e momentos felizes.

Gostaria de agradecer aos meus pais, Elena e Jodelson, a minha irmã Sabrina, pelo apoio em todos os momentos vividos nesses anos batalha.

Agradeço a minha segunda família, Cida e Paulo Roberto pelo apoio.

Tenho que agradecer aos amigos e colegas de mestrado, Sérgio, Robinho, Guilherme, Clarisse, Thaís, Larissa, Dainer, Gercyr, Júlia, Gustavo, Dayanne, Janaína, João, Fernando e demais que não foram citados, vocês me ajudaram a carregar o fardo fazendo com que a vida fosse mais fácil. Agradeço especialmente aos amigos Sérgio, que foi responsável por ajudar em grandes idéias, parceiro de ensaios e cafezinhos e Robinho, companheiro de república e discussões da madrugada.

À professora Geilma Lima Vieira que me orientou durante todo o período de Iniciação Científica, Projeto de Graduação e agora no Mestrado.

Aos professores Calmon, Jamilla e Maristela.

A todos os funcionários do LEMAC, principalmente ao Loriato, Marcio e Henrique que sempre se mostraram dispostos a ajudar nos ensaios necessários e enfrentaram a missão de ajudar a produzir mais de 600 corpos de prova.

À UFES por toda a estrutura disponibilizada.

Ao IFES por disponibilizar o Laboratório de materiais cerâmicos do programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais para os ensaios de granulometria a laser.

A CAPES pelo apoio financeiro durante a pesquisa.

A Concrevit e a LafargeHolcim pelos materiais cedidos.

Finalmente, a todos que contribuíram para que este sonho fosse alcançado.

Tente mover o mundo - o primeiro passo será mover a si mesmo.

*(Platão)*

## RESUMO

DEGEN, Maxwell Klein. **Avaliação de desempenho mecânico e de durabilidade em concretos produzidos com resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente (RBROTT)**. 2017. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

A produção mundial de rochas ornamentais no ano de 2014 foi de 136,5 milhões de toneladas. Considerando que cerca de 25% dos blocos são transformados em resíduo devido ao processo de beneficiamento, estima-se que aproximadamente 35 milhões de toneladas de resíduo foram gerados. Caracterizado como um material não-reativo, o resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) atua apenas como um fíler dentro de matrizes cimentícias. Porém, após passar por tratamento térmico a 1200°C, ele passa a se tornar um material vítreo, que quando finamente moído apresenta características de um material pozolânico. Portanto, o resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente (RBROTT) passa a ser reativo, combinando-se quimicamente com compostos hidratados da pasta de cimento. Com o intuito de avaliar características de durabilidade em concretos de alto desempenho, foram produzidos concretos adicionando 10, 15 e 20% de RBROTT em relação à massa de cimento e concretos substituindo parcialmente o cimento pelo RBROTT nos teores 10, 15 e 20%. Foi avaliada a influência do RBROTT na trabalhabilidade, resistência à compressão, absorção de água e também na proteção contra a corrosão das armaduras. A utilização do RBROTT se mostrou eficiente tanto na adição como na substituição do cimento, aumentando a resistência à compressão em até 46%, reduzindo a absorção em 39% e aumentando a proteção contra a corrosão em até 90%. Os concretos com melhor desempenho foram os com adição de 20% de RBROTT e substituição de 20%.

**Palavras chave:** Resíduos de rochas ornamentais, tratamento térmico, pozolanicidade, resistência mecânica, corrosão, durabilidade.



## ABSTRACT

DEGEN, Maxwell Klein. **Mechanical performance and durability assessment in concretes made with heat-treated dimension stone processing waste (HTDSPW)**. 2017. 126 p.. Dissertation (Master's Degree in Civil Engineering) – Graduate Program in Civil Engineering, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

Worldwide production of ornamental stones in 2014 was 136.5 million tons. Whereas about 25% of blocks are transformed into waste due to processing, it is estimated that approximately 35 million tons of waste were produced. Characterized as a non-reactive material, the dimension stone processing waste (DSPW) acts as filler in cementitious matrix. Nevertheless, after heat treatment at 1200°C, it becomes a vitreous material, that finely ground presents characteristics of a pozzolanic material. Thus, the heat-treated dimension stone processing waste (HTDSPW) becomes reactive, combining itself chemically with hydrated compounds in the cement paste. With the goal of evaluating the durability properties in high-performance concretes, concretes with 10, 15 and 20% addition of HTDSPW to the cement mass and concretes partially replacing cement by HTDSPW in 10, 15 and 20% were produced. It was assessed the influence of HTDSPW in workability, compressive strength, water absorption and protection against reinforcement corrosion. The HTDSPW use was efficient in the addition as well as in the cement replacement, improving compressive strength in 46%, reducing absorption in 39% and increasing protection against corrosion in up to 90%. The concrete with the best performance was with the addition of 20% of HTDSPW and replacement of 20%.

**Key-words:** Dimension stone wastes, Heat treatment, pozzolanic reaction, compressive strength, corrosion, durability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Principais estados exportadores em 2016 (US\$ 1.000) .....	26
Figura 2.2 –Exportações brasileiras por país de destino em 2016 (US\$ 1.000) ..	27
Figura 2.3 – Principais etapas da produção de Rochas Ornamentais.....	28
Figura 2.4 - Exemplo de Lavra por fossa e poço.....	29
Figura 2.5 - Exemplo de Lavra por bancadas baixas e altas.....	30
Figura 2.6 - Blocos de rochas no pátio da empresa aguardando o desdobramento .....	32
Figura 2.7 - Desdobramento por teares com fio diamantado .....	33
Figura 2.8 – Desdobramento por teares convencionais com polpa abrasiva .....	33
Figura 2.9 – RBRO em forma de lama no tanque de decantação .....	35
Figura 2.10 – RBRO gerado após a secagem.....	35
Figura 3.1 - Programa experimental.....	49
Figura 3.2 - Ensaio de determinação de matéria orgânica no agregado miúdo ...	52
Figura 3.3 - Distribuição gralunométrica do agregado graúdo .....	53
Figura 3.4 - Resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais após tratamento térmico .....	56
Figura 3.5 - Recipiente contendo o resíduo antes e depois do tratamento térmico. ....	57
Figura 3.6 – Confeção da forma para o processo de tratamento térmico do RBRO.....	58
Figura 3.7 - Processo de tratamento térmico do RBRO.....	58
Figura 3.8 - Ensaio de resistência à compressão de corpos de prova de concreto .....	61
Figura 3.9 – Equipamento para ensaio de absorção por imersão e fervura.....	62
Figura 3.10 - Ensaio de absorção por capilaridade .....	63
Figura 3.11 - Esquema de realização do ensaio de potencial de corrosão.....	64
Figura 3.12 - Geometria dos corpos de prova para ensaio de potencial de corrosão.....	64
Figura 3.13 – Etapas do processo de proteção da armadura exposta nos corpos de prova.....	65

Figura 3.14 – Representação gráfica da resistência de polarização a partir dos dados de E e I. ....	67
Figura 4.1 - Distribuição granulométrica do RBROTT. ....	70
Figura 4.2 – Variação da consistência do concreto em função do tipo de incorporação do RBROTT. ....	72
Figura 4.3 - Resistência à compressão. ....	75
Figura 4.4 - Gráfico do efeito isolado da variação da idade sobre a média dos resultados de resistência à compressão. ....	77
Figura 4.5 - Gráfico do efeito isolado da variação do percentual de substituição sobre a média dos resultados de resistência à compressão. ....	78
Figura 4.6 - Gráfico do efeito isolado da variação da relação água/cimento sobre a média dos resultados de resistência à compressão. ....	79
Figura 4.7 - Gráfico do efeito da interação entre a idade e o percentual de RBROTT sobre a resistência à compressão. (a) adição (b) substituição. ....	80
Figura 4.8 - Gráfico do efeito da interação entre a idade e a relação água/cimento sobre a resistência à compressão. ....	82
Figura 4.9 - Gráfico do efeito da interação entre a porcentagem de RBROTT e a relação água/cimento sobre a resistência à compressão. ....	83
Figura 4.10 – Gráfico da interação tripla entre a idade, relação água/cimento e percentual de RBROTT sobre a resistência à compressão. (a) adição (b) substituição. ....	85
Figura 4.11 - Absorção por imersão. ....	86
Figura 4.12 - Gráfico do efeito isolado da variação da idade sobre a média dos resultados de absorção por imersão. ....	88
Figura 4.13 - Gráfico do efeito isolado da variação do percentual de RBROTT sobre a média dos resultados de absorção por imersão. ....	89
Figura 4.14 – Gráfico do efeito da interação entre a idade e o percentual de RBROTT sobre a média dos resultados de absorção por imersão. ....	90
Figura 4.15 - Absorção capilar. ....	91
Figura 4.16 - Gráfico do efeito isolado da variação da idade sobre a média dos resultados de absorção capilar. ....	93
Figura 4.17 - Gráfico do efeito isolado da variação da relação água/cimento sobre a média dos resultados de absorção capilar. ....	94

Figura 4.18 - Gráfico do efeito isolado da variação da porcentagem de RBROTT sobre a média dos resultados de absorção capilar. ....	95
Figura 4.19 - Gráfico do efeito da interação entre a idade e o percentual de RBROTT sobre a absorção capilar. ....	96
Figura 4.20 - Gráfico do efeito da interação entre o percentual de RBROTT e a relação água/cimento sobre a absorção capilar. ....	97
Figura 4.21 - Gráfico do efeito isolado da variação da idade sobre a média dos resultados de potencial de corrosão. ....	99
Figura 4.22 - Gráfico do efeito isolado da variação da relação água/cimento sobre a média dos resultados de potencial de corrosão. ....	100
Figura 4.23 - Gráfico do efeito isolado da variação da porcentagem de RBROTT sobre a média dos resultados de potencial de corrosão ....	101
Figura 4.24 – Gráfico do efeito da interação entre a idade e a relação A/C sobre o potencial de corrosão. ....	102
Figura 4.25 - Gráfico do efeito da interação entre a idade e o percentual de RBROTT sobre potencial de corrosão. (a) adição (b) substituição. ....	103
Figura 4.26 - Gráfico do efeito da interação entre o percentual de RBROTT e a relação água/cimento sobre potencial de corrosão. ....	104
Figura 4.27 - Gráfico do efeito isolado da variação da relação água/cimento sobre a média dos resultados de taxa de corrosão. ....	106
Figura 4.28 - Gráfico do efeito isolado da variação da porcentagem de RBROTT sobre a média dos resultados de taxa de corrosão. ....	107
Figura 4.29 - Gráfico do efeito da interação entre o percentual de RBROTT e a relação água/cimento sobre a taxa de corrosão. ....	108

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição química do resíduo de rochas ornamentais.....	37
Tabela 3.1 - Ensaio realizados nos concretos produzidos. ....	50
Tabela 3.2 - Quantidade de corpos de prova por traço de concreto. ....	51
Tabela 3.3 - Ensaio de caracterização realizados no agregado miúdo. ....	52
Tabela 3.4 - Ensaio realizados no agregado graúdo. ....	53
Tabela 3.5 - Ensaio realizados no Cimento CP V ARI.....	54
Tabela 3.6 - Propriedades químicas e físicas do RBRO. ....	55
Tabela 3.7 - Traço unitário e consumo de cimento. ....	59
Tabela 3.8 - Probabilidade de ocorrer despassivação da armadura. ....	65
Tabela 3.9 – Critério de avaliação da velocidade de corrosão. ....	68
Tabela 4.1 - Composição química do RBROTT .....	69
Tabela 4.2 – Diâmetros característicos do RBROTT e do Cimento CP V-ARI.....	70
Tabela 4.3 - Propriedades químicas e físicas do RBROTT .....	71
Tabela 4.4 - Análise de variância da resistência à compressão.....	76
Tabela 4.5 – Aumento percentual do ganho de resistência à compressão em relação a idade de 28 dias. ....	81
Tabela 4.6 – Aumento percentual do ganho de resistência à compressão em relação a idade de 28 dias para as diferentes relações água/cimento.....	83
Tabela 4.7- Análise de variância da absorção por imersão.....	87
Tabela 4.8 - Análise de variância da absorção capilar. ....	92
Tabela 4.9 - Análise de variância do potencial de corrosão. ....	98
Tabela 4.10 - Idade em que foi observada a despassivação das armaduras para cada tipo de concreto. ....	104
Tabela 4.11 - Análise de variância da taxa de corrosão.....	105

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANOVA – Análise de variância

A10 – Adição de 10% de RBROTT em relação ao cimento

A15 – Adição de 15% de RBROTT em relação ao cimento

A20 – Adição de 20% de RBROTT em relação ao cimento

CP V – ARI - Cimento portland de alta resistência inicial

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

IPT/EPUSP – Instituto de pesquisa tecnológica/ Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

LEMAC – Laboratório de ensaios de materiais de construção

RBRO – Resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais

RBRO D – Resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais proveniente de tear com fio diamantado

RBRO G – Resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais com granalha

RBROTT – Resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente

REF – Concreto de referência

S10 – Substituição de 10% do cimento por RBROTT

S15 – Substituição de 15% do cimento por RBROTT

S20 – Substituição de 20% do cimento por RBROTT

UFES – Universidade Federal do Espírito Santo

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução</b> .....	<b>18</b>
1.1	OBJETIVOS .....	20
1.1.1	Objetivo geral .....	20
1.1.2	Objetivos Específicos .....	20
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	21
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b> .....	<b>22</b>
2.1	ROCHAS ORNAMENTAIS .....	22
2.1.1	Histórico das rochas ornamentais .....	23
2.1.2	Rochas Ornamentais no Brasil .....	25
2.1.3	Rochas Ornamentais no Espírito Santo .....	27
2.1.4	Processo produtivo .....	28
2.1.4.1	<i>Lavra</i> .....	29
2.1.4.2	<i>Desdobramento</i> .....	32
2.1.5	Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO) .....	34
2.1.5.1	<i>Composição Química</i> .....	36
2.1.5.2	<i>Classificação do resíduo</i> .....	37
2.2	ADIÇÕES MINERAIS .....	38
2.2.1	Efeito das adições pozolânicas nas propriedades do concreto .....	40
2.3	ESTUDOS DE APROVEITAMENTO DO RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS .....	41
<b>3</b>	<b>Metodologia</b> .....	<b>47</b>
3.1	PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS .....	47
3.1.1	Variáveis dependentes .....	47
3.1.2	Variáveis independentes .....	48
3.1.3	Variáveis de controle .....	48
3.2	PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	48
3.3	MATERIAIS .....	51

3.3.1	Agregado miúdo .....	51
3.3.2	Agregado graúdo .....	52
3.3.3	Água .....	53
3.3.4	Cimento .....	53
3.3.5	Resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais.....	54
3.3.6	Produção do Resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente.....	55
3.3.6.1	<i>Tratamento térmico</i> .....	56
3.4	DOSAGEM DO CONCRETO .....	59
3.4.1	Produção dos concretos .....	59
3.5	CONSISTÊNCIA DO CONCRETO FRESCO .....	60
3.6	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	61
3.7	ABSORÇÃO POR IMERSÃO.....	61
3.8	ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE .....	62
3.9	POTENCIAL DE CORROSÃO .....	63
3.10	TAXA DE CORROSÃO .....	66
3.10.1	Resistência de polarização.....	66
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>69</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO RBROTT E VERIFICAÇÃO DA POZOLANICIDADE.....	69
4.2	CONSISTÊNCIA DO CONCRETO.....	72
4.3	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	73
4.3.1	Absorção de água por imersão e capilaridade .....	86
4.3.1.1	<i>Absorção por imersão</i> .....	86
4.3.1.2	<i>Absorção por capilaridade</i> .....	90
4.3.2	Ensaio eletroquímico de potencial de corrosão e taxa de corrosão ....	97
4.3.2.1	<i>Potencial de corrosão</i> .....	97
4.3.2.2	<i>Taxa de corrosão</i> .....	105
4.3.2.3	<i>Considerações acerca dos ensaios eletroquímicos</i> .....	108



<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>110</b>
5.1	CARACTERIZAÇÃO DO RBROTT .....	110
5.2	CONCRETO NO ESTADO FRESCO .....	110
5.3	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	110
5.4	ABSORÇÃO POR IMERSÃO.....	111
5.5	ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE .....	111
5.6	POTENCIAL DE CORROSÃO .....	111
5.7	TAXA DE CORROSÃO .....	111
5.8	CONCLUSÕES GERAIS.....	111
5.9	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	112
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>113</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Responsável pelo desenvolvimento do mundo moderno e facilmente encontrado em qualquer lugar, o concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil, sendo empregado tanto em pequenas obras como em obras de artes especiais. Porém, apesar de seus benefícios para a sociedade, devido ao seu consumo elevado, vários impactos são advindos de sua utilização, podendo-se citar o aumento da exploração de recursos naturais e do volume de emissões atmosféricas, que contribuem para a degradação ambiental.

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), as estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado em projeto, conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil.

Ainda de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), a durabilidade pode ser definida como a capacidade que o concreto possui de resistir à ação do tempo, aos ataques químicos, à abrasão ou a qualquer outra ação de deterioração. Assim, a durabilidade é influenciada pelo tipo de ataque, físico ou químico, que o concreto será submetido após o endurecimento. Um dos mecanismos de deterioração do concreto é a concentração de cloretos livres, presentes principalmente em regiões marinhas e industriais. As alterações iniciais produzidas na superfície do concreto por este tipo de mecanismo, são imperceptíveis, porém, seu efeito a longo prazo causa despassivação e corrosão das armaduras, reduzindo a vida útil da estrutura (MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011).

A busca por concretos cada vez mais sustentáveis e duráveis leva a comunidade científica a procurar novas alternativas para sua produção, desta forma, a utilização de resíduos em materiais de construção, seja com a finalidade de substituição de agregados por agregados reciclados, na incorporação de subprodutos industriais, na utilização de materiais cimentícios alternativos ou para encapsulamento dos resíduos e inertização, vem se mostrando uma tendência.

O reaproveitamento dos resíduos de rochas ornamentais na construção civil tem se apresentado como uma alternativa à disposição destes resíduos em Aterros Sanitários, uma vez que apresentam características compatíveis com materiais de construção, e são gerados em grande quantidade (possuindo alto custo de destinação). Porém, para que os resíduos sejam utilizados na construção civil é imprescindível que se atenda ao disposto nas normas de desempenho de materiais de construção.

Só no ano de 2014, foram produzidos, no mundo, 136,5 milhões de toneladas de rochas ornamentais, sendo o Brasil, o 4º maior produtor mundial, responsável por 7,5% deste total (HEIDER; MAIA, 2015). É importante ressaltar, que este total corresponde aos blocos já acabados, que passaram por processo de beneficiamento, gerando uma quantidade de resíduo, que corresponde a cerca de 25 a 30% do volume de cada bloco (GONÇALVES; MOURA, 2002; MOTHÉ FILHO, et al., 2005).

Desta forma, pode-se estimar que em 2014, foram geradas, aproximadamente 46 milhões de toneladas de resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO), no mundo, sendo 3,5 milhões de toneladas geradas somente no Brasil (7,5%).

Pensando no aproveitamento deste resíduo Calmon et al. (1997) deram início as pesquisas de utilização do RBRO como um subproduto na construção civil para a produção de argamassas. Desde então, diversos pesquisadores vêm utilizando o RBRO em diferentes materiais, como argamassas, blocos cerâmicos, blocos de concreto e asfalto (AGUIAR, 2012; GOTTARDI; CALMON; TEIXEIRA, 2013; LEITE; ARAUJO, 2002; LIMA FILHO et al., 1999; MOREIRA; FREIRE; HOLANDA, 2000; MOURA; GONÇALVES, 1999; NEVES et al., 1999).

Em concretos, o RBRO vem sendo utilizado como fíler, segundo as pesquisas de Gonçalves (2000), Lisbôa (2004), Alves (2008), Bacarji et al. (2013), Dietrich (2015), Sadek, El-Attar e Ali (2016), que obtiveram bons resultados com relação a melhoria de suas propriedades.

Com a investigação das características do RBRO, verificou-se que o resíduo apresentava potencialidades além do aproveitamento como fíler para preenchimento dos poros na matriz cimentícia. Logo, passou-se a considerar a possibilidade de realizar um tratamento no RBRO, de forma a potencializar suas propriedades, partindo-se a realização de pesquisas com a aplicação de um tratamento térmico para verificação de possíveis mudanças na estrutura do material.

Estas pesquisas foram realizadas por Uliana (2014), Vazzoler (2015) e Mittri (2016), que aplicaram um tratamento térmico ao RBRO, para torná-lo um material reativo, obtendo confirmação quanto a sua atividade pozolânica.

Assim, este trabalho foi desenvolvido com o intuito de avaliar o desempenho da incorporação do resíduo de rochas ornamentais tratado termicamente (RBROTT) em concretos, com foco na durabilidade, de forma a contribuir para o estabelecimento de uma alternativa de reaproveitamento destes resíduos, que considere tanto os aspectos ambientais, como técnicos e econômicos.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é avaliar aspectos de durabilidade de concretos produzidos com a utilização do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente (RBROTT) em duas frentes: como adição mineral e como substituto parcial do cimento, em teores de 10, 15 e 20% em relação à massa de cimento para ambos.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar as características do RBROTT sobre sua possível pozolanicidade;
- Avaliar a influência dos diferentes percentuais de adição e substituição do RBROTT sobre a consistência do concreto.
- Avaliar o efeito dos diferentes percentuais de adição e substituição do RBROTT sobre a resistência à compressão do concreto.

- Avaliar o efeito dos diferentes percentuais de adição e substituição do RBROTT sobre a absorção por imersão e por capilaridade do concreto.
- Avaliar o efeito dos diferentes percentuais de adição e substituição do RBROTT sobre o potencial de corrosão das armaduras.
- Avaliar o efeito dos diferentes percentuais de adição e substituição do RBROTT sobre o a taxa de corrosão das armaduras.

## 1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em seis capítulos que serão descritos a seguir.

O capítulo 1 traz a introdução do trabalho e seus objetivos.

No capítulo 2 tem-se a revisão bibliográfica que ajudará a justificar o desenvolvimento deste trabalho a partir da explanação sobre o panorama da geração de RBRO no Brasil e no mundo e a importância das adições minerais no concreto.

No capítulo 3 é exposta a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho, bem como o planejamento experimental e os materiais empregados e suas características.

O capítulo 4 é dedicado aos resultados e a discussão.

No capítulo 5 serão apresentadas as conclusões acerca da utilização do RBROTT em concretos.

E por fim no capítulo 6 as referências bibliográficas utilizadas ao longo da pesquisa.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O concreto é o material de construção civil mais utilizado na atualidade, sendo empregado em pontes, edifícios, rodovias, casas, e diversas outras aplicações (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Constituído principalmente por agregados, cimento e água, o concreto, desde sua produção, gera grandes impactos ambientais.

Na etapa de produção do concreto, os principais impactos gerados são devido a extensiva exploração de recursos naturais, como areia e pedra (utilizados como agregados) e matérias-primas necessárias para a fabricação do cimento, a geração de resíduos e as emissões atmosféricas. Destes impactos, é importante ressaltar que, só no processo de fabricação do cimento, cada tonelada de cimento produzido é responsável pela emissão de 600kg de CO<sub>2</sub> na atmosfera, contribuindo para o aquecimento global (SNIC, 2013).

Uma forma de contribuir para a redução da exploração de matérias-primas e da quantidade de CO<sub>2</sub> emitido é a utilização de resíduos incorporados ao concreto, como por exemplo, as adições minerais, que proporcionam a produção de concretos mais resistentes, duráveis e mais econômicos (DAL MOLIN, 2011).

### 2.1 ROCHAS ORNAMENTAIS

A NBR 6502 (ABNT, 1995) define rocha como sendo um material sólido, consolidado e constituído por um ou mais minerais, com características físicas e mecânicas específicas para cada tipo, enquanto a NBR 15012 (ABNT, 2013) define rochas ornamentais como material rochoso natural, submetido a diferentes graus ou tipos de beneficiamento, utilizado para exercer uma função estética.

As rochas ornamentais, compreendem os materiais geológicos naturais que podem ser extraídos em blocos ou placas, cortados em variadas formas e beneficiados por meio de esquadrejamento, polimento e lustro. Seus principais campos de aplicação incluem tanto peças isoladas, como esculturas, tampos e pés de mesa, balcões, quanto em edificações, destacando-se neste caso os revestimentos internos e externos de paredes, pisos, pilares, colunas, soleiras, dentre outros (CHIODI FILHO, 2005).

Os principais tipos de rochas utilizados como ornamentais e conhecidos no mercado são os mármore e os granitos. Para o setor de rochas ornamentais, 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. Estas rochas estão contidas pelos minerais quartzo, feldspato, micas, anfibólios, piroxênios e olivina em associações variáveis (MATTOS, 2000).

O quartzo em sua forma macroscópica, é reconhecido como um material incolor ou fumê, comumente translúcido. Os feldspatos são os principais constituintes de padrão cromático de uma rocha silicática, proporcionando colorações avermelhadas, rosadas e creme-acinzentadas nos granitos homogêneos (isótropos) e movimentados (anisótropos). A cor negra que existe na matriz das rochas silicáticas é geralmente conferida pelos minerais máficos, sobretudo anfibólio e mica, vulgarmente chamados de carvão. Granitos leucocráticos possuem de 85 a 95% de quartzo e feldspato (PEITER; CHIODI FILHO, 2001).

Já os mármore são rochas metamórficas correspondentes das sedimentares calcários e dolomitos, que possuem composição carbonática, e são constituídos principalmente de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) ou dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) (MARÇAL, 2011).

### **2.1.1 Histórico das rochas ornamentais**

O uso das rochas pelo ser humano nos leva aos primórdios da humanidade em que a rocha era utilizada para se fazer ferramentas primitivas como, por exemplo, machadinhas e pontas de fechas usadas na caça de animais. Ao longo dos anos a utilização de rochas passou e desempenhar uma importante função no desenvolvimento das civilizações.

A utilização da rocha, em todas as fases da história das civilizações, vem se constituindo num modelo, sendo responsável pela caracterização das cidades, estradas, castelos, templos e a decoração em geral. De forma, que as rochas não só auxiliaram na evolução da arquitetura, mas também contribuíram com o crescimento cultural e socioeconômico dos povos (MENDES; VIDAL, 2002).

Como exemplo pode-se citar, segundo Teixeira, Melo e Oliveira (2012), as civilizações da Antiguidade Oriental, como Mesopotâmia e Egito, que utilizavam rochas calcárias, graníticas e basálticas na construção de grandes esculturas. De acordo com os autores, os egípcios foram os pioneiros na instalação de pedreiras para construção de grandes monumentos, como as pirâmides, utilizando blocos de calcário.

Porém, foram os gregos que começaram a utilizar o mármore na construção de seus monumentos, como o Parthenon, o Templo de Zeus, e o Templo de Ártemis com 127 colunas de mármore, todas com 18 metros de altura e 2 metros de diâmetro (KENNER, 2012). Contudo, devido a inúmeras invasões e batalhas travadas, poucos são os monumentos que restaram.

A partir da Idade Média, houve uma grande procura pelas rochas ornamentais (mármore e granito) considerados materiais nobres para a construção das edificações, como palácios e catedrais, nas mais importantes cidades europeias da época (MAIA, 2004). Entre os séculos XVI e XVIII, houve uma maior procura pelas diferentes colorações do mármore, porém, a partir da segunda metade do século XVIII, o uso do mármore branco foi predominante. Isto contribuiu para o aumento do consumo deste material, e seu estabelecimento no campo da construção civil, sendo utilizado principalmente como elemento estrutural nas construções (MAIA, 2004; TEIXEIRA; MELO; OLIVEIRA, 2012)

No final do século XIX e início do século XX ocorreu uma revolução na fabricação das rochas ornamentais, com a introdução de processos de mecanização nas etapas de extração e beneficiamento. Desta forma, foi possível ampliar as formas de uso das rochas ornamentais, e assim, seu consumo (ALENCAR; CARANASSIOS; CARVALHO, 1996).

Devido esta revolução, certamente, a segunda metade do século XX pode ser considerada como a nova idade da pedra, constituindo o período de sua maior utilização e da melhoria dos métodos de extração e beneficiamento bem como, acabamento, uso e aplicação da rocha ornamental (MENDES; VIDAL, 2002).

Atualmente são produzidas 136,5 milhões de toneladas de rochas ornamentais por ano. Sendo os países da China, Índia, Turquia e Brasil, os principais produtores. É



uma atividade de extrema importância para estes países e para o mundo, movimentando um mercado de bilhões de dólares por ano (ABIROCHAS, 2017).

Com o desenvolvimento das tecnologias para extração e beneficiamento, e o aumento do consumo de rochas ornamentais no mundo, diversos autores apontam a necessidade da identificação de oportunidades de reaproveitamento deste resíduo, sendo que, anualmente, são geradas 46 milhões toneladas de resíduos de rochas ornamentais no mundo, que tem como principal destinação os aterros sanitários, (MORAES, 2006; ABIROCHAS, 2017).

### **2.1.2 Rochas Ornamentais no Brasil**

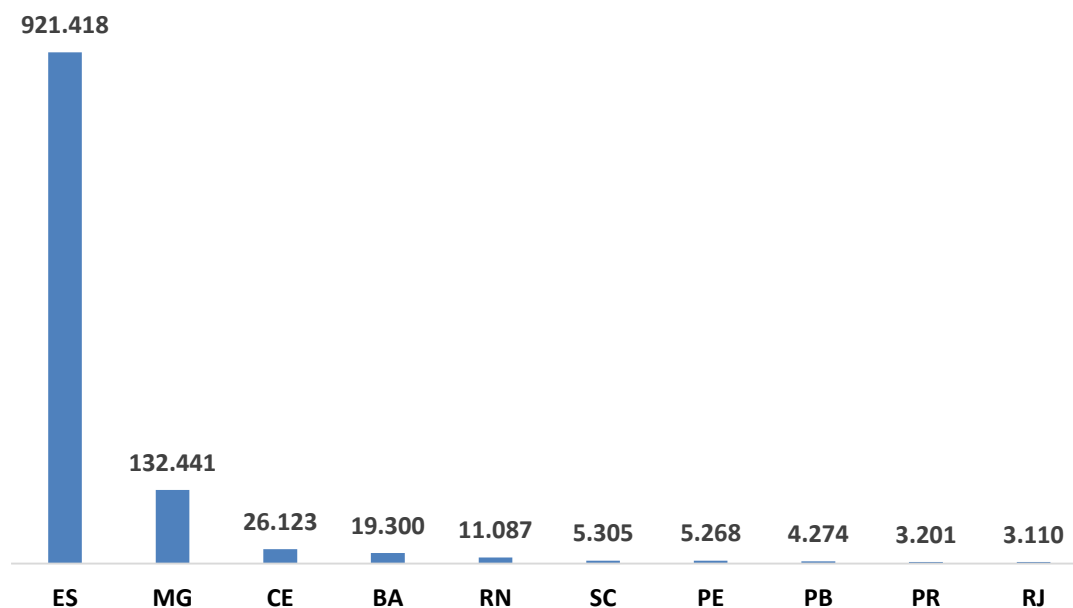
O Brasil é um dos principais produtores de rochas ornamentais do mundo, sendo responsável pela produção de aproximadamente 10,1 milhões de toneladas em 2014, ficando atrás de China, Índia e Turquia com produziram 42,5; 22; e 11,5 milhões de toneladas respectivamente (HEIDER; MAIA, 2015).

Os principais tipos de rochas extraídos no Brasil são granitos e similares, mármore, travertinos, ardósias, quartzitos maciços e foliados, basaltos e gabros, serpentinitos, pedra-sabão e pedra-talco, calcários, metaconglomerados polimíticos e oligomíticos, cherts, arenitos, xistos, entre outros.

Dentre os estados brasileiros, o Espírito Santo se apresenta como principal produtor e exportador, seguido de Minas Gerais.

A Figura 2.1 apresenta a distribuição dos principais estados exportadores de rochas ornamentais do Brasil em 2016 e o Quadro 2.1, os principais tipos de rochas produzidos nos estados brasileiros.

**Figura 2.1 - Principais estados exportadores em 2016 (US\$ 1.000)**



Fonte: ABIROCHAS (2017).

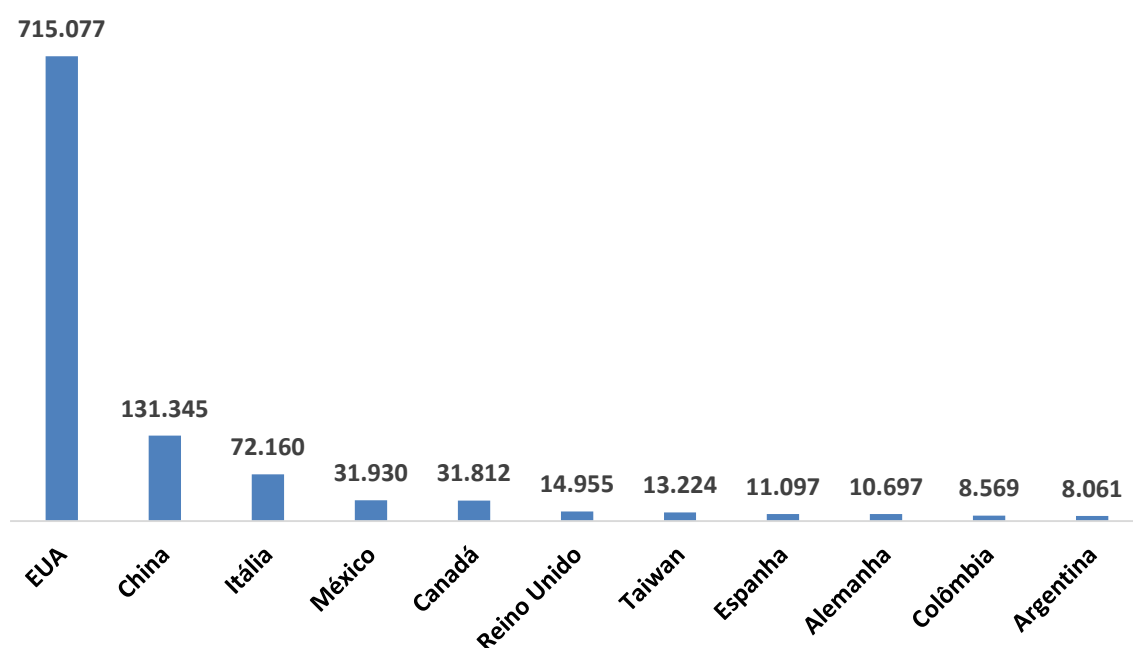
**Quadro 2.1- Distribuição estadual dos tipos de rochas ornamentais extraídos no Brasil**

Região	Estado	Tipo de Rocha
Sudeste	Espírito Santo	Granito e mármore
	Minas Gerais	Granito, ardósia, quartzito foliado, pedra-sabão, pedralco, serpentinito, mármore e basalto
	Rio de Janeiro	Granito, mármore e pedra Paduana
	São Paulo	Granito, quartzito foliado
Sul	Paraná	Granito e mármore
	Rio Grande do Sul	Granito, basalto e quartzito
	Santa Catarina	Granito, ardósia e mármore
Centro-Oeste	Goiás	Granito, quartzito foliado, serpentinito
	Mato Grosso do Sul	Granito e mármore
Nordeste	Bahia	Granito, mármore, travertino, arenito e quartzito
	Ceará	Granito e pedra Cariri
	Paraíba	Granito e conglomerado
	Pernambuco	Granito e quartzito
	Alagoas	Granito
	Rio Grande Norte	Mármore e granito
	Piauí	Pedra Morisca e ardósia
Norte	Rondônia	Granito
	Pará	Granito

Fonte: CHIODI FILHO (2009) p. 41.

Com relação as exportações de rochas ornamentais, os EUA são o principal mercado consumidor do produto brasileiro, seguidos pela China, México e Canadá, respectivamente, como mostrado na Figura 2.2.

**Figura 2.2 –Exportações brasileiras por país de destino em 2016 (US\$ 1.000)**



Fonte: ABIROCHAS (2017).

### 2.1.3 Rochas Ornamentais no Espírito Santo

O Espírito Santo é o maior produtor de rochas ornamentais do Brasil responsável por 75% da produção do país, e onde se encontra mais da metade dos teares (unidades produtivas de rochas ornamentais) do país, num parque industrial que corresponde a mais de 1000 empresas instaladas (ABIROCHAS, 2017).

O setor de Rochas Ornamentais é de extrema importância para a economia capixaba, respondendo por cerca de 10% do PIB estadual e pela geração de aproximadamente 130 mil empregos diretos e indiretos (SARDOU FILHO et al., 2013).

Na região sul do estado, mas precisamente no polo de Cachoeiro do Itapemirim e Castelo está instalado o maior parque para processamento industrial de rochas

ornamentais do país, sendo o estado responsável por grande parte das exportações brasileiras de produtos pétreos beneficiados.

Devido sua relevância, o estado do Espírito Santo é responsável por sediar a Feira Internacional do Mármore e Granito, além de possuir 21 estados na Rota do Mármore e Granito (SARDOU FILHO et al., 2013).

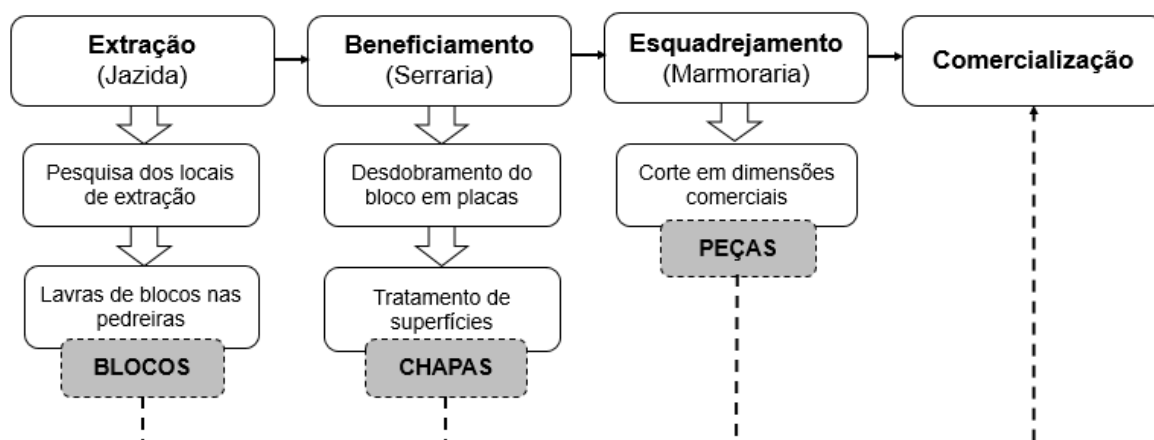
#### 2.1.4 Processo produtivo

Segundo Gonçalves (2000) o processo de produção de rochas ornamentais, na maioria das empresas brasileiras, obedece a seguinte sequência:

- Pesquisa para definição dos locais de extração dos blocos, onde é avaliada a qualidade da rocha e seu valor comercial;
- Extração dos blocos de rochas, onde são empregadas diversas técnicas de corte como o corte com fio helicoidal, corte com fio diamantado, corte contínuo e desmonte com explosivos (Lavra);
- Transporte dos blocos até a beneficiadora;
- Desdobramento dos blocos em chapas para comercialização.

A Figura 2.3 ilustra as principais etapas do processo produtivo das rochas ornamentais e os produtos gerados em cada etapa.

**Figura 2.3 – Principais etapas da produção de Rochas Ornamentais**



Fonte: Adaptado de GONÇALVES (2000).

### 2.1.4.1 Lavra

O processo de exploração das rochas ornamentais é conhecido como lavra. Os métodos de lavra definem a sequência de trabalhos para o aproveitamento de uma jazida. A escolha do tipo de lavra é função da morfologia dos aflorados, do volume da reserva, da localização das características do material entre outras (REGADAS, 2006).

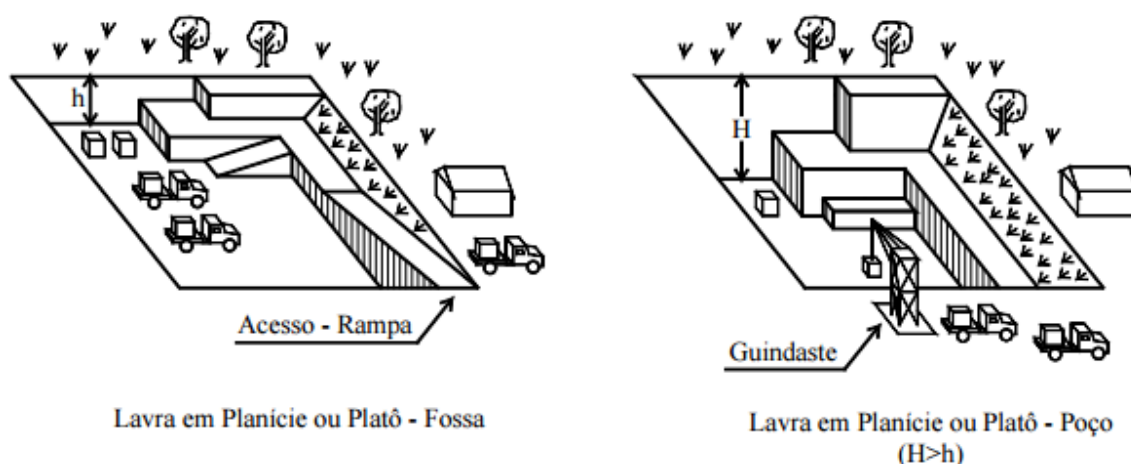
Segundo a Sardou Filho et al. (2013) existem basicamente 3 formas de execução das lavras, que são explicitados a seguir.

- Lavra por maciços rochosos

Segundo Cabello et al. (2012) é o tipo de lavra mais utilizado. A extração por maciços rochosos pode ser executada em cotas acima ou abaixo do nível do terreno.

Para superfícies horizontais ou sub-horizontais, características de planícies ou de platôs elevados, a extração dá-se em cota inferior à cota natural do terreno, após a retirada do estéril. A frente de lavra será, então, do tipo fossa ou do tipo poço (também chamadas pedreira em cava) conforme ilustrado na Figura 2.4 (CABELLO, 2011).

**Figura 2.4 - Exemplo de Lavra por fossa e poço**



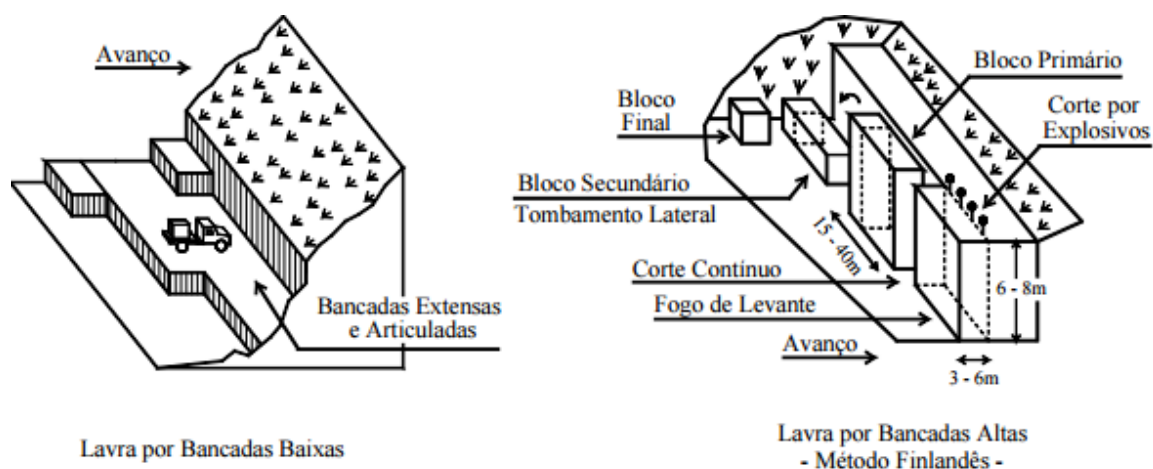
Fonte: CABELLO (2011).

Apesar de possuir baixo impacto visual, as lavras do tipo fossa podem atingir facilmente o lençol freático, causando impactos ambientais (REIS; SOUSA, 2003). Com relação a lavra tipo poço, Reis e Sousa (2003) citam que ela é mais onerosa que o tipo fossa, visto que possui longas rampas inclinadas para atingir a cota de trabalho, sendo comum problemas com inundações e acidentes de trabalho.

Desta forma, deve-se avaliar todas as condições de operação da lavra, visando identificar a melhor opção para utilização, realizando-se os devidos cuidados, conforme as normas vigentes e as exigências dos órgãos ambientais.

Quando a extração se dá acima do nível do terreno, ela pode ser realizada em bancadas baixas, cuja altura corresponde à altura do bloco (sendo melhor para jazidas homogêneas favorecendo a recuperação, pois é pouco seletiva) ou bancadas altas, constituindo-se de grandes pranchas com alturas de 4 a 16 metros (MATTA, 2003). Os dois métodos estão ilustrados na Figura 2.5.

**Figura 2.5 - Exemplo de Lavra por bancadas baixas e altas**



Fonte: CABELLO (2011).

Alencar, Caranassios e Carvalho (1996) apresentam como aspectos positivos do uso de bancadas baixas, a flexibilidade do método, por ser possível a reorientação das frentes de lavra quando da ocorrência de fatores estruturais indesejáveis, a sua elevada produtividade, e também, sua simplicidade, pelo fato de não necessitar da utilização de tecnologias avançadas e mais caras.

Já as bancadas altas, segundo Cabello et al. (2012), são utilizadas em maciços rochosos que apresentam heterogeneidade, pois permitem a seleção do bloco final durante corte do bloco secundário e final.

Ressalta-se que o tipo de lavra em bancadas é o mais utilizado no Espírito Santo (SARDOU FILHO et al., 2013).

#### - Lavra por desabamento

É um método utilizado em pedreiras localizadas em pontos de topografia acidentada, onde ocorre o desmonte do material por explosivos, em pontos de fratura da rocha, ocorrendo o desabamento dos blocos de rocha que são aparados por colchões de amortecimento (CARANASSIOS; CICCU, 1992).

Segundo Cabello et al. (2012), a lavra por desabamento está em desuso, devido ao elevado grau de perda de material (geração de rejeitos), ao impacto ambiental gerado e a insegurança a qual os operadores são expostos.

#### - Lavra por matacões

A lavra de matacões consiste em um método menos oneroso por apresentar custos baixos para abertura de acessos, mão-de-obra pouco qualificada e custos operacionais reduzidos, mas com grandes problemas ambientais (REIS; SOUSA, 2003).

Envolve trabalhos de remoção de solo, com objetivo de desenterrar os matacões parcialmente soterrados. Após a exposição, os mesmos são desdobrados através da técnica de fogo raiado, com a utilização, de explosivos a base de pólvora negra e cordel detonante, após a execução do furo com martetele pneumático (SARDOU FILHO et al., 2013).

O esquadrejamento dos blocos é feito através de marteteles e cunhas manuais ou cunhas pneumáticas (SARDOU FILHO et al., 2013; REIS; SOUSA, 2003).

Após a etapa de lavra, os blocos são encaminhados aos pátios das serrarias, onde é executada a etapa de beneficiamento em chapas (Figura 2.6).

**Figura 2.6 - Blocos de rochas no pátio da empresa aguardando o desdobramento**



Fonte: Acervo pessoal de Maxwell Klein Degen (2016).

#### *2.1.4.2 Desdobramento*

A etapa de beneficiamento de rochas ornamentais consiste no desdobramento dos blocos extraídos nas pedreiras, que são transformados em chapas que variam de 1 a 3 cm de espessura (SARDOU FILHO et al., 2013).

Este processo é conhecido como serragem, e é realizado em equipamentos chamados teares. A serragem pode ser feita através da utilização de teares com fio diamantado, com aspersão de água para evitar suspensão de pó (Figura 2.7), ou utilizando teares tradicionais de lâminas de aço em conjunto com uma polpa abrasiva (pó de rocha, granalha e cal) (Figura 2.8) (CALMON, 2007; CALMON; SILVA, 2006).



**Figura 2.7 - Desdobramento por teares com fio diamantado**



Fonte: ULIANA (2014).

**Figura 2.8 – Desdobramento por teares convencionais com polpa abrasiva**



Fonte: Acervo pessoal de Maxwell Klein Degen (2016).

A maior parte das serrarias utiliza teares com polpa abrasiva no corte, que tem como principais objetivos: lubrificar e resfriar as lâminas, evitar a oxidação das chapas, servir de veículo ao abrasivo e limpar os canais entre as chapas (MOURA et al., 2007). A polpa é composta por água, gralha (aço), cal e rocha moída. Geralmente a polpa é distribuída por chuveiros sobre o bloco através de bombeamento como visto na Figura 2.8 (SILVA, 1998 apud. MOURA et al., 2007).

Os teares com fio diamantado são formados por uma estrutura de base para colocação do bloco, colunas laterais para apoio do conjunto de fios, sistemas de tensionamento e movimentação dos fios que possibilita o corte e um conjunto de chuveiros para aspergir água que diminuem a suspensão de material particulado e resfriam o sistema. Geralmente este tipo de tear apresenta maior produtividade e são mais compactos comparados aos teares convencionais (ULIANA, 2014).

Segundo Chiodi Filho (2014) os teares com fio diamantado têm uma tendência natural em substituir os teares convencionais, podendo representar 80% da capacidade de produção até o ano de 2020.

### **2.1.5 Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO)**

A partir da serragem dos blocos de rochas ornamentais, nos teares, cerca de 25% a 30% dos blocos são transformados em uma lama, que é encaminhada para lagos de decantação para redução da umidade. Este resíduo é conhecido como resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais (GONÇALVES; MOURA, 2002; MOTHÉ FILHO et al., 2005).

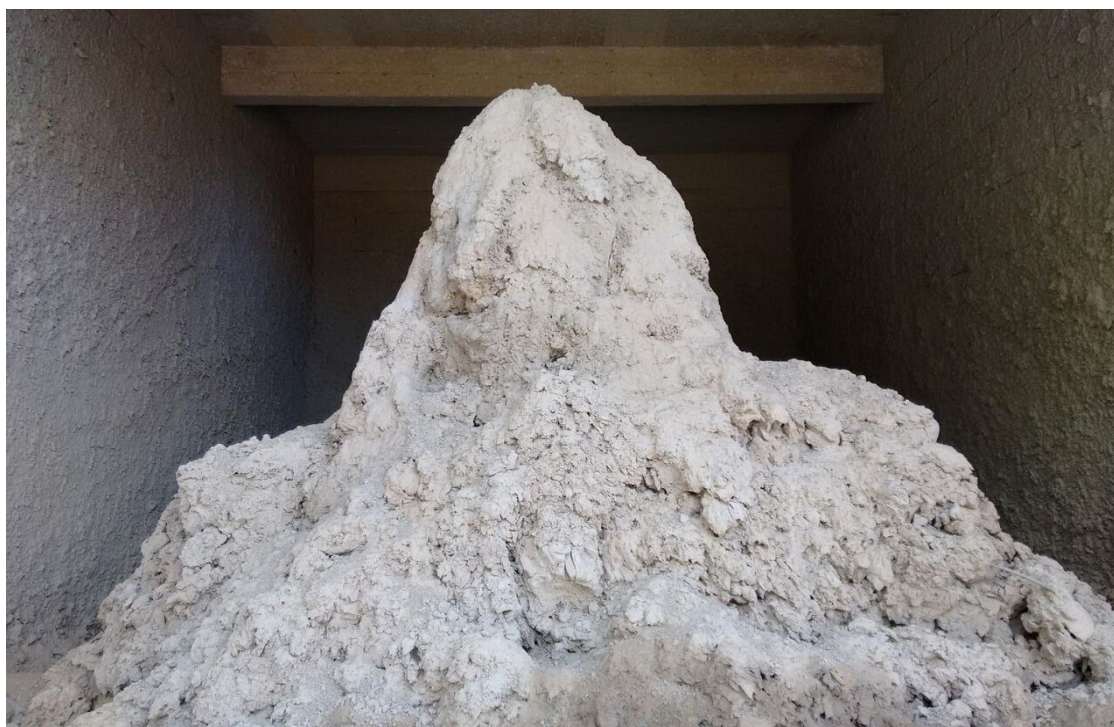
Após o processo de beneficiamento, nos teares, a lama é drenada por um sistema de esgotamento, seguindo para tanques de decantação (Figura 2.9), onde a água é reaproveitada e o material sólido (pó) é retirado e depositado nos pátios das empresas para posterior destinação (Figura 2.10).

**Figura 2.9 – RBRO em forma de lama no tanque de decantação**



Fonte: Acervo pessoal de Maxwell Klein Degen (2016).

**Figura 2.10 – RBRO gerado após a secagem**



Fonte: Acervo pessoal de Maxwell Klein Degen (2016).

O RBRO, após secagem, deve ser direcionado a um aterro sanitário, porém, devido ao grande volume gerado, e o alto custo, muitas vezes os resíduos são dispostos no meio ambiente, podendo alcançar rios, lagos, córregos e até mesmo os reservatórios naturais de água, causando impactos ambientais. Além disso, após seco, o resíduo constitui em um pó muito fino, que pode provocar danos à saúde humana (COSTA, 2016).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) estabelece como prioridades a não-geração, o reaproveitamento, a reciclagem e por último a destinação dos resíduos em aterros sanitários, devendo-se priorizar meios de reaproveitamento frente à destinação final em aterros sanitários.

Desta forma, iniciativas que visem o reaproveitamento deste resíduo são imprescindíveis, tanto garantir uma maior sustentabilidade no processo, como para se ter menores impactos advindos da disposição inadequada no meio ambiente.

O uso do RBRO em materiais de construção se apresenta como uma alternativa bastante interessante, tendo em vista a grande demanda do setor da construção civil por matérias primas, e a possibilidade de reaproveitamento deste material (CALMON, 2008).

Considerando ainda, que o Espírito Santo é o principal produtor de rochas ornamentais, e assim, responsável pela geração de 75% dos resíduos de beneficiamento das rochas, pesquisas estaduais, que busquem o reaproveitamento deste resíduo possuem grande relevância.

#### *2.1.5.1 Composição Química*

O resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais possui propriedades químicas bem variadas, pois é composto de vários tipos de rocha, uma vez que as empresas beneficiadoras desdobram diferentes materiais de acordo com o mercado consumidor. A Tabela 2.1 a composição química do RBRO observada por diferentes autores.

**Tabela 2.1 - Composição química do resíduo de rochas ornamentais**

Composição	ULIANA et al. (2013) Amostra 1*	ULIANA et al. (2013) Amostra 2*	MOTA et al. (2012)	SANTOS et al. (2010)	MANHÃES et al. (2008)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,57	3,79	11,76	8,74	5,04
SiO <sub>2</sub>	63,75	66,80	49,47	14,6	72,17
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,55	13,50	14,39	5,85	10,8
CaO	3,72	3,44	8,79	40,67	2,33
MgO	0,31	0,93	2,21	1,59	0,94
TiO <sub>2</sub>	0,22	0,16	1,14	1,43	1,07
Na <sub>2</sub> O	3,58	3,50	1,99	0,87	2,34
K <sub>2</sub> O	5,01	3,83	6,28	1,89	3,87
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,07	0,07	NA	NA	0,27
SO <sub>3</sub>	0,06	0,06	NA	NA	NA

Nota: N.A.- Não apresentado

Fonte: Adaptado de MANHÃES et al. (2008); MOTA et al. (2012); SANTOS et al. (2010) e ULIANA et al. (2013).

\* No trabalho de Uliana et al. (2013) a amostra 1 refere-se ao resíduo proveniente de teares convencionais que utilizam polpa abrasiva com granalha de aço enquanto a amostra 2 é proveniente de teares de fio diamantado.

Como visto na Tabela 2.2, o RBRO apresenta composições variadas, dependendo das características minerais da região onde é feita a extração (lavra). Porém, pode-se identificar que é um resíduo composto majoritariamente por SiO<sub>2</sub> (Sílica) e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Alumina), componentes comuns em rochas graníticas e CaO (Óxido de Cálcio), comum em mármore.

Além disso, estes componentes estão presentes nas adições minerais utilizadas para melhoria das propriedades do concreto, sendo um bom indício da possibilidade de utilização deste resíduo para este fim.

#### 2.1.5.2 Classificação do resíduo

Segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004, p.1) resíduos sólidos são:

[...] resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Com relação à sua periculosidade, os resíduos podem ser classificados em 3 classes.

a) Resíduo Classe I - Perigosos: são aqueles que em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas podem:

- apresentar riscos à saúde pública, provocando ou contribuindo, de forma significativa para um aumento de mortalidade ou incidência de doenças;
- apresentar riscos ao meio ambiente, quando manuseados ou dispostos de forma inadequada;
- ser inflamáveis, corrosivos, reativos, tóxicos ou patogênicos, conforme definido na norma NBR 10004 (ABNT, 2004);

b) Resíduo Classe II - Não perigosos: são aqueles que não se enquadram na classificação de Resíduo Classe I – Perigosos; alguns dos resíduos desta classe encontram-se listados no Anexo H da NBR 10004 (ABNT, 2004), sendo:

\* Resíduo Classe IIA - Não Inertes: são aqueles que não se enquadram como resíduos Classe I - Perigosos ou resíduo classe IIB – Inertes. Os não inertes podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

\* Resíduo Classe IIB - Inertes: são aqueles que quando amostrados segundo a NBR 10007 (ABNT, 2004) e outros testes não tiveram seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água.

Segundo Uliana et al. (2013), Santos et al. (2010), Manhães et al. (2008) e Gonçalves (2000) o resíduo de rochas ornamentais é classificado como sendo Resíduo Classe IIA – Não Inerte, não apresentando possibilidade de causar danos à saúde das populações, e podendo assim, ser utilizado como um subproduto na construção civil.

## 2.2 ADIÇÕES MINERAIS

A ASTM C125 define aditivo/adição (em inglês apenas “admixture” ou chemical and mineral admixture, respectivamente) como qualquer material – que não seja água,

agregados, cimentos hidráulicos ou fibras – usado como ingrediente do concreto ou argamassa e adicionado à massa imediatamente antes ou durante da mistura (ASTM, 2000).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), as adições minerais normalmente são materiais finos com composição silicosa que podem ser adicionados ao concreto em teores de até 70% em relação a massa de material cimentício total.

A utilização de adições minerais proporciona grandes benefícios ao concreto como baixo calor de hidratação, melhorando a resistência à fissuração térmica; refinamento dos poros e fortalecimento da zona de transição na interface aumentando a resistência final e impermeabilidade, além de uma durabilidade muito maior no que diz respeito ao ataque por sulfatos e à expansão pela reação álcali-agregado (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Devido às preocupações com relação ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, a utilização dos resíduos como adições, tem se apresentado uma tendência. Assim, muitas das adições minerais utilizadas hoje em dia são resíduos gerados em indústrias, como a escória de alto forno, que é o rejeito proveniente da fabricação do aço, a cinza volante que é produzida na queima de combustíveis em centrais termoelétricas a carvão, a cinza de casca de arroz utilizada na geração de energia térmica, entre outras (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), as adições minerais são classificadas em pozolânicas, cimentantes e inertes (fíler).

Materiais pozolânicos, segundo a NBR 12653 (ABNT, 2015) são materiais silicosos ou silicoaluminosos que, sozinhos, possuem pouca ou nenhuma propriedade ligante mas que, quando finamente divididos e na presença da água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades ligantes. As pozolanas podem ser divididas em naturais, material de origem vulcânica ou de origem sedimentar com atividade pozolânica, ou em artificiais como os subprodutos industriais (cinza da casca de arroz, cinza volante e sílica ativa) ou materiais submetidos a tratamento térmico como as argilas calcinadas ou termicamente ativadas (DAL MOLIN, 2011).

Já os materiais cimentantes, são compostos que quando em contato com a água, se hidratam lentamente, produzindo compostos semelhantes aos obtidos na hidratação do cimento Portland. Como estes compostos possuem hidratação lenta é necessário o emprego de uma forma de ativação para acelerar as reações, como por exemplo a ativação química utilizando o clínquer Portland. Um exemplo de material cimentante muito utilizado em adições é a escória de alto forno (SILVA, 2008).

As adições minerais inertes, ou fíler, são materiais finamente divididos sem atividade química, atuando apenas como pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento e melhorando o empacotamento granulométrico. Como exemplos de adições minerais inertes tem-se o calcário, pó de quartzo e pó de pedra (DAL MOLIN, 2011).

### **2.2.1 Efeito das adições pozolânicas nas propriedades do concreto**

O concreto, em nível microestrutural é multifásico, composto por três fases principais (pasta – meio aglutinante; agregado e zona de transição), sendo que existem sub-fases em cada uma (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A Fase de transição é definida por Mehta e Monteiro (2008), como sendo uma película delgada com espessura típica de 10 a 50  $\mu\text{m}$ , disposta ao redor do agregado e apresenta uma estrutura muito diferente do restante da pasta cimentícia. Esta fase apresenta uma maior fragilidade, exercendo grande influência sobre a resistência mecânica e a durabilidade do concreto (NEVILLE, 1997).

Segundo Metha e Aïtcin (1990), as adições pozolânicas atuam exatamente na Zona de transição, de forma a reduzir as características que prejudicam as propriedades do concreto:

- as partículas pozolânicas segmentam os canais de percolação da água na pasta de cimento, reduzindo a exsudação e segregação, causas primárias da falta de homogeneidade microestrutural no concreto;
- as pequenas partículas de pozolana, por serem menos reativas do que o cimento, ao serem dispersas na pasta, promovem inúmeros locais de nucleação para a



precipitação dos produtos de hidratação, tornando a pasta mais homogênea em termos de distribuição de poros finos;

- por efeito físico, as partículas pequenas propiciam um maior empacotamento com o cimento e diminuem o efeito parede da zona de transição, promovendo o aumento da resistência do concreto.

O cimento Portland é composto principalmente por  $C_3S$  ( $3CaO.SiO_2$ ),  $C_2S$  ( $2CaO.SiO_2$ ),  $C_3A$  ( $3CaO.Al_2O_3$ ) e  $C_4AF$  ( $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ ), sendo o  $C_3S$  e o  $C_2S$  os compostos presentes em maior quantidade. De forma simplificada, a reação de hidratação ocorre quando a água entra em contato com esses compostos, reagindo e formando silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

Cimento Portland =  $C_3S + H \rightarrow C-S-H + CH$  (rápido)

Cimento Portland + Pozolana = Pozolana +  $CH + H \rightarrow C-S-H$  (lento)

Dentre estas, a reação pozolânica ocorre de forma mais lenta, proporcionando menor taxa de liberação de calor e desenvolvimento da resistência mais lenta, consome hidróxido de cálcio, melhorando a durabilidade da pasta em ambientes ácidos e os produtos da reação são muito eficientes em preencher espaços capilares, melhorando a resistência e a impermeabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Desta forma, a adição de pozolanas no concreto propicia uma melhoria na microestrutura, e assim, na durabilidade dos concretos.

### 2.3 ESTUDOS DE APROVEITAMENTO DO RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

Vários autores vêm pesquisando o resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais. Gonçalves (2000) aplicou o resíduo como uma adição ao concreto e obteve resultados favoráveis ao seu uso. Calmon et al. (1997) utilizaram o resíduo para a produção de argamassas e constatou melhorias significativas nas propriedades físicas e mecânicas. No entanto no estado fresco os ensaios realizados mostraram uma redução da retenção de água das argamassas e uma maior exsudação de água. Apesar desse comportamento prejudicar a

trabalhabilidade das argamassas o fenômeno não ocorreu de maneira muito significativa.

Gonçalves (2000) utilizando o resíduo como uma adição ao concreto analisou seu desempenho mecânico e de durabilidade utilizando porcentagens de adições de 10 e 20% em relação à massa de cimento. Nos resultados dos ensaios mecânicos as adições melhoraram o desempenho do concreto. Quanto à durabilidade observou-se redução significativa na taxa de absorção com 10% de adição e aumento com 20% de adição, em relação a porosidade o concreto com 10% de resíduo foi o que obteve melhor resultado.

Moura et al. (2002) pesquisando o uso do resíduo na produção de argamassas obteve resultados de resistência à compressão melhores comparados a argamassa de referência. Os autores ainda utilizaram o RBRO para a produção de placas de argamassa para piso e constataram que sua utilização na mistura proporciona placas com melhor acabamento.

Pontes e Stellin Júnior (2005) testaram o desempenho do resíduo em blocos de cerâmica vermelha e constataram que sua utilização em teores de até 30% atende aos requisitos, obtendo resultados promissores. Os autores testaram, também, a separação do ferro contido no resíduo por dois métodos, a separação magnética e a separação por ciclone, constatando que a separação magnética é mais eficiente.

Lameiras et al. (2005) no estudo de avaliação do potencial de utilização do resíduo do beneficiamento de chapas de granito em concretos, observaram maiores ganhos de resistência quando se substituiu parte do agregado pelo resíduo e maiores perdas quando se incorporou o resíduo em substituição ao cimento para os concretos com maior relação água/cimento. Com relação à influência da adição do resíduo sobre a trabalhabilidade, os concretos produzidos com substituições tanto de agregado quanto de cimento Portland pelo resíduo apresentaram uma perda de trabalhabilidade significativa, indicando que devido a sua elevada área específica, aumenta a demanda de água para se manter a consistência constante.

Lopes et al. (2006) estudando o potencial de utilização do resíduo de beneficiamento de mármore e granito como fíler na produção de concretos puderam

concluir que o resíduo estudado é um material não reativo, podendo ser utilizado teores de 10% em substituição parcial ao cimento.

No estudo de análise de argamassas com resíduo de corte de rochas ornamentais proposto por Reis e Tristão (2007) o resíduo não interferiu significativamente na retenção de água, mantendo a trabalhabilidade da argamassa durante um período adequado e o resíduo contribuiu para o aumento da resistência à compressão quando substituiu a areia na argamassa devido à sua ação como “fíler”, preenchendo os vazios na matriz da argamassa.

Alves (2008) em seu estudo das características e da viabilidade do uso de resíduos gerados no polimento de rochas graníticas como adição em concretos observou que os concretos com relação a/c de 0,65 e 0,55, obtiveram sensíveis melhorias em suas trabalhabilidades com a adição do pó de granito, resultando em concretos mais homogêneos, bem adensados e, conseqüentemente, de melhor qualidade. Porém, no concreto com relação a/c de 0,45 e com 20% de adição de resíduo, a trabalhabilidade foi comprometida, devido o concreto possuir excesso de materiais finos, concluindo que 20% de adição do resíduo, não é um percentual indicado para este concreto.

Avaliando a resistência dos concretos produzidos com adição de resíduo, Alves (2008) obteve resultados onde o concreto demonstrou incremento na resistência para as relações a/c de 0,65 e 0,55 nas porcentagens de adições 20 e 10%, respectivamente, e para o concreto com relação a/c de 0,45 provocou perda de resistência.

Prando (2009) através de ensaios de resistência à compressão analisou se a incorporação do resíduo quando adicionada ao concreto altera suas propriedades físicas. Para tais testes, foram preparados corpos de prova contendo uma variação no teor de resíduo na faixa entre 5 a 25% em substituição ao percentual de cimento, aplicadas ao teste resistência a compressão axial. O concreto teste com adições de 5 a 25% de resíduo em sua composição apresentou uma ligeira queda de resistência ao teste de ruptura.

Utilizando resíduos oriundos do desdobramento de rochas ornamentais para confecção de blocos, Freire et al. (2009) produziram argamassas com teores de

substituição de cimento de 10 e 25% por resíduo de rochas e obtiveram resultados onde a argamassa com 10% de resíduo reduziu a absorção de água, proporcionando uma diminuição da porosidade. Com relação à resistência a compressão axial com 10% de adição de resíduo obteve ganho médio de resistência maior que as argamassas com 25% de adição de resíduo.

Moura e Leite (2011), avaliando a viabilidade da produção de blocos com utilização de resíduo de serragem de rochas ornamentais para alvenaria de vedação, em substituição ao cimento, constataram que nos blocos produzidos em laboratório não houve diferença significativa entre a resistência à compressão dos blocos com resíduo e do bloco de referência (sem resíduo). Os testes de absorção demonstraram que a absorção média dos blocos com até 15% de resíduo foi menor do que a absorção média dos blocos de referência. Quanto aos blocos produzidos em fábrica, a resistência à compressão média com utilização de 5% e 10% de resíduo foi superior à resistência de referência. Os blocos com 15% de resíduo apresentaram uma redução de 10% na resistência média, em relação aos blocos de referência.

No estudo de aplicação de tratamento térmico em resíduos de rochas para substituição parcial do cimento, Schmidt et al. (2011) partiram da ideia de se verificar a potencialidade da utilização do resíduo como fíler em uma mistura no concreto ou possivelmente como material pozolânico, através de tratamento térmico. Seus resultados preliminares indicaram que a utilização do resíduo em concretos convencionais é possível como fíler, já que o tratamento térmico testado com temperaturas de 0 °C, 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C e 700 °C, com duração de 1 hora em forno Mufla, não foi eficaz para uma possível ativação pozolânica do material.

Com o objetivo investigar a influência da incorporação RBRO sobre propriedades do concreto em relação com a resistência à agentes agressivos externos do tipo íons sulfato, Soares (2014) produziu concretos com diferentes relações água/cimento e adição do RBRO em relação à massa de cimento em teores de 5%, 10% e 15%, nos concretos submetidos ao ensaio de ataque de sulfatos verificou-se uma microfissuração superficial típica, além da constatação do consumo de hidróxido de cálcio e possível presença de etringita, através do EDS. No entanto,

os resultados indicam o efeito positivo do uso do RBRO na resistência ao ataque de sulfatos em teores de 5% de adição.

Com o objetivo de produzir material pozolânico Uliana (2014) aplicou tratamento térmico no RBRO nas temperaturas de 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400 e 1500°C, chegando à conclusão que o tratamento a 1200°C foi o mais eficiente. A autora ainda produziu argamassas substituindo material cimentício por RBROTT em teores de 5, 10, 15 e 20% em volume, para a verificação da atividade pozolânica, além de argamassas utilizando o resíduo sem tratamento térmico para comparar os resultados. As argamassas produzidas com 15% de resíduo sem tratamento apresentaram redução de até 20% da resistência à compressão enquanto as argamassas produzidas com RBROTT a redução foi de 9%. De forma geral os resultados se mostraram promissores quanto ao tratamento térmico do RBRO.

Sato (2015) no campo da reologia, caracterizou o comportamento de pastas cimentícias com e sem adição de RBRO em sua condição natural onde foram fabricadas pastas cimentícias com três relações a/c (0,45; 0,55; 0,65) e quatro teores de adição do resíduo (0%, 5%, 10%, 15%) e quando submetidas ao ensaio de fluxo as amostras se comportaram como um fluido não newtoniano, pseudoplástico e tixotrópico, já no ensaio oscilatório as pastas cimentícias de referência e as com adição de 5% de RBRO apresentaram uma deformação crítica muito próxima independentemente da relação a/c, mostrando uma tendência de suportar maiores deformações, percebeu-se também que há uma tendência de correlação negativa tanto entre a resistência a compressão e o módulo elástico G quanto entre a trabalhabilidade e a tensão de escoamento das amostras, confirmando que o resíduo se comportou como um fíler, tornando a pasta cimentícia mais viscosa e com menor trabalhabilidade, pois preenche os vazios intergranulares na matriz.

Dietrich (2015) avaliou o processo de corrosão das armaduras induzido pela ação de íons cloreto, em concretos produzidos com adição do RBRO, produzindo 36 prismas de concreto, com 2 corpos de prova de aço CA-50 cada e submetendo-os 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, medindo o potencial de corrosão das

armaduras após imersão e após secagem dos corpos de prova, até a despassivação das armaduras, porém 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.

Vazzoler (2015) investigou a potencialidade pozolânica do RBROTT para a produção de pasta cimentícia seguindo os parâmetros da NBR 12653 (ABNT, 2014), por meio da fluorescência de raios X, da difração de raio X e avaliou sua microestrutura por imagens originadas por microscópio eletrônico de varredura. Os resultados apontam que a o RBROTT possui capacidade pozolânica sendo capaz de proporcionar microestrutura mais densa e uma possível intensificação da produção de C-S-H.

Para avaliar aspectos mecânicos e de durabilidade em concretos com adição de RBROTT, Mittri (2016) produziu concretos com diferentes relações água/cimento e teores de adição de 5 e 10% de RBROTT em relação a massa de cimento. Os ensaios mecânicos apontam que a adição de RBROTT no concreto proporciona aumento significativo na resistência à compressão. O autor avaliou a durabilidade dos concretos por meio de ensaios de penetração de íons cloreto e concluiu que a adição do resíduo proporcionou até 70% de redução do ingresso de cloretos aproximadamente.

Oliveira (2017) analisando a influência da adição de RBROTT em pastas cimentícias observou aumento significativo na tensão de escoamento e viscosidade, em relação a propriedades reológicas, e aumento de resistência à compressão, em relação a propriedades mecânicas, nas argamassas produzidas com 10, 15 e 20% de adição de RBROTT

Analisando toda a bibliografia pode-se verificar que o RBRO pode ser utilizado como um subproduto da construção civil em diferentes tipos de materiais como cerâmicas, argamassas, pré-fabricados, concreto entre outros, desde que teores ótimos de incorporação sejam atendidos.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os materiais que serão utilizados, bem como os procedimentos para a produção dos concretos e os ensaios experimentais realizados deste trabalho.

Todos os experimentos foram desenvolvidos no Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção (LEMAC) do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), com exceção do ensaio de granulometria a laser do RBROTT que foi realizado no Laboratório de materiais cerâmicos do programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais (PROPEMM) do Instituto Federal do Espírito Santo (IFES).

#### 3.1 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

O planejamento dos experimentos tem por objetivo definir as variáveis que irão influenciar os resultados dos ensaios. Para este trabalho serão consideradas três tipos distintos de variáveis, que são: variáveis dependentes, variáveis independentes e variáveis controle.

##### 3.1.1 Variáveis dependentes

As variáveis dependentes são aquelas cujo comportamento se quer avaliar em função das oscilações das variáveis independentes, ou seja, são aquelas cujo resultado só é obtido de acordo com a realização de ensaios. Neste trabalho, as variáveis que podem ser classificadas como dependentes são:

- Índice consistência pelo abatimento do tronco de cone;
- Resistência à compressão;
- Percentual de absorção por imersão;
- Absorção por capilaridade;
- Potencial de corrosão;
- Taxa de corrosão.

### 3.1.2 Variáveis independentes

São aquelas definidas na pesquisa, sendo introduzida intencionalmente para verificar a relação entre suas variações e a influência que produzem nas variáveis dependentes. Neste trabalho as variáveis independentes são:

- Percentual de adição do resíduo em relação à massa do cimento (0%, 10%, 15% e 20%);
- Percentual de substituição do resíduo em relação à massa do cimento (0%, 10%, 15% e 20%);
- Relação água/cimento (0,50, 0,65);
- Idade (28, 56, 91, 182, 270 e 365 dias)

### 3.1.3 Variáveis de controle

São as variáveis que não são objeto de estudo, mas que tem grande influência nas variáveis independentes e dependentes. Para o presente estudo, as variáveis de controle são:

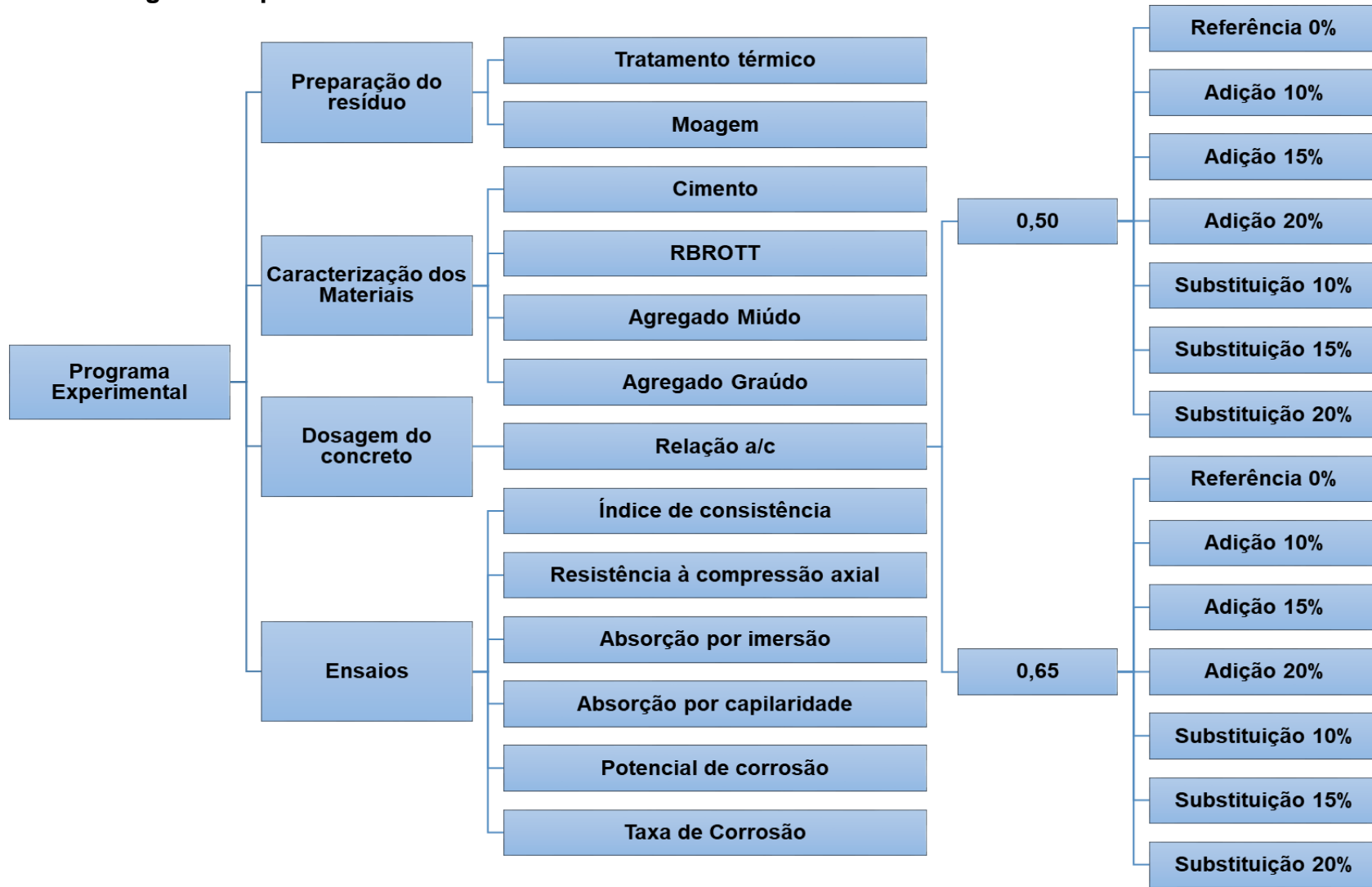
- Características dos agregados;
- Tipo de cimento (CP V – ARI);
- Dosagem do concreto (IPT/EPUSP);
- Procedimento de cura (Tanque submerso);
- Temperatura de tratamento térmico do resíduo (1200°C);
- Procedimento de moagem do resíduo (3,5 Horas).

## 3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental tem a finalidade de determinar quais ensaios serão realizados em laboratório, bem como definir os materiais que serão utilizados. Através desses ensaios será possível obter os resultados necessários para verificar a hipótese inicial de que o RBROTT irá melhorar as propriedades do concreto. O programa experimental foi dividido em três etapas, como pode ser visto na Figura 3.1.



Figura 3.1 - Programa experimental.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram definidas duas relações água/cimento (0,50, 0,65), três porcentagens diferentes de adição (10%, 15% e 20%) em relação à massa de cimento e três porcentagens de substituição do cimento pelo RBROTT, (10%, 15%, 20%). As porcentagens de adições foram definidas a partir dos resultados do trabalho de Mittri (2016) que trabalhou com adições de 5% e 10% em relação à massa do cimento e constatou que os concretos com 10% de adição apresentavam desempenho melhor que o concreto de referência, e com base nesses resultados optou-se pelos teores de incorporação citados.

Os ensaios foram realizados tanto no estado fresco como no estado endurecido do concreto, e podem ser observados na Tabela 3.1, e na Tabela 3.2 tem-se o número de corpos de prova para cada traço de concreto.

**Tabela 3.1 - Ensaio realizados nos concretos produzidos.**

Ensaio	Tipo de Corpo de prova	Idade	Quantidade de corpos de prova para ensaio	Total
Índice de consistência (ABNT NBR NM 67: 1998)	Concreto Fresco	-	-	-
Resistência à compressão axial (ABNT NBR 5739:2007)	Cilíndrico 10x20cm	28	4	24
		56	4	
		91	4	
		182	4	
		270	4	
		365	4	
Absorção por capilaridade (ABNT NBR 9779: 2012)	Cilíndrico 10x20cm	28	3	12
		56	3	
		91	3	
		182	3	
Absorção por imersão e Massa específica (ABNT NBR 9778:2009)	Cilíndrico 10x20cm	28	2	6
		56	2	
		91	2	
Potencial de corrosão (ASTM C-876:2015)	Prismático 7x15x15cm	91	3	3
Taxa de Corrosão	Prismático 7x15x15cm	-	Os ensaios foram realizado nos CPs utilizados para medir o potencial de corrosão	-
Total				45

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Tabela 3.2 - Quantidade de corpos de prova por traço de concreto.**

Relação A/C	Tipo	Qty. de Cps
0,50	REF	45
	A10	45
	A15	45
	A20	45
	S10	45
	S15	45
	S20	45
0,65	REF	45
	A10	45
	A15	45
	A20	45
	S10	45
	S15	45
	S20	45
Total		630

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.3 MATERIAIS

Os materiais utilizados para o preparo do concreto foram agregado miúdo, agregado graúdo, água, cimento e o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente e moído.

#### 3.3.1 Agregado miúdo

Como agregado miúdo foi utilizado areia branca quartzosa natural, extraída de jazida. A areia foi submetida a secagem em temperatura ambiente e peneiramento para retirada de impurezas. Os ensaios de caracterização da areia foram realizados no LEMAC - UFES, seguindo as recomendações normativas brasileiras, que podem ser observadas na Tabela 3.3. Na Figura 3.2 pode-se observar que a areia utilizada apresenta elevado teor de matéria orgânica.

**Tabela 3.3 - Ensaio de caracterização realizados no agregado miúdo.**

Propriedades	Normas	Resultado
Módulo de Finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	1,75
Dimensão Máxima Característica (mm)	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	2,40
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 52 (ABNT, 2009)	2,49
Volume de vazios (%)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	30,3
Matéria Orgânica	NBM NM 49 (ABNT, 2001)	Mais escura
Material Pulverulento (%)	NBR NM 46 (ABNT, 2003)	6,88
Teor de Argila e Materiais Friáveis (%)	NBR 7218 (ABNT, 2010)	0,37
Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1,73

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 3.2 - Ensaio de determinação de matéria orgânica no agregado miúdo**

Nota: Solução padrão á esquerda (mais claro) e Solução ensaiada á direita (mais escuro)

Fonte – Acervo pessoal.

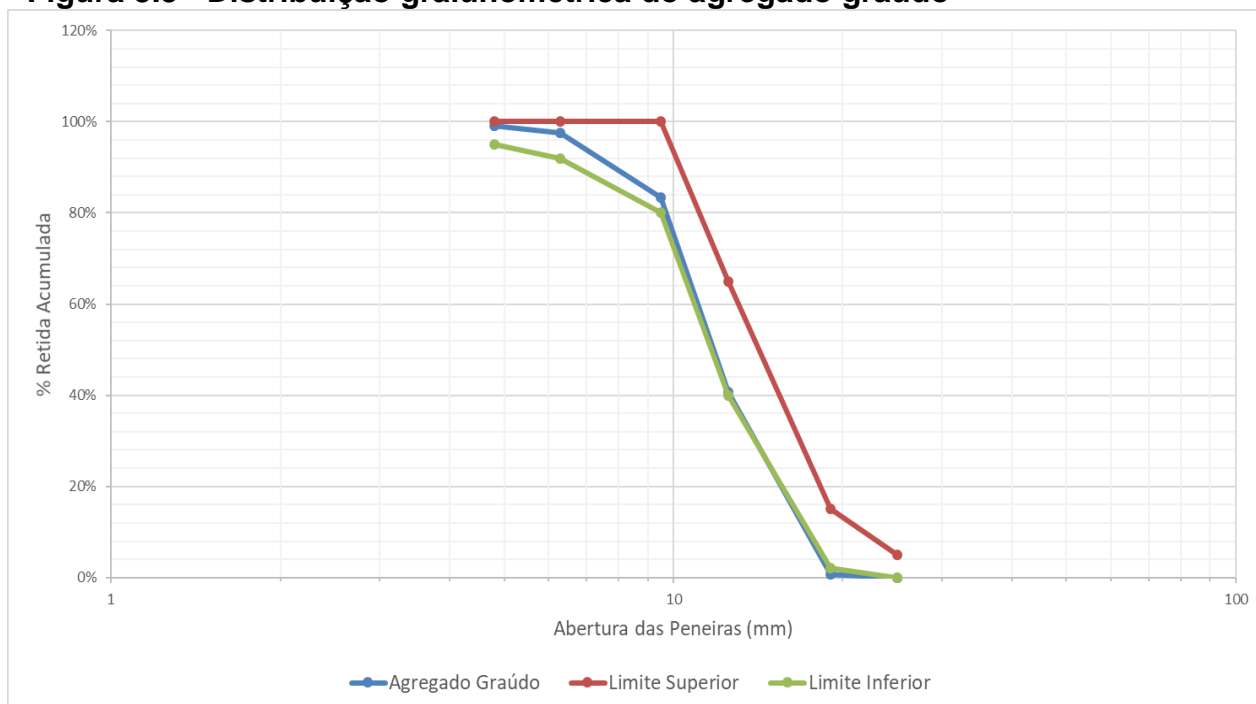
### 3.3.2 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi a brita 1, proveniente da britagem de rochas naturais, atendendo as características da NBR 7211 - Agregados para concreto – Especificações (ABNT, 2009). O agregado graúdo foi lavado e seco ao ar, sendo posteriormente ensaiado de acordo com as normas brasileiras descritas na Tabela 3.4. Na Figura 3.3 é possível observar a distribuição granulométrica do agregado graúdo que se enquadra na faixa da zona utilizável para produção de concreto.

**Tabela 3.4 - Ensaio realizados no agregado graúdo.**

Propriedades	Normas	Resultados
Análise granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	Figura 3.3
Dimensão Máxima Característica (mm)	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	19
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 53 (ABNT, 2009)	2,866
Absorção de água (%)	NBR NM 53 (ABNT, 2009)	0,728
Massa unitária no estado solto (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1,512

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 3.3 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo**

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.3.3 Água

A água utilizada para a produção do concreto foi fornecida pela concessionária de serviço local. Segundo a NBR 15900-1 - Água para amassamento do concreto- Parte 1: Requisitos (ABNT, 2009) por se tratar de uma água de abastecimento público não é necessário a realização de ensaios para caracterização sendo que esta água é considerada adequada para uso em concreto.

### 3.3.4 Cimento

Optou-se pelo uso do cimento CP V – ARI para a produção dos concretos, que foi escolhido devido a menor porcentagem de adições dentre os cimentos disponíveis

no mercado, desta forma há uma menor interação entre o resíduo adicionado e as adições já presentes no cimento. O Cimento Portland foi ensaiado seguindo as normas presentes na Tabela 3.5 e atende a todos os requisitos estabelecidos pela NBR 5733 (ABNT, 1991).

**Tabela 3.5 - Ensaios realizados no Cimento CP V ARI.**

Propriedades		Método de ensaio	Limites NBR 5733 (ABNT, 1991)	Resultado
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		NBR NM 23 (ABNT, 2001)	N.E.	3,09
Finura	Material retido na peneira#400 (%)	Controle LafargeHolcim	N.E.	2,2
	Área específica Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	NBR NM 76 (ABNT, 1996)	>3000	4751
Tempo de pega	Início de pega (min)	NBR NM 65 (ABNT, 2003)	≥60	135
	Fim de pega (min)		≤600	190
Resistência à compressão	1 dia (MPa)	NBR 7215 (ABNT, 1997)	≥14	28,4
	3 dias (MPa)		≥24	41,2
	7 dias (MPa)		≥34	46,4
	28 dias (MPa)		N.E.	54,4
Composição Química (%)	CaO	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.	63,69
	SiO <sub>2</sub>		N.E.	19,42
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		N.E.	4,87
	SO <sub>3</sub>		≤4,5	3,02
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		N.E.	2,93
	MgO		N.E.	0,86
	K <sub>2</sub> O		N.E.	0,8
	CO <sub>2</sub>	NBR NM 20 (ABNT, 2012)	≤3,5	2,49
	R.I.	NBR NM 15 (ABNT, 2012)	≤1,0	0,92
	C <sub>3</sub> A (Teórico)	Equação de Bogue	N.E.	7,74
Perda ao fogo 1000°C (%)		NBR NM 18 (ABNT, 2012)	≤4,5	3,39

Fonte: Cortesia LafargeHolcim.

### 3.3.5 Resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais

O resíduo utilizado nessa pesquisa é proveniente do beneficiamento de rochas ornamentais de uma unidade de corte e polimento de chapas localizada no município de Serra, Espírito Santo. Esta empresa desdobra em chapas os blocos

de mármore, granito e outras rochas utilizando tanto teares convencionais como teares multifio, produzindo dois tipos de resíduo característicos, resíduo com granalha (RBRO G) e resíduo sem granalha (RBRO D) respectivamente.

Após a coleta o resíduo foi encaminhado para o LEMAC onde passou pelos processos de secagem, destorroamento, homogeneização e caracterização cujos dados podem ser observados na Tabela 3.6.

**Tabela 3.6 - Propriedades químicas e físicas do RBRO.**

Propriedades		RBRO G	RBRO D
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		2,48	2,52
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )		814,85	766,28
Finura	Área específica - Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	7277,80	6179,30
	Material retido na peneira 200 (%)	8,56	3,08
	Material retido na peneira 325 (%)	18,10	7,00
Perda ao fogo (%)		0,69	3,50
Composição química (%)	SiO <sub>2</sub>	63,75	66,80
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,55	13,50
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,57	3,79
	CaO	3,72	3,44
	MgO	0,31	0,93
	K <sub>2</sub> O	5,01	3,83
	Na <sub>2</sub> O	3,58	3,50
	C	0,39	1,11
	TiO <sub>2</sub>	0,22	0,16
	SO <sub>3</sub>	0,06	0,06
	SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	85,87	85,08

Fonte: Adaptado de Uliana et al. (2015).

Nesta pesquisa apenas utilizou-se o resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais proveniente de teares multifio (RBRO D) ou seja sem granalha em sua composição.

### 3.3.6 Produção do Resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente

Com a finalidade de se alterar as características do RBRO D e transformá-lo em um material reativo, o resíduo foi submetido a tratamento térmico em mufla, na

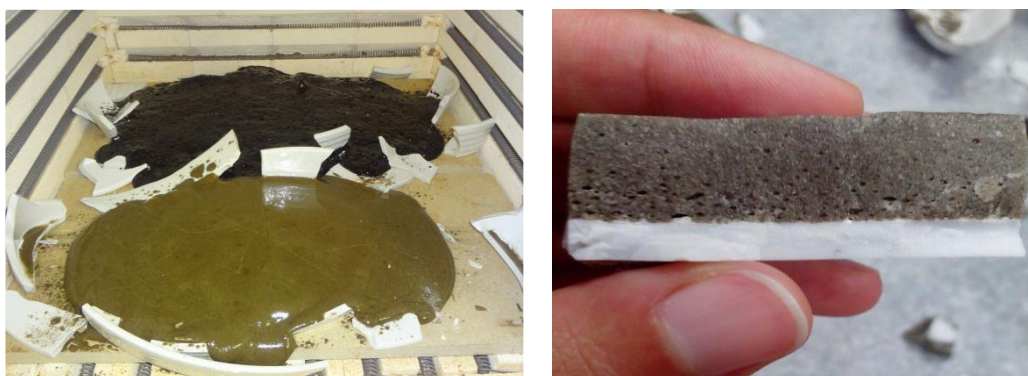
temperatura de 1200°C por 2 horas. Estes parâmetros foram fixados a partir dos resultados do trabalho de Uliana (2014), que comprovou que dentre as diferentes temperaturas aplicadas essa foi a que apresentou o melhor desempenho.

### 3.3.6.1 *Tratamento térmico*

O tratamento térmico do resíduo foi efetuado em um forno do tipo mufla da marca Linn High Therm, modelo KK 170, a uma taxa aproximada de 10°C/min até atingir a temperatura programada de 1200°C, após atingir a temperatura desejada mantinha-se a temperatura constante por 2 horas e então iniciava-se o processo de resfriamento natural até a temperatura ambiente.

Para tratar termicamente o RBRO D foi necessário a utilização de recipientes adequado à altas temperaturas e com grande capacidade. Como pode ser observado na Figura 3.4, a utilização de recipientes de porcelana proposto por Uliana (2014) torna-se bem dispendioso devido a impossibilidade de reutilização da forma, a pequena quantidade de resíduo a ser tratada por vez e devido ao resíduo ficar fortemente aderido as paredes de cerâmica proporcionado grande esforço para separar as partes.

**Figura 3.4 - Resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais após tratamento térmico**



(a)

(b)

(a) Resíduo após tratamento térmico. (b) RBROTT aderido à superfície de porcelana do recipiente.

Fonte: Adaptado de Uliana (2014) e Vazzoler (2015).

Observando essas dificuldades Mittri (2016) inicialmente optou pelo uso de um recipiente metálico para a realização do tratamento térmico e posteriormente



passou a utilizar recipientes de gesso, como pode ser observado na Figura 3.5 (a) e (b) a utilização do recipiente metálico se mostrou insatisfatório devido a fusão do recipiente com o RBRO D, já a utilização da forma de gesso, Figura 3.5 (c) e (d), revelou-se prática e funcional comparada as outras alternativas pois é de fácil produção, possui baixo custo e o gesso é capaz de suportar a temperatura necessária para o tratamento térmico do RBRO que é de 1200°C sem se fundir ao resíduo.

**Figura 3.5 - Recipiente contendo o resíduo antes e depois do tratamento térmico.**



(a)



(b)



(c)



(d)

(a) Resíduo em recipiente metálico antes do tratamento térmico. (b) Resíduo em recipiente metálico após tratamento térmico. (c) Resíduo em recipiente de gesso antes do tratamento térmico. (d) Resíduo em recipiente de gesso após tratamento térmico.

Fonte: Adaptado de Mittri (2016)

Com base nessas informações optou-se pela utilização de formas de gesso para a realização do tratamento térmico do RBRO D.

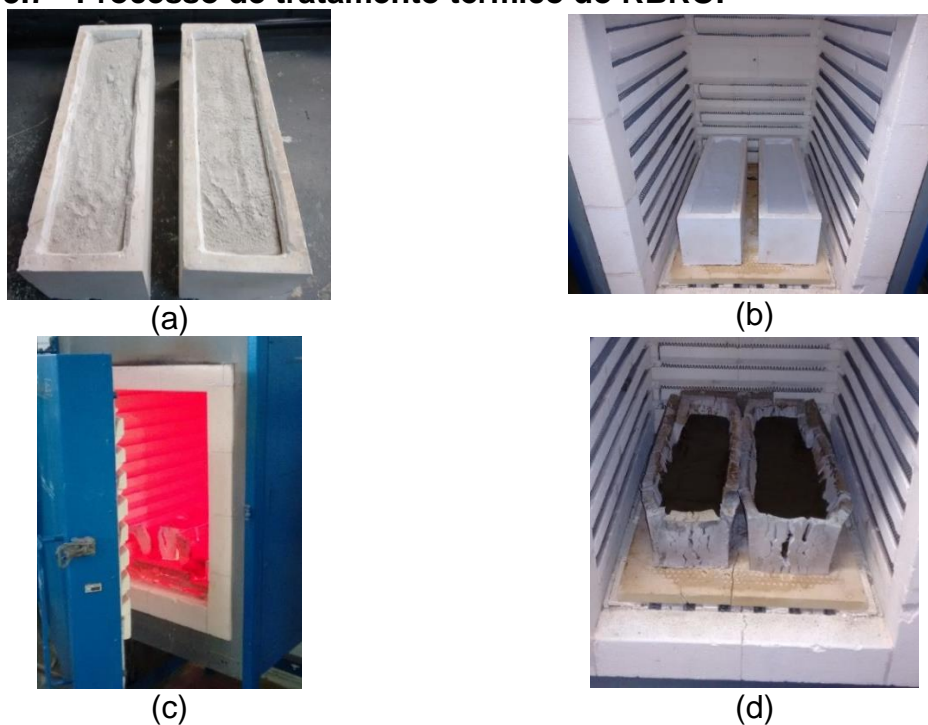
A forma para a realização do tratamento térmico do resíduo foi confeccionada utilizando um molde metálico com o formato prismático como pode ser observado na Figura 3.6 (a) com dimensões de 15cm x 15cm x 50 cm. Para a moldagem da forma de gesso utilizou-se o traço de 1:1 de gesso e água de forma que a mistura apresentasse fluidez para facilitar o preenchimento da forma e evitasse imperfeições (Figura 3.6 (b)).

**Figura 3.6 – Confeção da forma para o processo de tratamento térmico do RBRO.**



Fonte: Acervo pessoal.

**Figura 3.7 - Processo de tratamento térmico do RBRO.**



Fonte: Acervo pessoal.

Após o tratamento térmico o RBROTT foi moído em um moinho de bolas durante 3,5 horas para obtenção da granulometria adequada e então foram realizados os ensaios para caracterização física, química e mineralógica para materiais pozolânicos descritos na ABNT NBR 12653:2015.

### 3.4 DOSAGEM DO CONCRETO

Para determinar os traços dos concretos utilizados neste estudo, foi aplicado o método de dosagem IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992) e a partir do traço de referência, foram realizadas as adições/substituições de 10%, 15% e 20% de RBROTT em relação a massa de cimento.

O traço unitário e consumo de cimento dos diferentes concretos produzidos podem ser observados na Tabela 3.7.

**Tabela 3.7 - Traço unitário e consumo de cimento.**

Concreto	Teor de resíduo	Relação Água/ Cimento	Cimento	Resíduo	Areia	Brita	Consumo de Cimento (Kg/m <sup>3</sup> )
REF 0,5	-	0,5	1,00	0,00	2,06	2,94	381
A10 0,5	10% Adição		1,00	0,10	2,06	2,94	370
A15 0,5	15% Adição		1,00	0,15	2,06	2,94	368
A20 0,5	20% Adição		1,00	0,20	2,06	2,94	365
S10 0,5	10% Substituição		1,00	0,10	2,29	3,27	340
S15 0,5	15% Substituição		1,00	0,15	2,42	3,46	321
S20 0,5	20% Substituição		1,00	0,20	2,58	3,68	308
REF 0,65	-	0,65	1,00	0,00	3,33	4,16	265
A10 0,65	10% Adição		1,00	0,10	3,33	4,16	264
A15 0,65	15% Adição		1,00	0,15	3,33	4,16	263
A20 0,65	20% Adição		1,00	0,20	3,33	4,16	262
S10 0,65	10% Substituição		1,00	0,10	3,65	4,57	243
S15 0,65	15% Substituição		1,00	0,15	3,86	4,84	230
S20 0,65	20% Substituição		1,00	0,20	4,11	5,15	220

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 3.4.1 Produção dos concretos

Na produção dos concretos foi utilizada uma betoneira de eixo inclinado para a mistura dos materiais, mantendo-se sempre a mesma sequência em que os materiais eram vertidos: todo o agregado graúdo do traço e parte da água para

umedecer a brita, faz-se a mistura por aproximadamente 30 segundos. Em seguida coloca-se todo o cimento e todo o resíduo. Mistura-se por aproximadamente 2 minutos e então colocou-se toda a areia e o restante da água.

A moldagem e cura dos corpos de prova seguiram as prescrições da norma brasileira NBR 5738 (ABNT, 2015), sendo feito adensamento manual. Os corpos de prova foram desformados após 24 horas da moldagem, identificados e acondicionados em tanques contendo solução supersaturada de cal e retirados para os ensaios no dia da realização.

### 3.5 CONSISTÊNCIA DO CONCRETO FRESCO

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a trabalhabilidade é uma propriedade que determina o esforço que é necessário para manipular uma certa quantidade de concreto fresco de forma que haja uma perda mínima de homogeneidade da mistura. Ainda segundo Neville (1997) a trabalhabilidade é uma propriedade essencial, no que diz respeito ao produto final obtido, pois o concreto deve possuir uma trabalhabilidade que permita um adensamento até um máximo de compacidade com uma quantidade de energia que se esteja preparado para aplicar em certas condições.

Para Bauer (1995), trabalhabilidade, aplicada ao concreto, traduz propriedades intrínsecas da mistura fresca relacionadas com a mobilidade da massa e a coesão entre os elementos componentes, tendo em vista a uniformidade e a compacidade do concreto. A trabalhabilidade do concreto é fundamental para se conseguir compactação que assegure máxima densidade possível, com aplicação de uma quantidade de trabalho compatível com o processo de adensamento a ser empregado.

A consistência é uma das propriedades que mais afeta/influência a trabalhabilidade do concreto. Esta é avaliada seguindo a normatização brasileira da NBR NM 67 (ABNT, 1998), quanto maior a consistência menor a trabalhabilidade. Essa propriedade é influenciada pelo tipo de materiais utilizados, pela relação água-cimento, pela densidade das armaduras na forma, entre outros. Em concretos com baixa consistência deve ser levado em consideração a segregação dos materiais,

onde o agregado graúdo é depositado no fundo e a pasta de cimento fica na superfície.

### 3.6 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os corpos de prova de concreto foram submetidos ao ensaio de resistência a compressão axial seguindo o procedimento da ABNT NBR 5739:2007 nas idades de 28, 56, 91, 182, 270 e 365 dias.

O ensaio consiste em aplicar uma carga na direção axial do corpo de prova a uma velocidade constante até a ruptura como pode ser observado na Figura 3.8. Foram ensaiados 4 corpos de prova para cada traço em 6 idades, totalizando 336 corpos de prova.

**Figura 3.8 - Ensaio de resistência à compressão de corpos de prova de concreto**



(a)



(b)

Fonte: Acervo pessoal.

### 3.7 ABSORÇÃO POR IMERSÃO

O ensaio de absorção seguiu a metodologia proposta pela ABNT NBR 9778:2009, que consiste em colocar os corpos de prova em estufa à temperatura de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  por tempo suficiente de modo que a diferença entre duas pesagens consecutivas do mesmo corpo de prova, entre períodos de 24h de permanência na estufa, não excedesse 0,5% do menor valor obtido e então era registrada a massa seca. Em

seguida os mesmos foram levados até a câmara úmida para saturação ficando imersos em recipiente com água a  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  por 72h.

Completada esta etapa, os corpos de prova foram levados a um recipiente cheio de água com capacidade de ebulição como visto na Figura 3.9. A ebulição foi mantida por um período de 5h e então os corpos de prova foram mantidos submersos até o resfriamento natural à temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ . Ao final os corpos de prova foram enxugados com pano úmido para a determinação das massas saturadas e massas imersas com auxílio de balança hidrostática. Foram ensaiados 2 corpos de prova para cada traço em 3 idades diferentes totalizando 84 corpos de prova.

**Figura 3.9 – Equipamento para ensaio de absorção por imersão e fervura.**



Fonte: Acervo pessoal.

### 3.8 ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

O ensaio de absorção por capilaridade é baseado na norma ABNT NBR 9779:2012 e consiste em medir o aumento da massa do corpo de prova resultante da absorção de água em função do tempo quando apenas uma superfície do corpo de prova está exposta à água. A face exposta do corpo de prova é colocada submersa em água e a água penetra no concreto não saturado devido à sucção capilar durante o contato inicial com a água. Na Figura 3.10 é possível observar o esquema para realização do ensaio. Foram ensaiados 3 corpos de prova para cada traço em 4 idades diferentes totalizando 168 corpos de prova.

**Figura 3.10 - Ensaio de absorção por capilaridade**



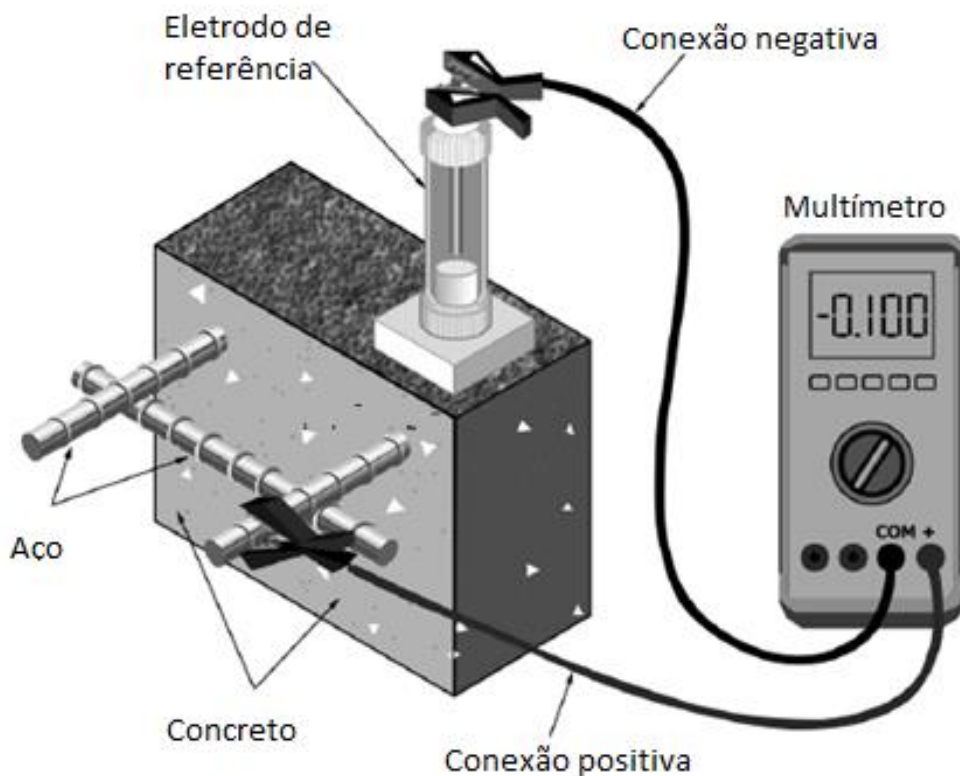
Fonte: Acervo pessoal.

### 3.9 POTENCIAL DE CORROSÃO

O ensaio de potencial de corrosão é normalizado pela ASTM C876:2013. 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.

O ensaio consiste em verificar a diferença de potencial entre a barra de aço no concreto e o eletrodo de referência, utilizando um multímetro de alta impedância. O fio do polo positivo que sai do multímetro liga-se na barra de aço, e o polo negativo que está conectado o eletrodo de referência é colocado em contato com o concreto com auxílio de uma esponja embebida com uma solução de água e detergente a 5% para facilitar a ligação. Na Figura 3.11 é possível observar o esquema para a realização do ensaio.

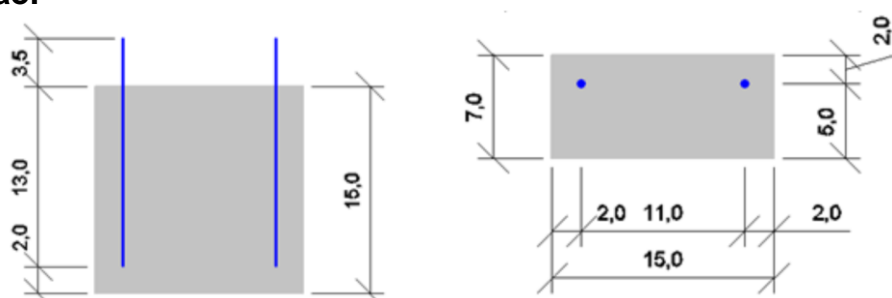
**Figura 3.11 - Esquema de realização do ensaio de potencial de corrosão.**



Fonte: Adaptado de ASTM C876:2013.

Para os ensaios de potencial de corrosão foram moldados corpos de prova de concreto de geometria prismática (15cm x 15cm x 7cm) contendo 2 barras de aço CA - 50 de diâmetro 6,3mm em cada como mostra Figura 3.12. Para cada traço foram feitos 3 corpos de prova totalizando 42.

**Figura 3.12 - Geometria dos corpos de prova para ensaio de potencial de corrosão.**



Fonte: Adaptado de Dietrich (2015).

Após o desmolde dos corpos de prova foi feita a proteção da parte exposta das barras de aço de forma que ficassem protegidas e não interferissem no resultado do ensaio, foi colocado um pequeno fio de cobre para possibilitar a leitura. A



proteção foi feita utilizando massa epóxi e tinta de esmalte sintético, as etapas do processo de proteção podem ser observadas na Figura 3.13.

**Figura 3.13 – Etapas do processo de proteção da armadura exposta nos corpos de prova.**



Fonte: Acervo pessoal.

Com o intuito de acelerar o processo de despassivação da armadura os corpos de prova foram submetidos a ciclos semanais de imersão em solução agressiva e secagem, sendo imersão parcial em solução de NaCl (5% em massa) por 2 dias, e secagem a temperatura de  $50^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$  em estufa ventilada por 5 dias até que ocorresse a despassivação da armadura em todos os corpos de prova. Na Tabela 3.8 observa-se os valores da diferença de potencial em função do tipo de eletrodo utilizado com a probabilidade de despassivação das armaduras.

**Tabela 3.8 - Probabilidade de ocorrer despassivação da armadura.**

Eletrodo	Corrosão eletroquímica: Probabilidade		
	<10%	10% - 90%	>90%
ENH	> 0,118V	(-0,118V) - (-0,032V)	< -0,032V
Cu/CuSO <sub>4</sub> , Cu <sup>2+</sup> (ASTM C 876)	> -0,200V	(-0,200V) - (-0,350V)	< -0,350V
Hg, Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> /KCl (saturado)	> -0,124V	(-0,124V) - (-0,274V)	< -0,274V
Ag, AgCl/KCl (1M)	> -0,104V	(-0,124V) - (-0,254V)	< -0,254V

Fonte: Ribeiro et al. p.186 (2012).

As leituras de potencial de corrosão foram realizadas utilizando o eletrodo de prata/cloreto de prata e ocorreram logo após os concretos serem retirados da solução de cloreto de sódio, ou seja, saturado.

Todos os corpos de prova foram submetidos a 18 semanas de ensaio, que foi o tempo necessário para que todas as barras apresentassem probabilidade de despassivação maior que 90%, que segundo a ASTM C-876:2013 ocorre quando a medida de diferença de potencial é mais negativa que -350mV para o eletrodo de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO<sub>4</sub>). As leituras de potencial de corrosão foram feitas utilizando o eletrodo de prata/cloreto de prata e então os valores foram ajustados para os valores do eletrodo de cobre/sulfato de cobre.

### 3.10 TAXA DE CORROSÃO

Após o término do ensaio de potencial de corrosão, onde foi verificada que a probabilidade dos corpos de prova estarem em processo ativo de corrosão era maior que 90%, eles foram submetidos ao ensaio de resistência de polarização (Rp) para medir a taxa de corrosão.

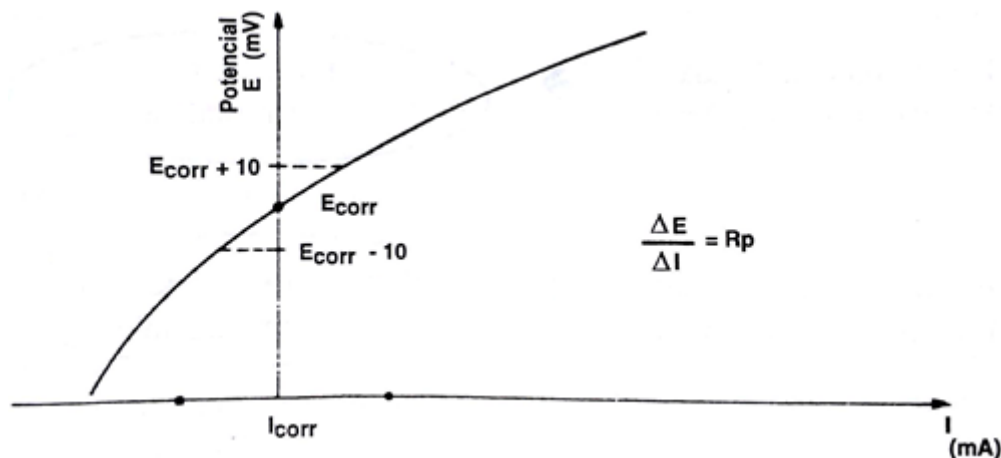
As medidas de resistência de polarização (Rp) foram obtidas usando um potenciostato Voltalab PGZ 301 (Radiometer Analytical) com eletrodo de referência de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO<sub>4</sub>), e como eletrodo auxiliar foi utilizado uma chapa de aço inox.

#### 3.10.1 Resistência de polarização

A dificuldade que um sistema possui em desenvolver um processo eletroquímico de corrosão perante a transferência de carga elétrica no metal ante uma polarização imposta representa a resistência de polarização (Rp). Para o estudo particular da corrosão em armaduras de estruturas de concreto, o sistema é o conjunto aço/eletrólito/concreto (CASCUDO, 1997). Ainda segundo o referido autor quanto maior for o valor da Rp, menos intensas serão as taxas de corrosão.

A resistência de polarização é obtida quando se aplica uma pequena polarização em torno do potencial de corrosão livre do metal em análise (E<sub>corr</sub>) e a partir daí são registrados os incrementos de corrente ( $\Delta I$ ) provenientes da polarização imposta. Para a determinação de Rp traça-se um gráfico E versus I e a partir da relação do incremento de potencial ( $\Delta E$ ) com o incremento de corrente ( $\Delta I$ ) se define Rp como pode ser observado na Figura 3.14.

**Figura 3.14 – Representação gráfica da resistência de polarização a partir dos dados de E e I.**



Fonte: WOLYNEC; ESCALANTE (1980) apud CASCUDO (1997, p.181).

Os valores de sobretensão impostos sobre o potencial de livre de corrosão ( $E_{corr}$ ) foram de -10mV a +10mV a uma taxa 10mV/min de modo a garantir a linearidade da relação  $\Delta E/\Delta I$  e também para garantir que após aplicação do potencial para determinação de  $R_p$  o potencial do eletrodo analisado retorna ao seu valor inicial, não perturbando o processo eletroquímico de corrosão instaurado no corpo de prova.

Após a determinação de  $R_p$  é possível obter a corrente de corrosão instantânea utilizando a equação de Stern-Geary (Equação 1).

$$I_{corr} = \frac{\beta_a \times \beta_c}{2,3(\beta_a + \beta_c)} \times \frac{\Delta I}{\Delta E} = \frac{B}{R_p} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

$I_{corr}$  = corrente de corrosão ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ );

$\beta_a$  e  $\beta_c$  = constantes anódicas e catódicas determinadas experimentalmente por métodos gráficos (mV);

$\Delta I$  = variação da corrente (mA);

$\Delta E$  = variação de potencial (mV);

$B$  = constante de Stern-Geary (mV).

E por fim, utilizando a equação 2, converte-se a corrente de corrosão para taxa de corrosão.

$$\text{Taxa de corrosão} \left( \frac{\mu\text{m}}{\text{ano}} \right) = \frac{3,27 \cdot i_{\text{corr}} \cdot E_q}{d} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

$i_{\text{corr}}$  = densidade de corrente de corrosão ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ );

$E_q$  = equivalente-grama das espécies metálicas em corrosão (g);

$d$  = densidade do metal ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

Na Tabela 3.9 é possível observar os valores de taxa de corrosão utilizados como critério para avaliação da velocidade de corrosão.

**Tabela 3.9 – Critério de avaliação da velocidade de corrosão.**

Grau de corrosão	Taxa de corrosão	
	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$	$\mu\text{m}/\text{ano}$
Desprezível	0,1 a 0,2	1,1 a 2,2
Início de corrosão ativa	> 0,2	> 2,2
Ataque importante mas não severo	~ 1,0	~ 11,0
Ataque muito importante	> 10,0	> 110,0

Fonte: ALONSO; ANDRADE (1990) apud CASCUDO (1997, p.88).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão abordados os resultados da caracterização do RBROTT, do ensaio do concreto no estado fresco e os ensaios no concreto no estado endurecido que tiveram a finalidade de avaliar as propriedades físicas e eletroquímicas quanto ao desempenho dos concretos produzidos com a incorporação do resíduo considerando substituição e adição.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO RBROTT E VERIFICAÇÃO DA POZOLANICIDADE

A composição química do resíduo foi obtida pela técnica de fluorescência de raios-X utilizando o equipamento EDX-720 da marca Shimadzu cujo resultado pode ser observado na Tabela 4.1. O RBROTT apresentou a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) como principais componentes, dados que corroboram com a literatura RANA et al., 2016; SINGH; NAGAR; AGRAWAL, 2016; ULIANA, 2014).

**Tabela 4.1 - Composição química do RBROTT**

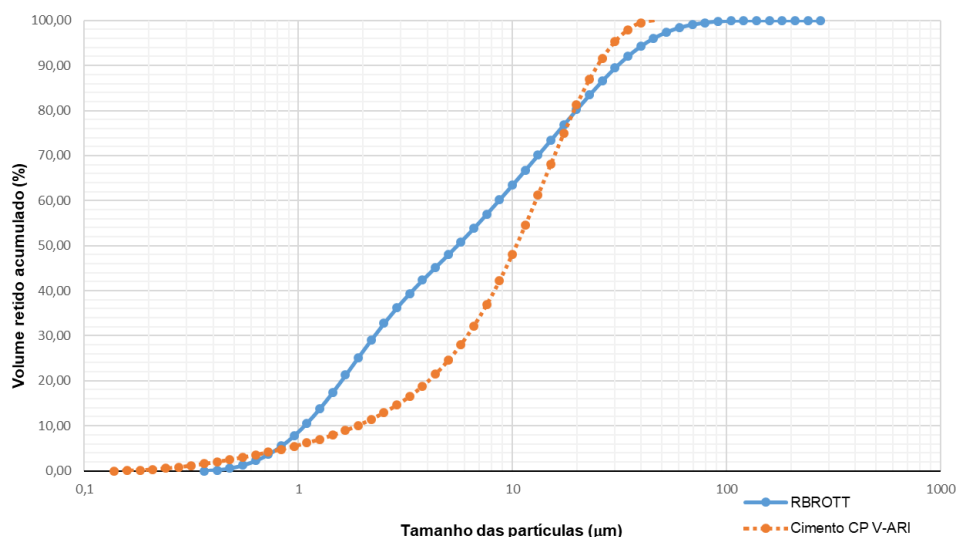
Composição Química (%)	RBROTT
$\text{SiO}_2$	67,11
$\text{Al}_2\text{O}_3$	23,42
$\text{K}_2\text{O}$	3,36
$\text{CaO}$	2,62
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	1,53
$\text{MgO}$	1,5
$\text{TiO}_2$	0,18
$\text{SO}_3$	0,05
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,05
$\text{MnO}$	0,03
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	0,01
$\text{Rb}_2\text{O}$	0,01
$\text{ZrO}_2$	0,01
$\text{CuO}$	0,01
$\text{SrO}$	0,01

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 4.1 é observado a distribuição granulométrica do RBROTT e do cimento CP V-ARI e na Tabela 4.2 tem-se os diâmetros característicos de cada material onde é possível verificar que o resíduo apresenta menor diâmetro médio em relação

ao cimento. Segundo Dal Molim (2011), adições minerais que apresentam diâmetro médio inferior ou semelhante ao do cimento podem ser responsáveis pelo efeito microfíler que promove aumento da densidade da mistura devido ao preenchimento dos vazios pelas minúsculas partículas. Promovem o refinamento da estrutura de poros e dos produtos de hidratação do cimento, pois as pequenas partículas das adições podem agir como pontos de nucleação para os produtos de hidratação uma vez que o crescimento dos cristais ocorrerá não somente a partir da superfície dos grãos de cimento, mas também nos poros ocupados pela adição e pela água, influenciando a cinética da hidratação e os tipos de produtos de hidratação formados. Causam ainda a alteração da microestrutura da zona de transição já que interferem na movimentação das partículas de água em relação aos sólidos da mistura, reduzindo ou eliminando o acúmulo de água livre que fica retida sob os agregados, reduzindo a exsudação, preenchendo os vazios, reduzindo a concentração de  $\text{Ca(OH)}_2$  devido as reações químicas pozolânicas. Efeitos que somados proporcionam aumento do desempenho mecânico e da durabilidade de concretos.

**Figura 4.1 - Distribuição granulométrica do RBROTT.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Tabela 4.2 – Diâmetros característicos do RBROTT e do Cimento CP V-ARI.**

Material	D <sub>10</sub> (μm)	D <sub>50</sub> (μm)	D <sub>90</sub> (μm)
RBROTT	1,224	6,338	35,587
Cimento CP V-ARI	2,489	13,750	32,978

Fonte: Elaborado pelo autor.

O RBROTT foi ensaiado seguindo os procedimentos da NBR 12653 (ABNT, 2015) para verificar a possibilidade de sua utilização como um material pozolânico e os resultados podem ser observados na Tabela 4.3. O resíduo atendeu a todos os requisitos exceto no teor de álcalis disponíveis ( $\text{Na}_2\text{O}_{\text{Equiv.}}$ ), fato que deve ser levado em consideração quando se utiliza agregados reativos de modo a evitar reação álcali agregado. Alguns materiais já consolidados no meio científico e no mercado também apresentam essa característica como, por exemplo, a cinza volante (ALAKA et al., 2016, FEDUMENTI, 2013, POSI et al., 2016, ZHAO et al., 2016) e a cinza de casca de arroz (KANNAN; GENESAN, 2014, JAMIL et al., 2016, SHAIKH; SUPIT, 2014).

O resultado do ensaio de índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (NBR 5752, ABNT, 2014) mostrou que a utilização do RBROTT não afetou a resistência dos corpos de prova produzidos, sendo que apresentou 99% da resistência à compressão em relação aos corpos de prova produzidos sem a utilização do resíduo. O ensaio de atividade pozolânica com cal aos 7 dias (NBR 5751, ABNT, 2015) exibiu resistência de 7,4 MPa, ficando acima do exigido pela norma (6 MPa), comprovando que o RBROTT pode ser considerado como um material pozolânico.

**Tabela 4.3 - Propriedades químicas e físicas do RBROTT**

Propriedades		RBROTT	Limites (ABNT NBR 12653:2015)
Finura	Material retido na peneira 200 (%)	1,6	-
	Material retido na peneira 325 (%)	8,8	≤ 20
Composição química	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{Equiv.}}$	2,21	≤ 1,5
	$\text{SO}_3$ (%)	0,05	≤ 5,0
	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	92	≥ 50,0
Atividade pozolânica	Cal (MPa)	7,4	≥ 6,0
	Cimento (%)	99	≥ 90
Massa Específica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )		2,45	-
Superfície específica via Blaine ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )		6890	-
Perda ao fogo - PF (%)		0,1	≤ 6,0

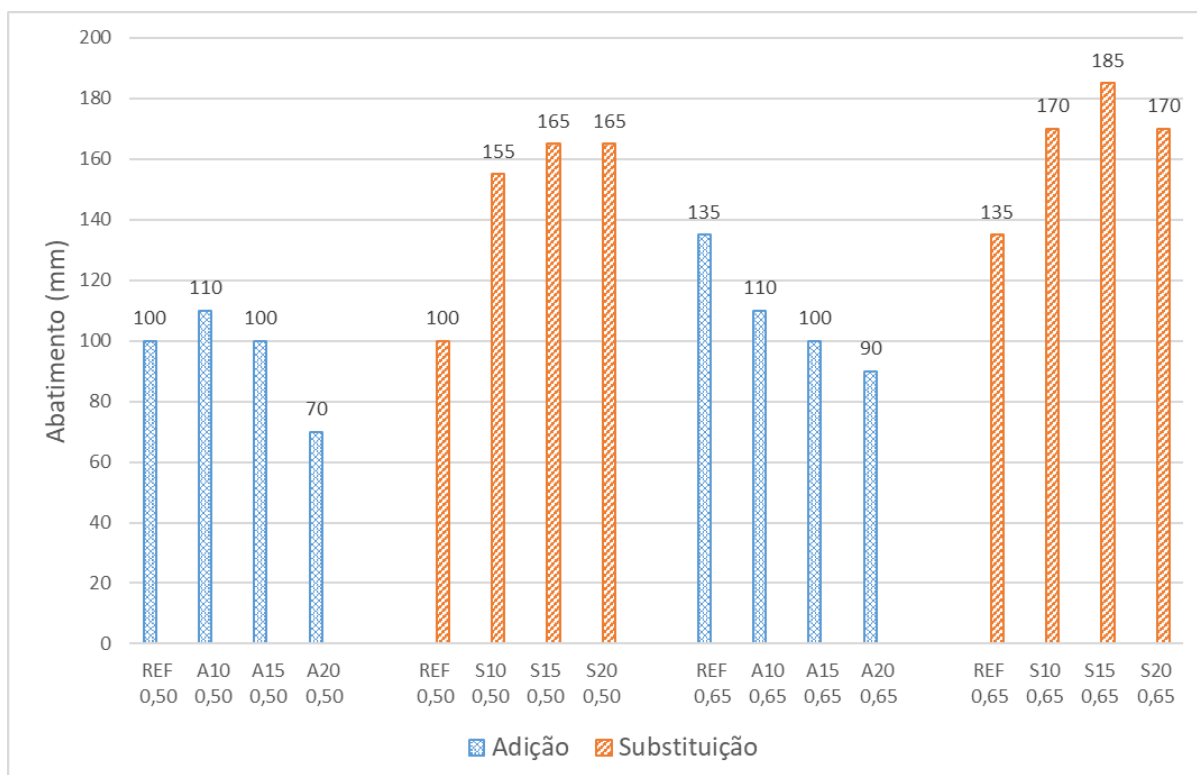
Fonte: Elaborado pelo autor.

Estes resultados corroboram com os obtidos por Medina et al. (2017a,b), Mittri (2016), Oliveira (2017), Uliana (2014) e Vazzoler (2015).

## 4.2 CONSISTÊNCIA DO CONCRETO

A trabalhabilidade do concreto foi avaliada utilizando o ensaio de consistência pelo abatimento de tronco de cone segundo a NBR NM 67 (ABNT, 1998) e o resultado pode ser observado na Figura 4.2.

**Figura 4.2 – Variação da consistência do concreto em função do tipo de incorporação do RBROTT.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tratando-se dos concretos produzidos com adição do RBROTT pode-se observar que, à medida que se aumenta o teor de adição, a consistência do concreto diminui, resultado explicado devido à quantidade de cimento ter sido mantida constante para uma mesma relação A/C, enquanto se era adicionado o resíduo que possui alta superfície específica ( $6890 \text{ cm}^2/\text{g}$ ), necessitando de maior demanda de água na mistura, resultado que também ocorre em concretos produzidos com adição de sílica ativa (BAGHERI et al., 2014) e metacaulim (DADSETAN e BAI, 2017).

Já para os concretos produzidos substituindo o cimento pelo RBROTT observou-se que houve aumento na consistência, possivelmente devido a redução do consumo de cimento da mistura que foi substituído pelo RBROTT que possui



superfície específica maior. O efeito de rolamento entre as partículas pode ter favorecido a redução da consistência, aumentando a trabalhabilidade dos concretos. Alvares et al.(1988) apud Dal Molim (2011) observaram que no caso de substituição do cimento por cinza volante o consumo de água para uma dada consistência reduziu entre 5 e 15%. A redução observada deve-se a uma melhor dispersão das partículas de cimento devido as partículas muito pequenas de cinza volante manterem essas partículas adsorvidas em sua superfície eletricamente carregadas.

Analisando as propriedades reológicas de misturas ternárias contendo cimento Portland, fíler calcário, metacaulim e cinza volante, Vance et al. (2013) observaram que a tensão de escoamento e a viscosidade das misturas binárias/ternárias, considerando a substituição de cimento, apresentam redução ou permanecem inalteradas. Efeito que pode estar associado com o formato esférico das partículas de cinza volante, que melhora o rolamento entre os fragmentos da mistura, e também devido as partículas de cinza volante serem levemente maiores do que a do cimento, proporcionado um aumento na separação física das partículas.

Oliveira (2017) avaliando as propriedades reológicas de pastas cimentícias com adição de RBROTT observou que houve aumento no módulo elástico com o aumento da quantidade de resíduo na mistura e atribui esse fato a um possível preenchimento de poros que aumentou a viscosidade da mistura, proporcionando maior resistência à deformação.

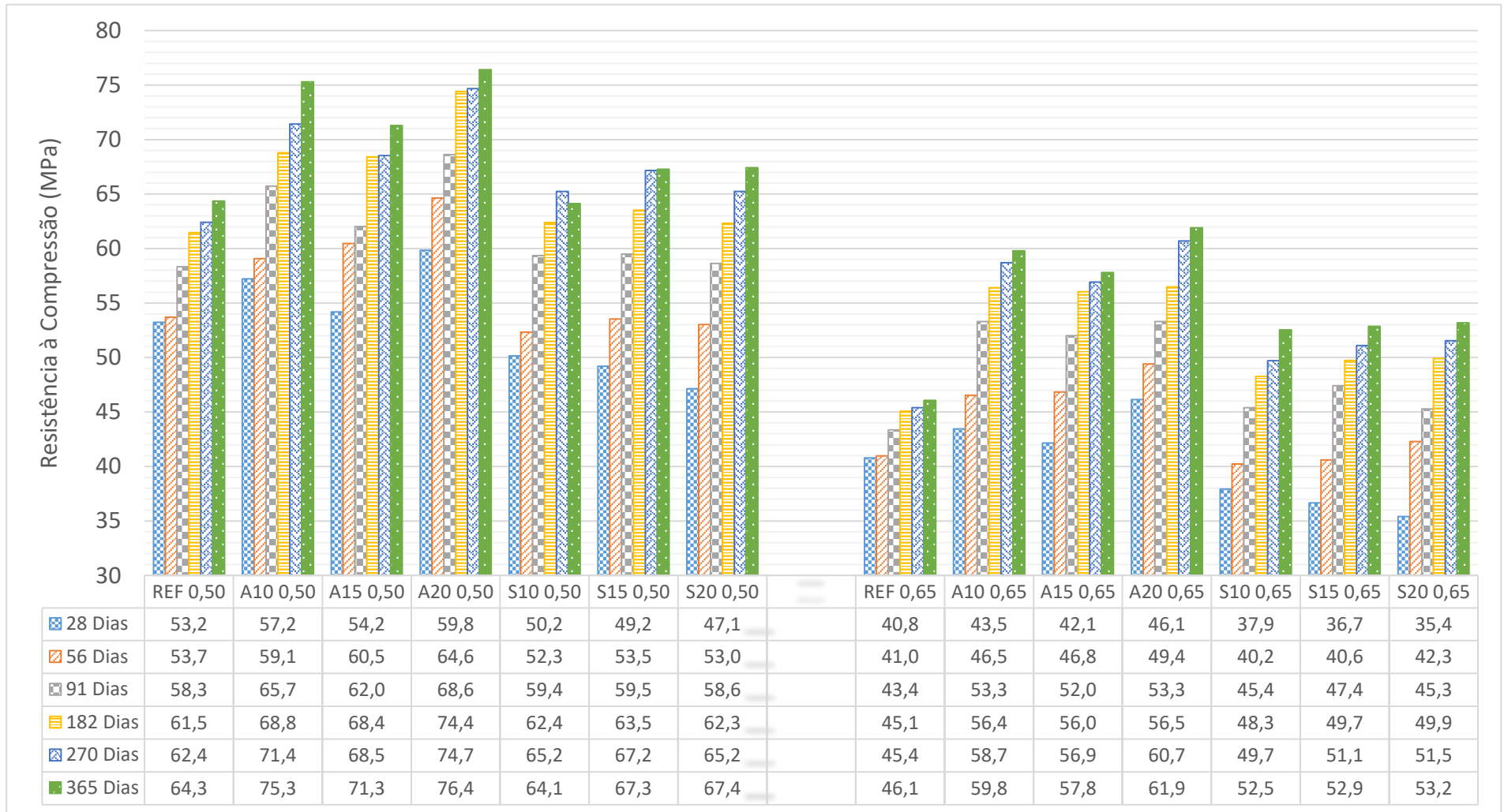
#### 4.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O ensaio de resistência à compressão axial seguiu o procedimento da NBR 5739 (ABNT, 2007) e foi realizado nas idades de 28, 56, 91, 182, 270 e 365 dias com o intuito de verificar o efeito do RBROTT ao longo do tempo. Na Figura 4.3 é possível observar o comportamento do concreto em relação ao aumento da resistência à compressão com idade.

Para os concretos produzidos com adição de RBROTT houve aumento na resistência à compressão em relação ao referência para todas as idades. Já para os concretos produzidos com substituição parcial do cimento os concretos de referência possuíam resistência maior na idade de 28 dias e em 56 dias os

concretos apresentavam resistência semelhante e a partir dos 91 dias os concretos produzidos com RBROTT mostravam resistência superior aos concretos de referência. Dembovska et al. (2017) analisando o efeito de adições pozolânicas no ganho de resistência em concretos de alto desempenho, observou que os concretos produzidos com a incorporação de sílica ativa apresentaram menor ganho de resistência nas primeiras idades, mas que em idades mais avançadas os concretos com material pozolânico exibiam maior resistência à compressão e resistência à tração.

Figura 4.3 - Resistência à compressão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para comprovar se as variáveis independentes, bem como a interação entre elas, exercem influência sobre a variável de resposta em um nível de confiabilidade de 95% os dados foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA) através do software STATISTICA 7.0 (STATSOFT, 2004).

Na Tabela 4.4 é possível observar o resultado da análise de variância (ANOVA) de resistência à compressão e as interações entre a idade, porcentagem de RBROTT e relação água/cimento. A ANOVA indica que as variáveis independentes são significativas tanto na adição como na substituição.

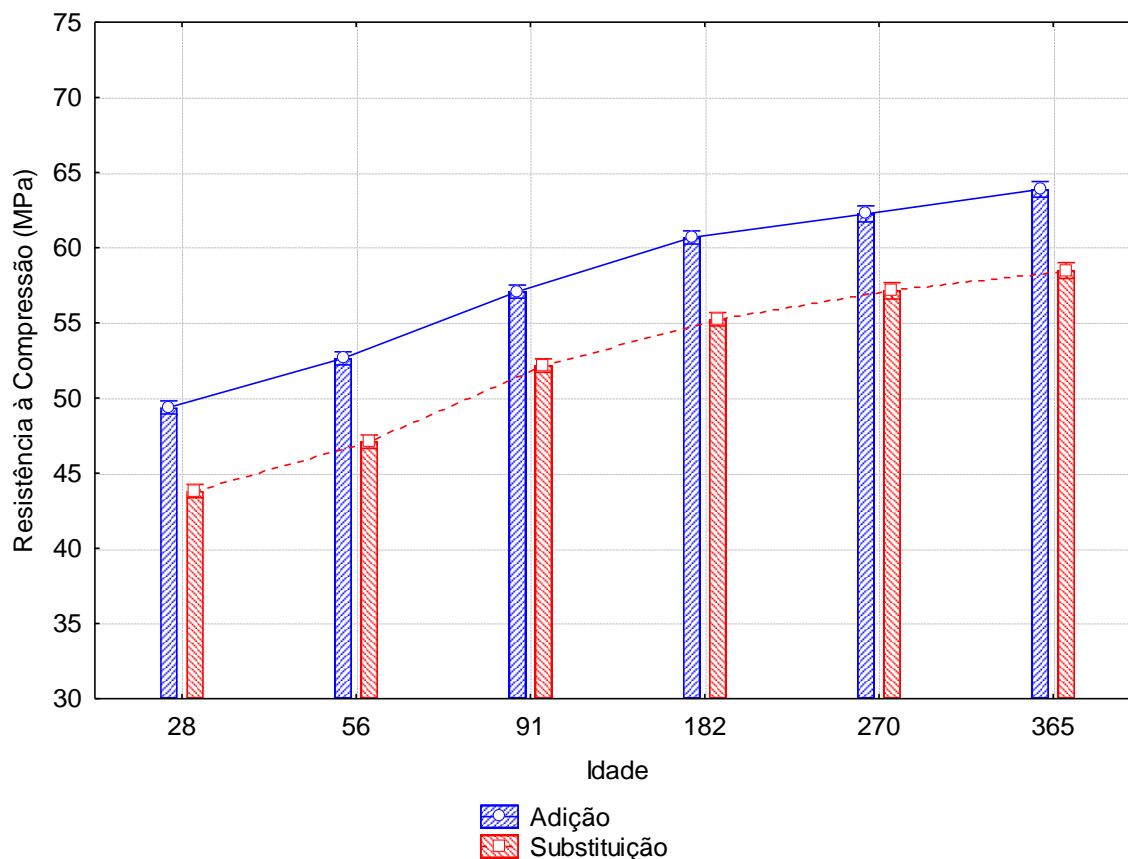
**Tabela 4.4 - Análise de variância da resistência à compressão.**

Fatores de variação		Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Variância	Valor de F	Valor de p	Significância
Adição	Idade	4558,3	5	911,7	586,5	0,000000	Sim
	A/C	8042,0	1	8042,0	5174,1	0,000000	Sim
	% RBROTT	2679,5	3	893,2	574,6	0,000000	Sim
	Idade*A/C	46,1	5	9,2	5,9	0,000059	Sim
	Idade*% RBROTT	319,8	15	21,3	13,7	0,000000	Sim
	A/C*% RBROTT	80,4	3	26,8	17,2	0,000000	Sim
	Idade*A/C*% RBROTT	66,4	15	4,4	2,8	0,000738	Sim
	Erro	194,3	125	1,6			
Fatores de variação		Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Variância	Valor de F	Valor de p	Significância
Substituição	Idade	4745,5	5	949,1	585,7	0,000000	Sim
	A/C	7889,9	1	7889,9	4868,8	0,000000	Sim
	% RBROTT	78,5	3	26,2	16,1	0,000000	Sim
	Idade*A/C	64,6	5	12,9	8,0	0,000001	Sim
	Idade*% RBROTT	349,7	15	23,3	14,4	0,000000	Sim
	A/C*% RBROTT	41,1	3	13,7	8,5	0,000037	Sim
	Idade*A/C*% RBROTT	35,1	15	2,3	1,4	0,136872	Não
	Erro	202,6	125	1,6			

Fonte: Elaborado pelo autor.

O aumento da resistência com tempo pode ser observado no gráfico do efeito isolado da variação da idade sobre a média dos resultados de resistência à compressão (Figura 4.4).

**Figura 4.4 - Gráfico do efeito isolado da variação da idade sobre a média dos resultados de resistência à compressão.**



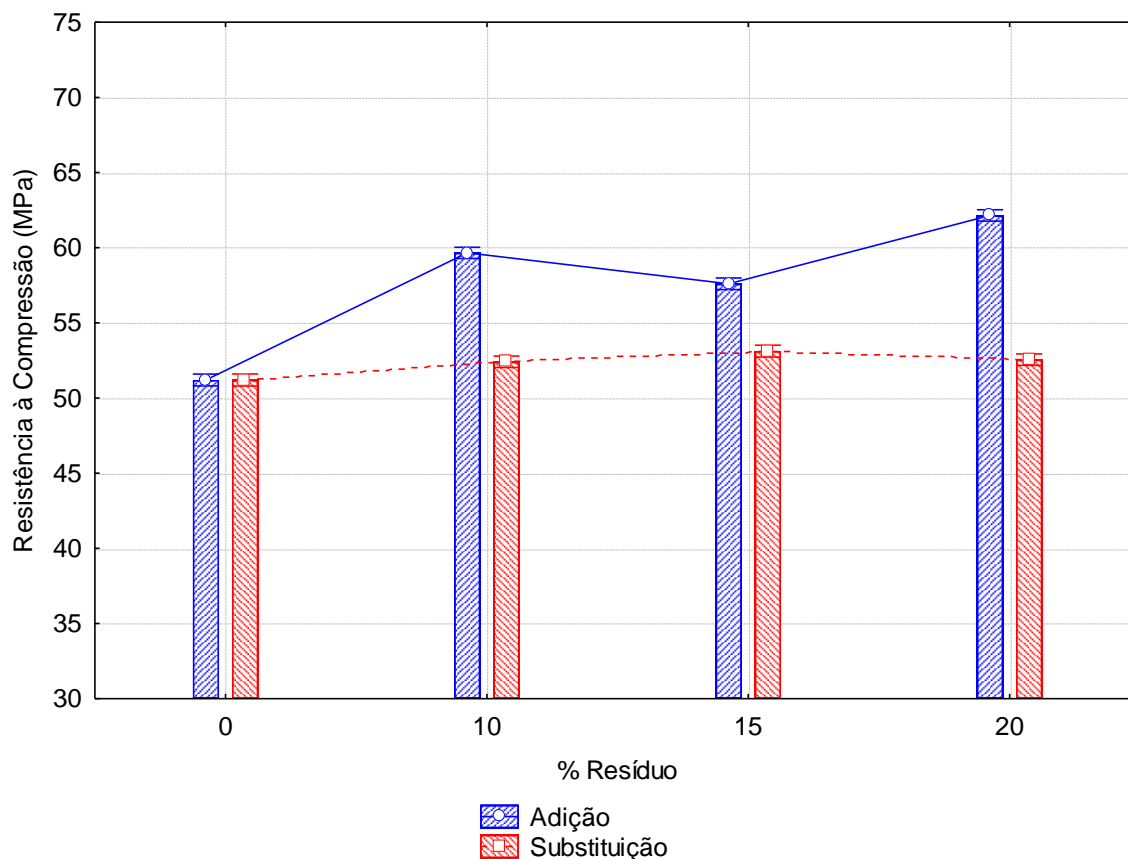
Fonte: Elaborado pelo autor.

Entre 28 e 365 dias o concreto produzido com substituição apresentou aproximadamente 33% de ganho de resistência, enquanto o concreto com adição apresentou em torno de 29% de aumento. Efeito que pode ser explicado pelo constante processo de hidratação da pasta de cimento que refina os poros presentes na microestrutura do concreto e a relação inversa em entre porosidade e resistência nos sólidos (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Os concretos que apresentavam maior magnitude da resistência à compressão foram os produzidos com a adição do RBROTT em torno de 10% maior que os concretos produzidos com substituição do cimento pelo resíduo.

Na Figura 4.5 tem-se o gráfico do efeito isolado da variação do percentual de RBROTT sobre a média dos resultados de resistência à compressão e é observado que os concretos produzidos com o resíduo apresentam resistência superior ao concreto de referência tanto na adição como na substituição.

**Figura 4.5 - Gráfico do efeito isolado da variação do percentual de substituição sobre a média dos resultados de resistência à compressão.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

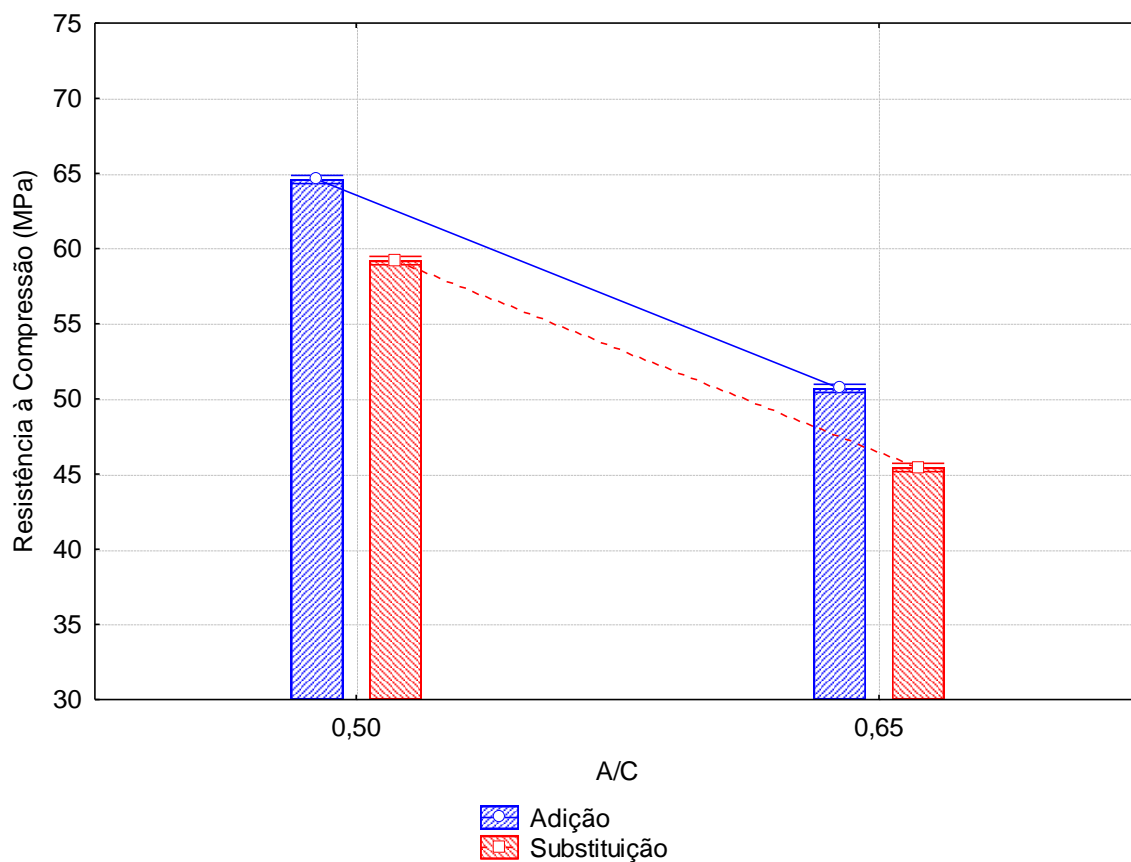
Os concretos produzidos com substituição parcial do cimento nos teores de 10, 15 e 20% apresentaram ganho respectivo de resistência à compressão de 2, 4 e 3%. Já os concretos produzidos com adição de RBROTT nos teores de 10, 15 e 20% apresentaram ganho de 17, 13 e 21% respectivamente.

Os concretos produzidos com adição apresentaram maior ganho de resistência possivelmente por terem sido produzidos com consumo de cimento fixo e a adição do RBROTT enquanto os concretos produzidos com substituição tinham o consumo de cimento reduzido já que parte do cimento foi trocado pelo RBROTT impactando diretamente na formação de produtos de hidratação do cimento.

Substituindo o agregado miúdo por RBRO, Singh et al. (2016) observaram que para teores de até 30%, a incorporação do resíduo é benéfico em relação ao aumento da resistência à compressão, pois proporciona uma matriz mais densa com melhor preenchimento dos vazios devido ao efeito microfíler.

O gráfico do efeito isolado da variação da relação água/cimento sobre a média dos resultados de resistência à compressão podem ser observado na Figura 4.6. O comportamento apresentado pelo concreto segue a Lei de Abrams (1925) onde o aumento da relação água/cimento diminui a resistência à compressão do concreto. Comportamento também verificado por Mittri (2016) que produziu concretos utilizando RBROTT com diferentes relações A/C.

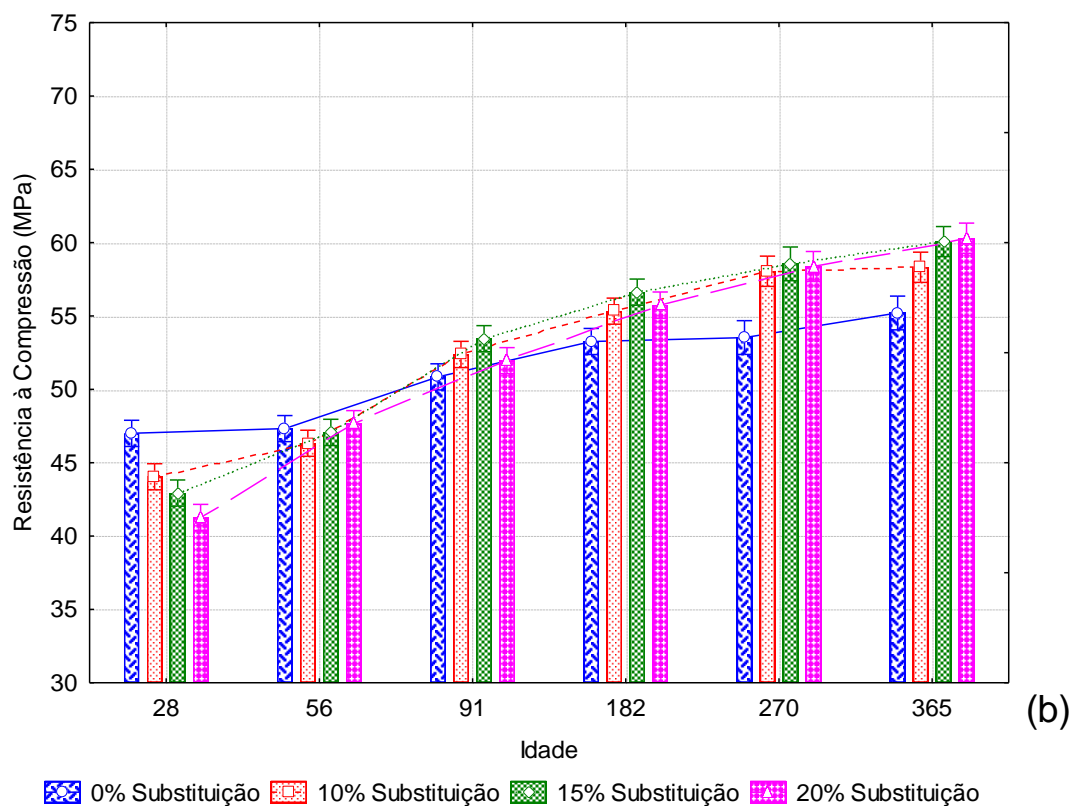
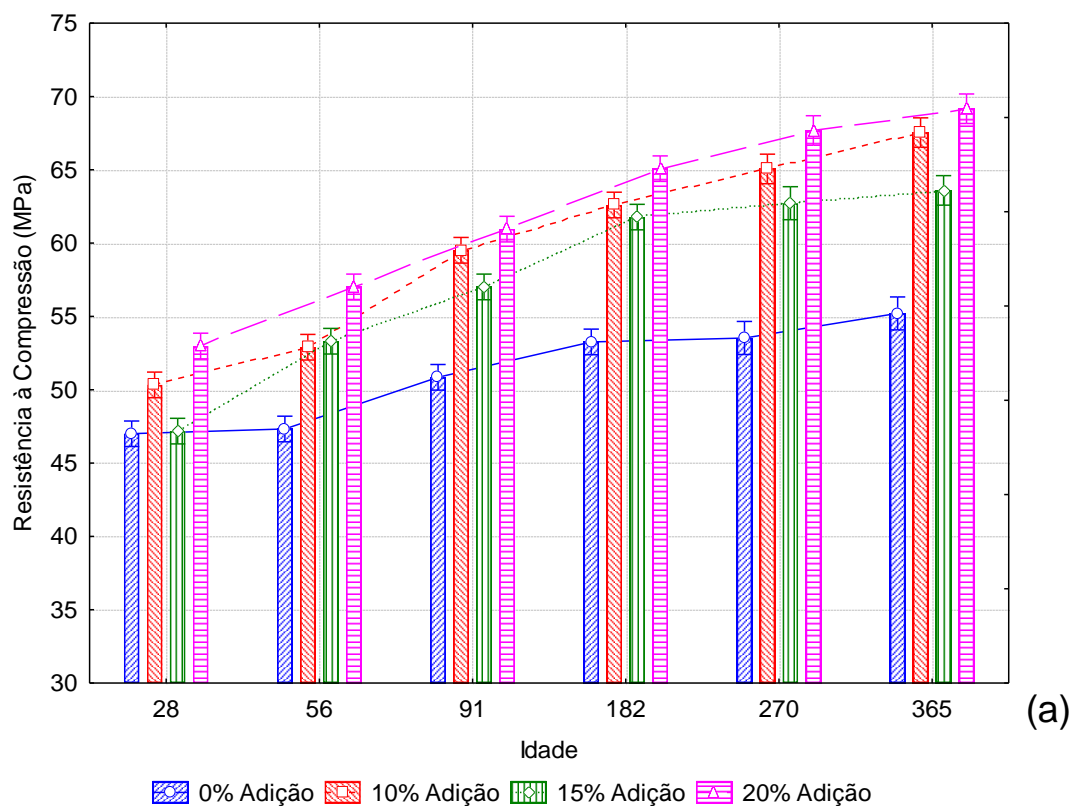
**Figura 4.6 - Gráfico do efeito isolado da variação da relação água/cimento sobre a média dos resultados de resistência à compressão.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 4.7 tem-se os gráficos da interação entre a idade e o percentual de RBROTT como adição e substituição sobre a resistência à compressão.

**Figura 4.7 - Gráfico do efeito da interação entre a idade e o percentual de RBROTT sobre a resistência à compressão. (a) adição (b) substituição.**



Fonte: Elaborado pelo autor.



Tratando das adições é possível observar que em todas as idades o concreto de referência apresentou resistência inferior aos demais, já para os concretos com substituição nas idades de 28 e 56 dias o desempenho do referência foi melhor. Entretanto, para as idades mais avançadas 91,182, 270 e 365 os concretos produzidos com o resíduo apresentam ganho de resistência maior do que o referência. Isso se deve, provavelmente, ao efeito associado à reação pozolânica que ocorre de forma mais lenta e proporciona refinamento dos poros e formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), além de outros produtos de hidratação por conta do hidróxido de cálcio, como por exemplo o aluminato de cálcio hidratado (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

O aumento percentual do ganho de resistência em relação aos 28 dias pode ser observado na Tabela 4.5. Tanto o concreto de referência como os concretos com adição e substituição apresentaram aumento de resistência à compressão com tempo, efeito associado a cura dos corpos de prova em ambiente controlado, mantidos em temperatura e saturação constante (NEVILLE, 1997).

**Tabela 4.5 – Aumento percentual do ganho de resistência à compressão em relação a idade de 28 dias.**

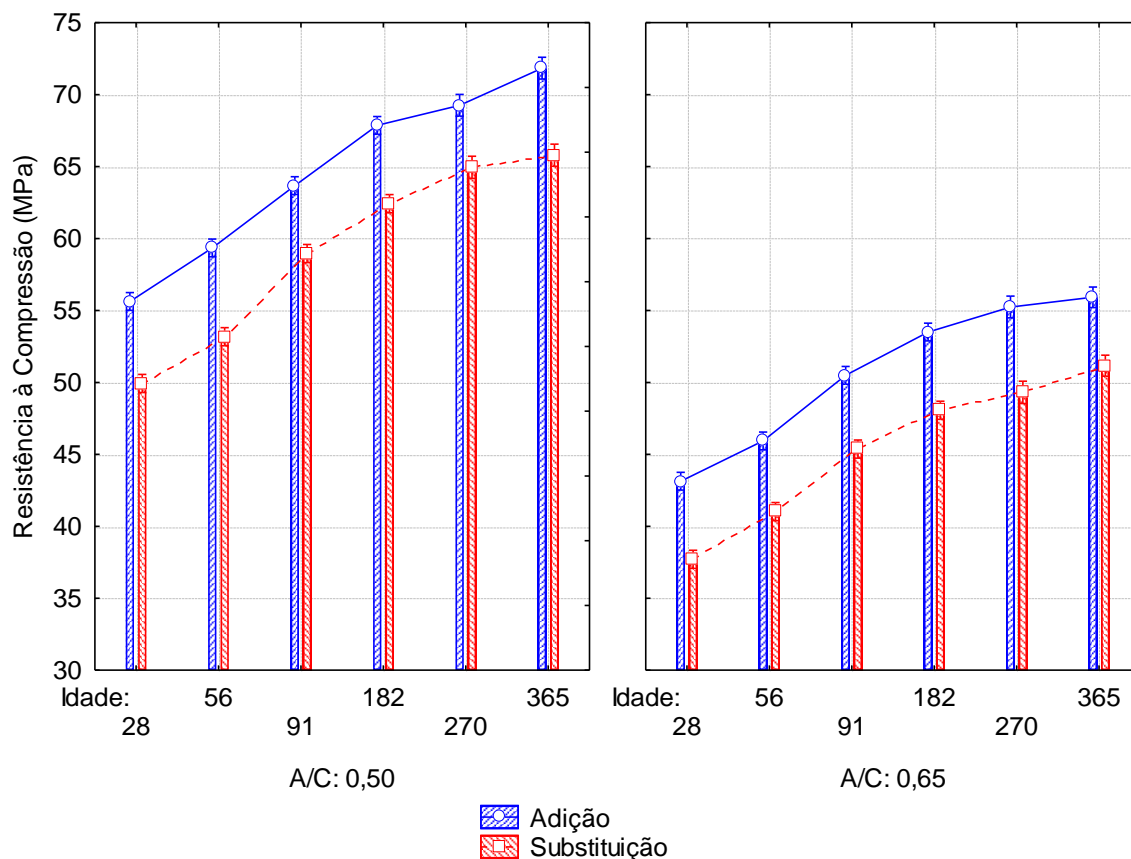
Idade	Referência	Adição			Substituição		
		10%	15%	20%	10%	15%	20%
28	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
56	1%	5%	13%	8%	5%	10%	15%
91	8%	18%	21%	15%	19%	25%	26%
182	13%	24%	31%	23%	26%	32%	35%
270	14%	29%	33%	28%	32%	36%	41%
365	17%	34%	35%	31%	32%	40%	46%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar que os concretos que apresentaram maior ganho percentual de resistência à compressão, no caso da adição, foram os produzidos com 15% de RBROTT, com 35% de aumento, conquanto, os concretos com 10% e 20% de adição apresentaram maior resistência à compressão. Tratando da substituição os concretos com 20% de RBROTT obtiveram ganho de 46% em relação aos 28 dias de idade. Os concretos produzidos com substituição apresentaram melhor desempenho em relação ao aumento da resistência com o tempo. Vale ressaltar que tais resultados estão possivelmente associados a influência da pozolanidade do RBROTT e que as reações ocorrem de forma lenta.

Na Figura 4.8 tem-se o gráfico da interação entre a idade e a relação água/cimento sobre a resistência à compressão, é possível observar que tanto os concretos com relação A/C 0,50 como os com relação A/C 0,65 apresentaram comportamento similar quanto ao ganho de resistência.

**Figura 4.8 - Gráfico do efeito da interação entre a idade e a relação água/cimento sobre a resistência à compressão.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 4.6 tem-se o aumento percentual de resistência à compressão em relação a idade de 28 dias para as relações água/cimento onde é possível observar que os concretos produzidos com relação A/C 0,65 apresentaram ganho percentual de resistência superior aos concretos com menor relação A/C. Possivelmente os concretos com maior relação A/C apresentam mais vazios em sua estrutura interna proporcionando mais espaço para que a reação pozolânica ocorra e aja um melhor preenchimento destes vazios. Estes resultados corroboram com os obtidos por Mitri (2016) que também observou maior ganho de resistência à compressão com tempo em concretos com a incorporação de RBROTT.

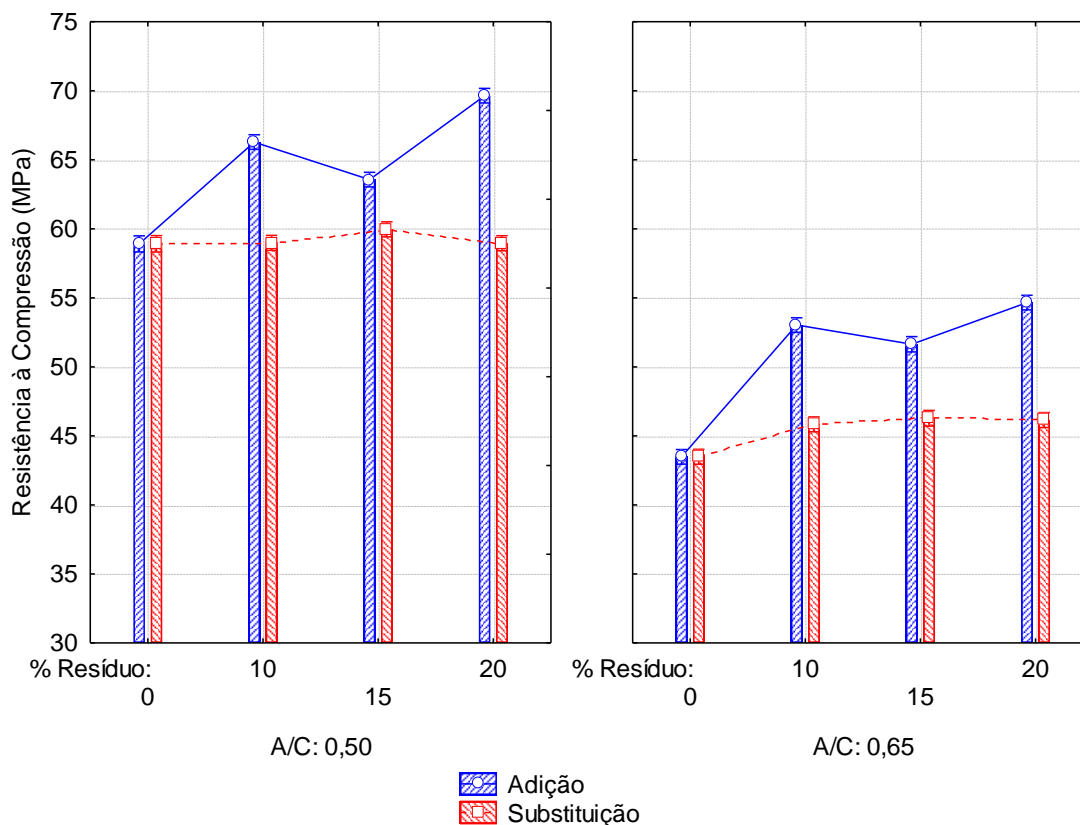
**Tabela 4.6 – Aumento percentual do ganho de resistência à compressão em relação a idade de 28 dias para as diferentes relações água/cimento.**

Idade	Adição		Substituição	
	A/C 0,50	A/C 0,65	A/C 0,50	A/C 0,65
28	0%	0%	0%	0%
56	7%	7%	7%	9%
91	14%	17%	18%	20%
182	22%	24%	25%	27%
270	25%	28%	30%	31%
365	29%	30%	32%	36%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observou-se que os concretos com relação A/C 0,50 apresentaram maior resistência à compressão do que os concretos com relação A/C 0,65 considerando seu efeito isolado exposto na Figura 4.6. Avaliando a interação entre a relação água/cimento e a porcentagem de incorporação de RBROTT sobre a resistência à compressão pode se concluir que ao se adicionar RBROTT é possível obter concretos mais resistentes, por outro lado, considerando a substituição é possível manter a mesma resistência com menor consumo de cimento nos concretos.

**Figura 4.9 - Gráfico do efeito da interação entre a porcentagem de RBROTT e a relação água/cimento sobre a resistência à compressão.**

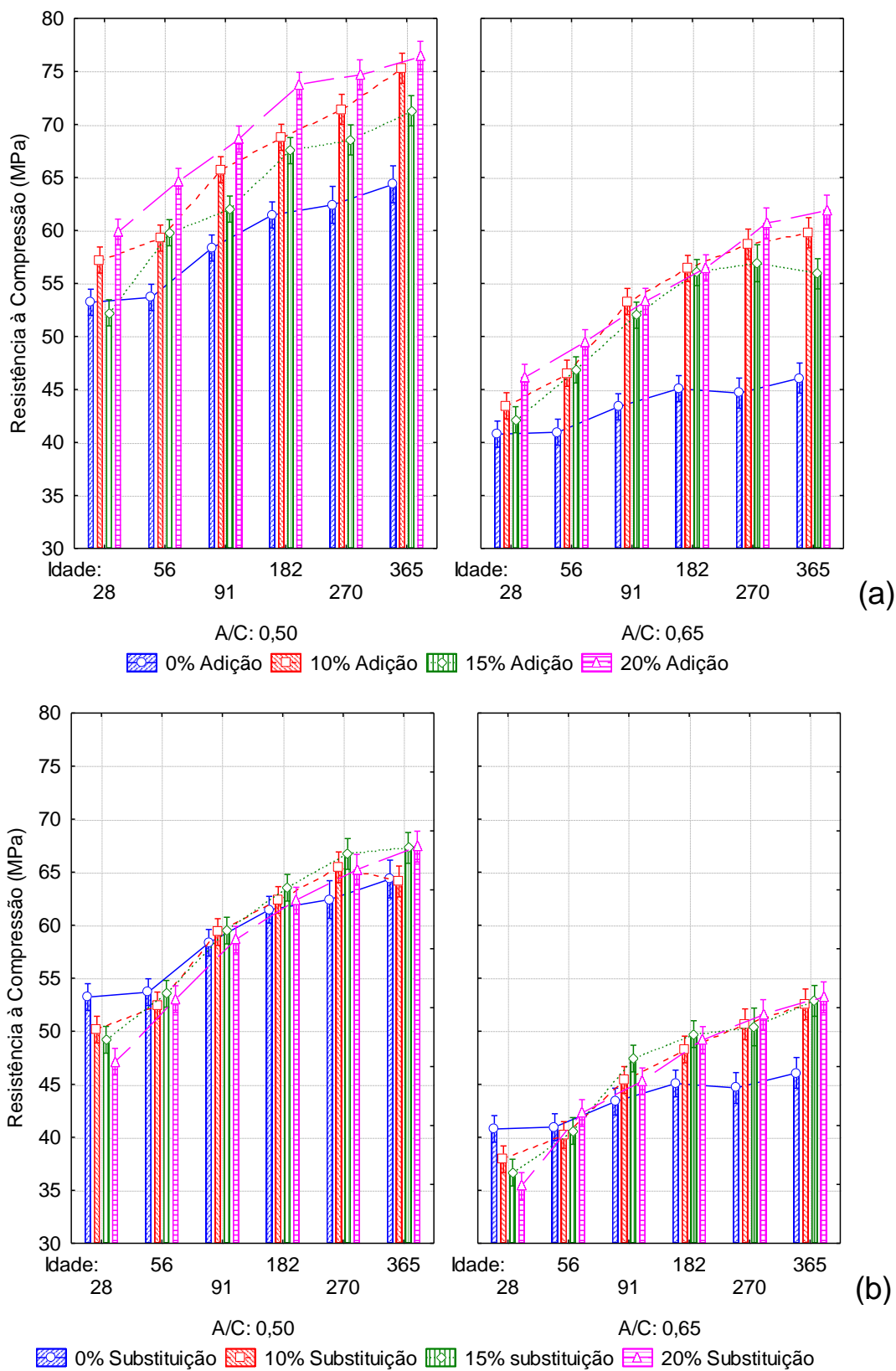


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 4.10 tem-se o gráfico da interação tripla entre a idade, relação A/C e o percentual de RBROTT sobre a resistência à compressão. Considerando-se a adição de RBROTT, pode-se observar que a interação entre as variáveis independentes é significativa e que em todas as idades, para as duas relações A/C e os diferentes percentuais de adição apresentaram resistência à compressão similar ou superior ao concreto de referência.

A interação tripla não foi significativa para os concretos produzidos com a substituição do cimento pelo RBROTT.

**Figura 4.10 – Gráfico da interação tripla entre a idade, relação água/cimento e percentual de RBROTT sobre a resistência à compressão. (a) adição (b) substituição.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

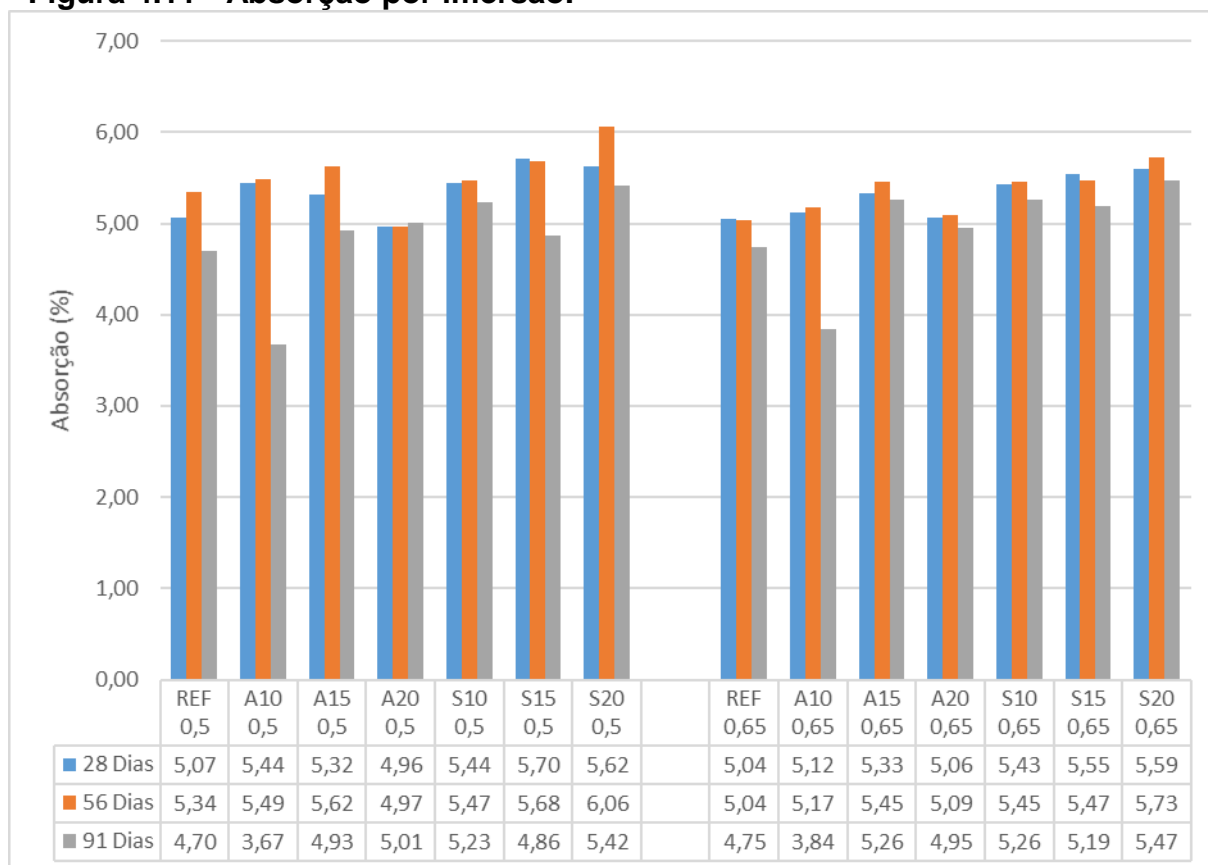
### 4.3.1 Absorção de água por imersão e capilaridade

Com o intuito de verificar a qualidade do concreto e a durabilidade potencial quando exposto a ambientes agressivos os concretos foram submetidos aos ensaios de absorção por imersão segundo a NBR 9778 (ABNT, 2009) e absorção por capilaridade segundo a NBR 9779 (ABNT 2012) em diferentes idades e em duas relações água/cimento.

#### 4.3.1.1 Absorção por imersão

O ensaio de Absorção por imersão foi realizado nas idades de 28, 56 e 91 dias para verificar a influência da utilização do RBROTT no concreto ao longo do tempo. Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 4.11.

**Figura 4.11 - Absorção por imersão.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 4.7 tem-se os resultados da ANOVA realizada e foi verificado que apenas as variáveis idade, percentual de adição e sua interação foram significativos em relação aos concretos produzidos com adição de RBROTT, para os concretos

produzidos com substituição parcial do cimento apenas as variáveis idade e percentual de resíduo foram significativas.

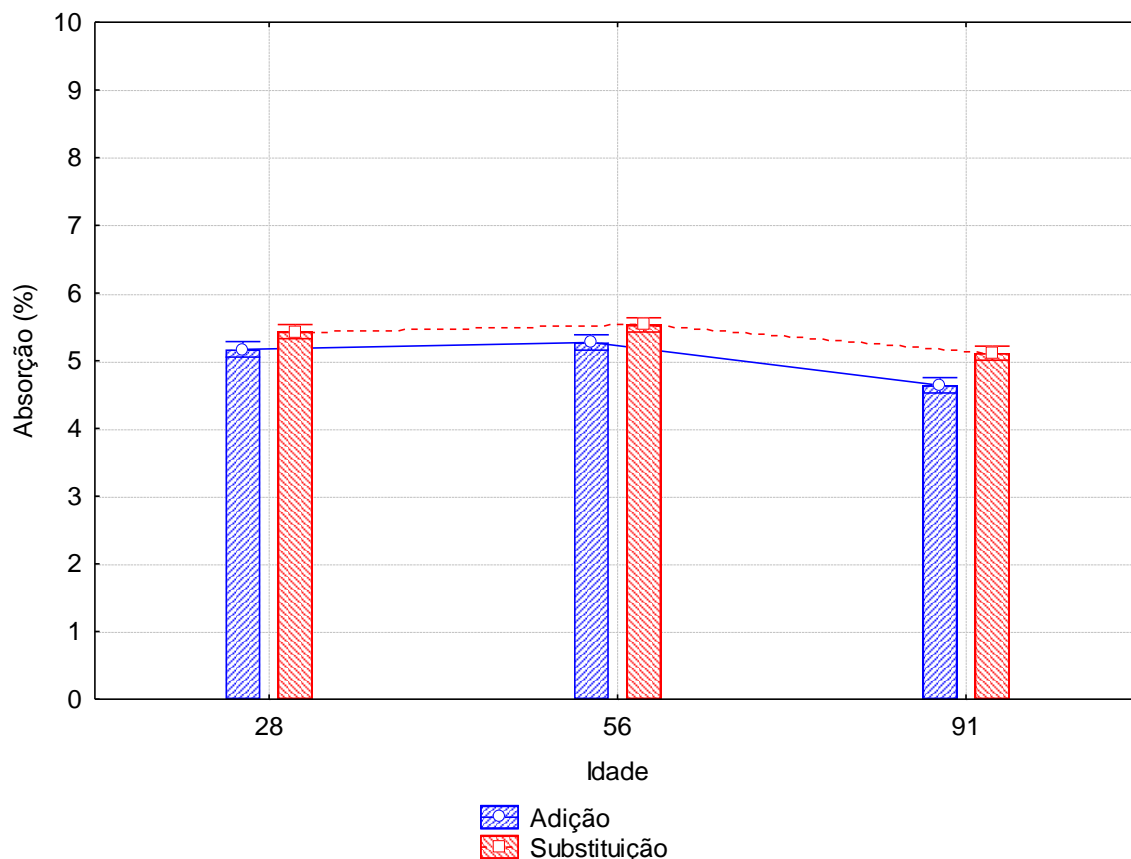
**Tabela 4.7- Análise de variância da absorção por imersão.**

Fatores de variação		Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Variância	Valor de F	Valor de p	Significância
Adição	Idade	3,695	2	1,847	37,79	0,000000	Sim
	Relação A/C	0,016	1	0,016	0,32	0,574308	Não
	% RBROTT	1,719	3	0,573	11,72	0,000063	Sim
	Idade*Relação A/C	0,177	2	0,088	1,81	0,185897	Não
	Idade*% RBROTT	3,583	6	0,597	12,22	0,000003	Sim
	Relação A/C*% RBROTT	0,107	3	0,036	0,73	0,545179	Não
	Idade*Relação A/C*% RBROTT	0,205	6	0,034	0,70	0,652656	Não
	Erro	1,173	24	0,049			
Fatores de variação		Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Variância	Valor de F	Valor de p	Significância
Substituição	Idade	1,528	2	0,764	18,61	0,000013	Sim
	Relação A/C	0,034	1	0,034	0,83	0,370594	Não
	% RBROTT	2,685	3	0,895	21,80	0,000000	Sim
	Idade*Relação A/C	0,218	2	0,109	2,65	0,090998	Não
	Idade*% RBROTT	0,338	6	0,056	1,37	0,266166	Não
	Relação A/C*% RBROTT	0,026	3	0,009	0,21	0,887943	Não
	Idade*Relação A/C*% RBROTT	0,111	6	0,018	0,45	0,837566	Não
	Erro	0,985	24	0,041			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando o gráfico do efeito isolado da variação da idade sobre a média dos resultados de absorção por imersão na Figura 4.12 é possível verificar que houve um pequeno decréscimo na absorção com o avanço da idade de 0,5% para adição e 0,3% para substituição, resultado esperado já que com o aumento do tempo de cura os vazios presentes no interior do concreto vão sendo preenchidos por novos compostos hidratados do cimento, proporcionando um refinamento da estrutura interna. Dados que podem ainda ser respaldados pelo aumento da resistência à compressão até os 91 dias de idade evidenciados na Tabela 4.5.

**Figura 4.12 - Gráfico do efeito isolado da variação da idade sobre a média dos resultados de absorção por imersão.**

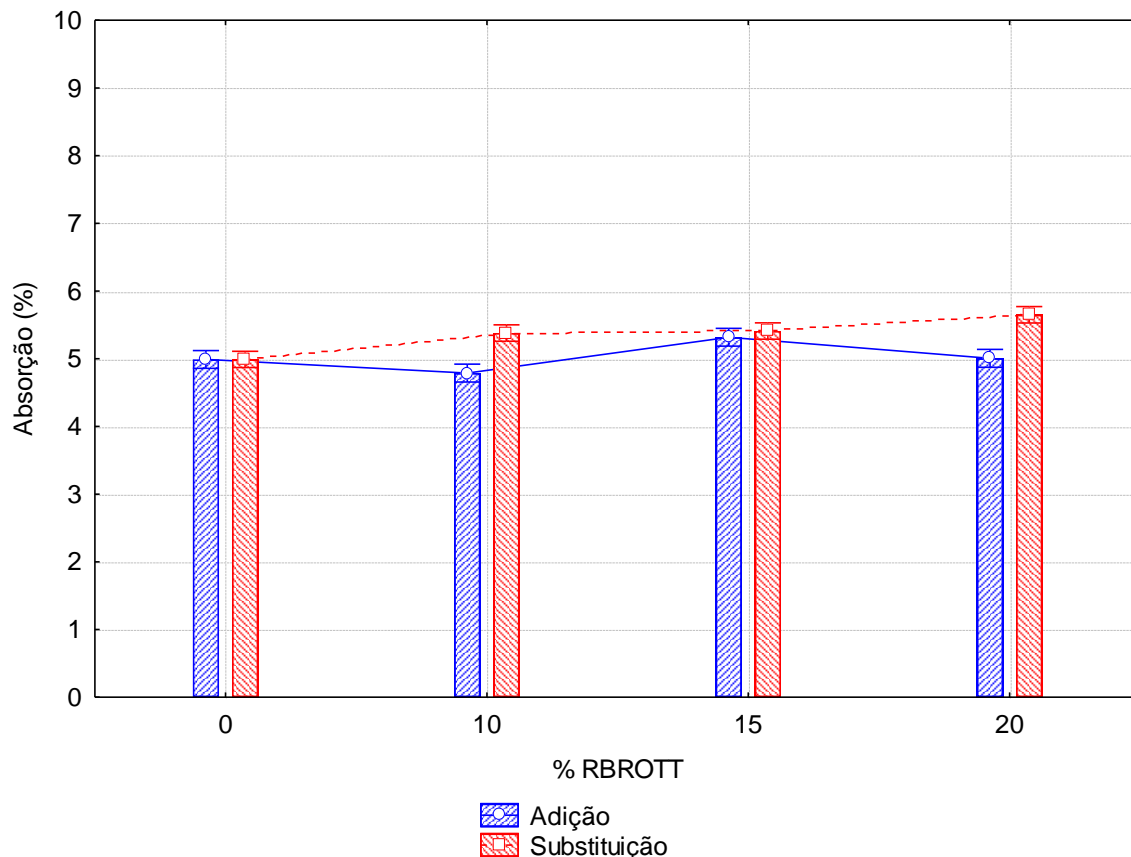


Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando o gráfico do efeito isolado da variação da porcentagem de RBROTT em relação à absorção por imersão presente na Figura 4.13 constatou-se que a substituição do cimento pelo resíduo em todos os teores provocou um acréscimo na absorção na ordem de 0,5% aproximadamente, enquanto o concreto produzido com adição de 10% reduz em 0,2% a absorção e os teores de 15 e 20% proporcionaram aumento de 0,3 e 0,1% respectivamente.



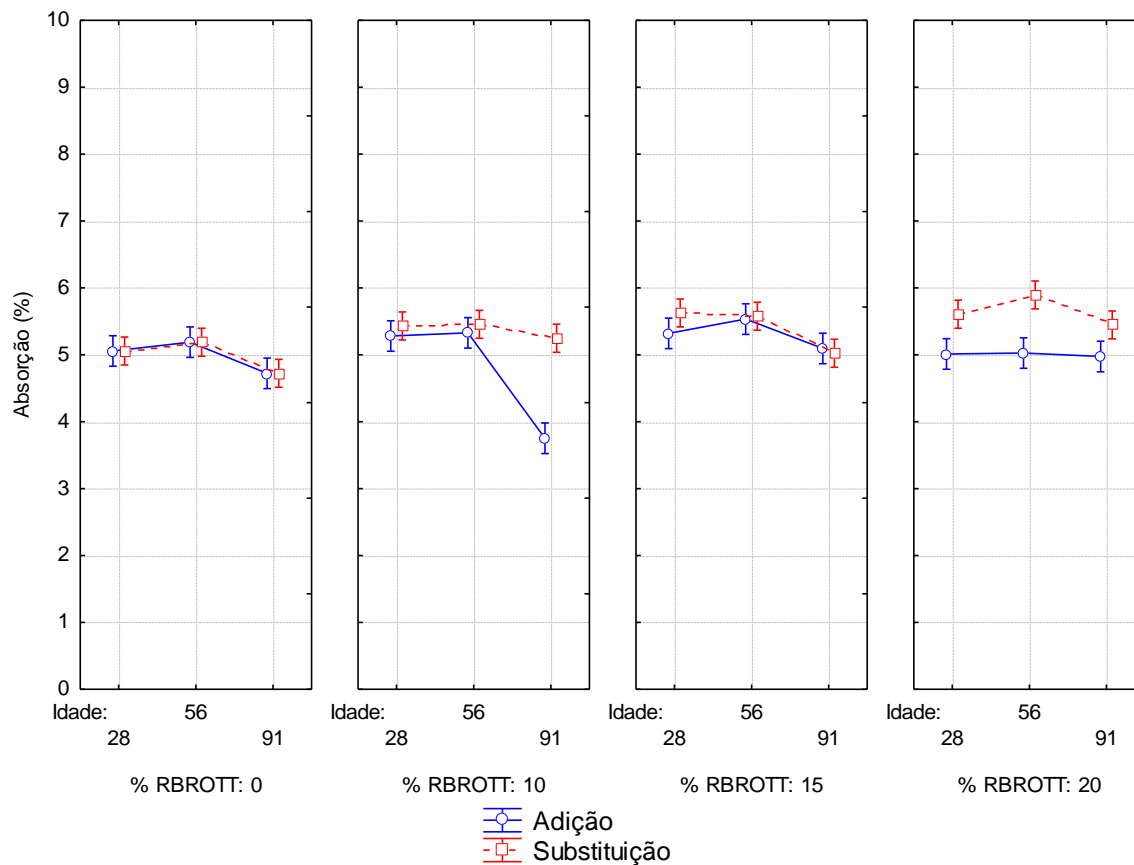
**Figura 4.13 - Gráfico do efeito isolado da variação do percentual de RBROTT sobre a média dos resultados de absorção por imersão.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 4.14 é observado o gráfico da interação entre a idade e o percentual de RBROTT. A ANOVA indicou que para substituição essa interação não foi significativa, ou seja não há diferença entre o concreto referência e o produzido com o resíduo. Para o concreto com adição houve significância no resultado, podendo-se observar que o concreto com adição de 10% na idade de 91 dias apresentou redução na absorção na ordem de 1%. Observava-se ainda uma tendência de diminuição da absorção para os concretos com adição. Efeito que possivelmente pode estar associado a formação de C-S-H, devido a reação pozolânica, proporcionado um refinamento dos espaços na zona de transição (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

**Figura 4.14 – Gráfico do efeito da interação entre a idade e o percentual de RBROTT sobre a média dos resultados de absorção por imersão.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

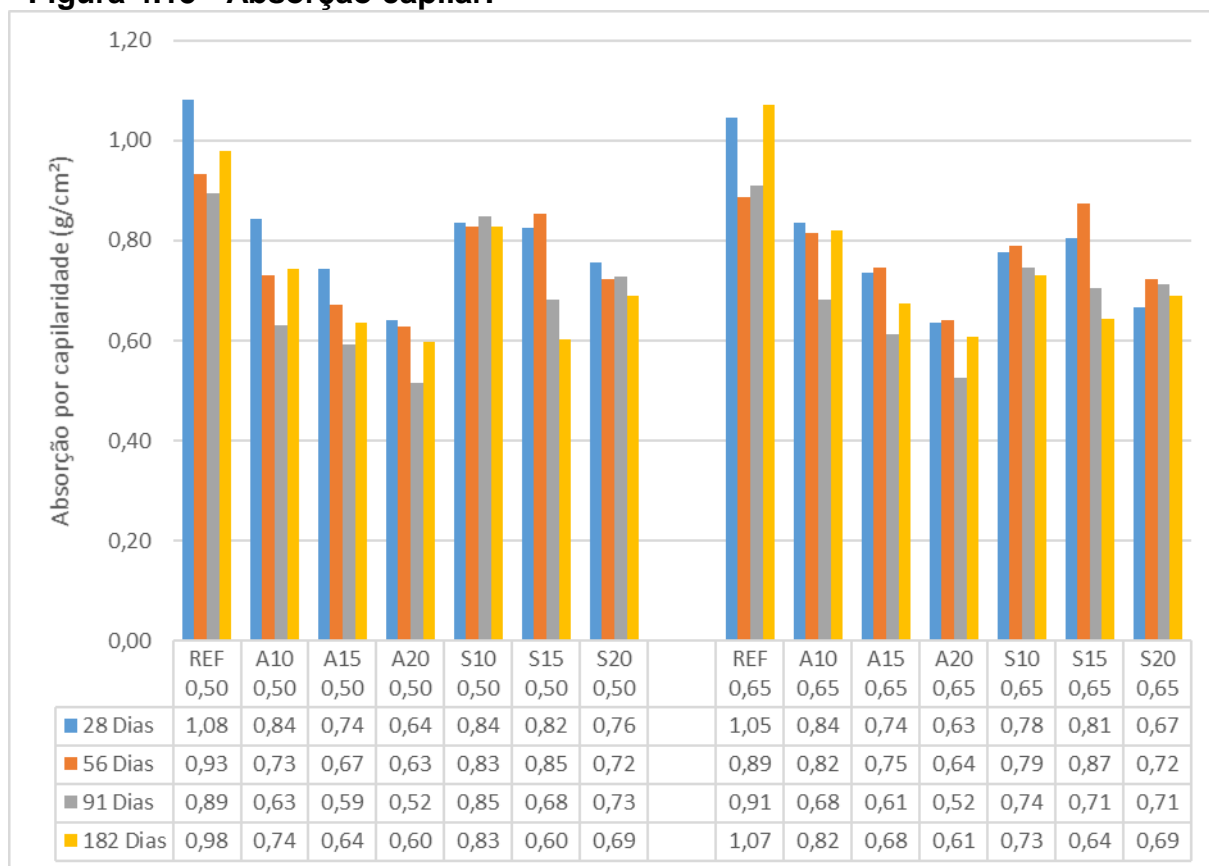
Nagrockienè et al. (2017) analisando propriedade de concretos modificados com adições minerais observaram que para adições superiores a 10% houve redução na absorção de água. Sadek; Alttar e Ali (2016), utilizando pó de mármore, pó de granito e sílica ativa em misturas binárias e ternárias na produção de concreto auto-adensável, observaram até 74% de redução da absorção de água nos concretos contendo adições.

#### 4.3.1.2 Absorção por capilaridade

Para verificar a influência do RBROTT ao longo do tempo o ensaio de absorção por capilaridade foi realizado nas idades de 28, 56, 91 e 182 dias. Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 4.15.

De forma geral os concretos produzidos com RBROTT apresentaram absorção capilar menor do que o concreto de referência indicando que a utilização do resíduo é benéfica para aumentar a sua durabilidade em meio agressivo.

**Figura 4.15 - Absorção capilar.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 4.8 tem-se o resultado da análise de variância (ANOVA) para os concretos produzidos com RBROTT tanto para adição como substituição onde foi constatado a um nível de confiabilidade de 95% que as variáveis isoladas idade, relação A/C e % RBROTT foram significativas. Se tratando do concreto com adição apenas a interação entre idade e porcentagem de resíduo foi significativa enquanto para o concreto com substituição as interações idade e porcentagem de resíduo e relação água/cimento e porcentagem de RBROTT foram significativas.

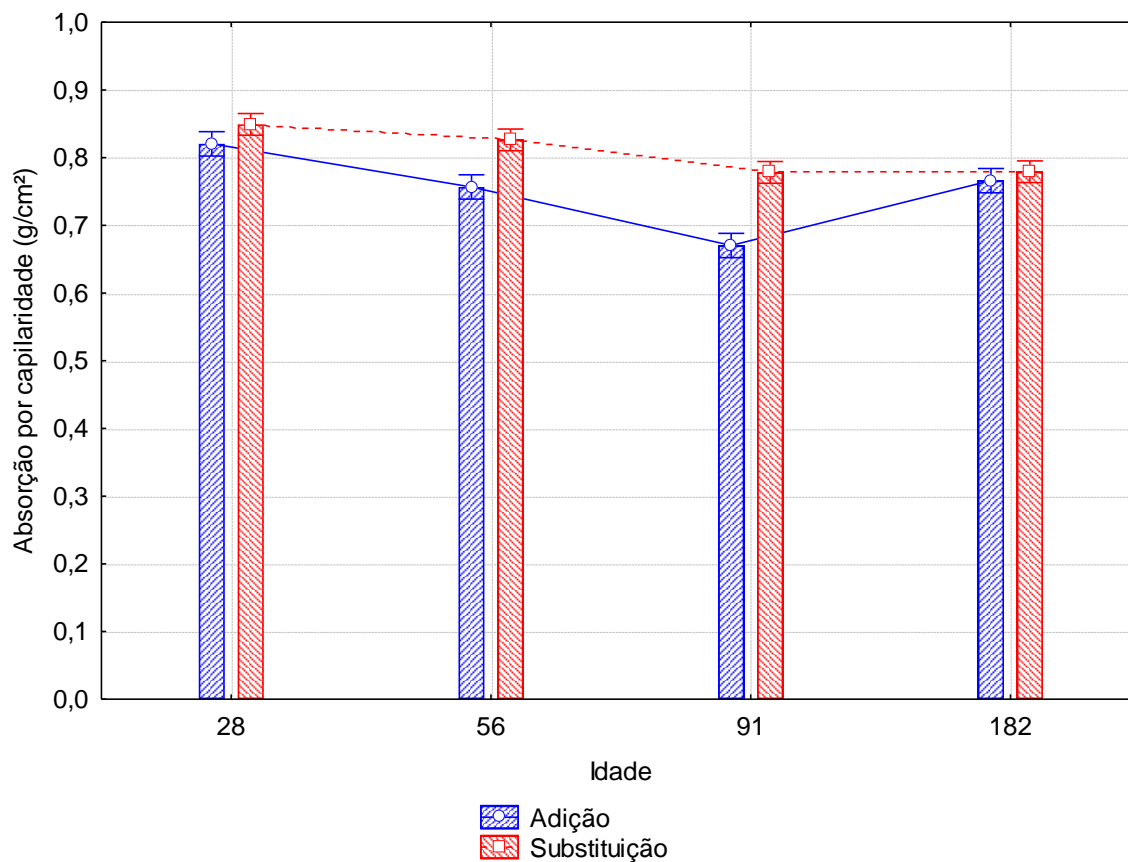
**Tabela 4.8 - Análise de variância da absorção capilar.**

Fatores de variação		Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Variância	Valor de F	Valor de p	Significância
Adição	Idade	0,27794	3	0,09265	47,61	0,000000	Sim
	Relação A/C	0,01350	1	0,01350	6,94	0,010578	Sim
	% RBROTT	1,90385	3	0,63462	326,10	0,000000	Sim
	Idade*Relação A/C	0,01473	3	0,00491	2,52	0,065583	Não
	Idade*% RBROTT	0,06802	9	0,00756	3,88	0,000568	Sim
	Relação A/C*% RBROTT	0,00824	3	0,00275	1,41	0,247720	Não
	Idade*Relação A/C*% RBROTT	0,01713	9	0,00190	0,98	0,466768	Não
	Erro	0,12455	64	0,00195			
Fatores de variação		Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Variância	Valor de F	Valor de p	Significância
Substituição	Idade	0,08981	3	0,02994	19,49	0,000000	Sim
	Relação A/C	0,00919	1	0,00919	5,99	0,017176	Sim
	% RBROTT	0,98676	3	0,32892	214,19	0,000000	Sim
	Idade*Relação A/C	0,01113	3	0,00371	2,42	0,074603	Não
	Idade*% RBROTT	0,25683	9	0,02854	18,58	0,000000	Sim
	Relação A/C*% RBROTT	0,03044	3	0,01015	6,61	0,000584	Sim
	Idade*Relação A/C*% RBROTT	0,02288	9	0,00254	1,66	0,118621	Não
	Erro	0,09828	64	0,00154			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 4.16 tem-se o gráfico do efeito isolado da variação da idade sobre a média dos resultados de absorção capilar, os resultados indicam que os concretos com 56, 91 e 182 dias de idade apresentaram absorção capilar inferior ao concreto na idade de 28 dias, tanto na adição como na substituição.

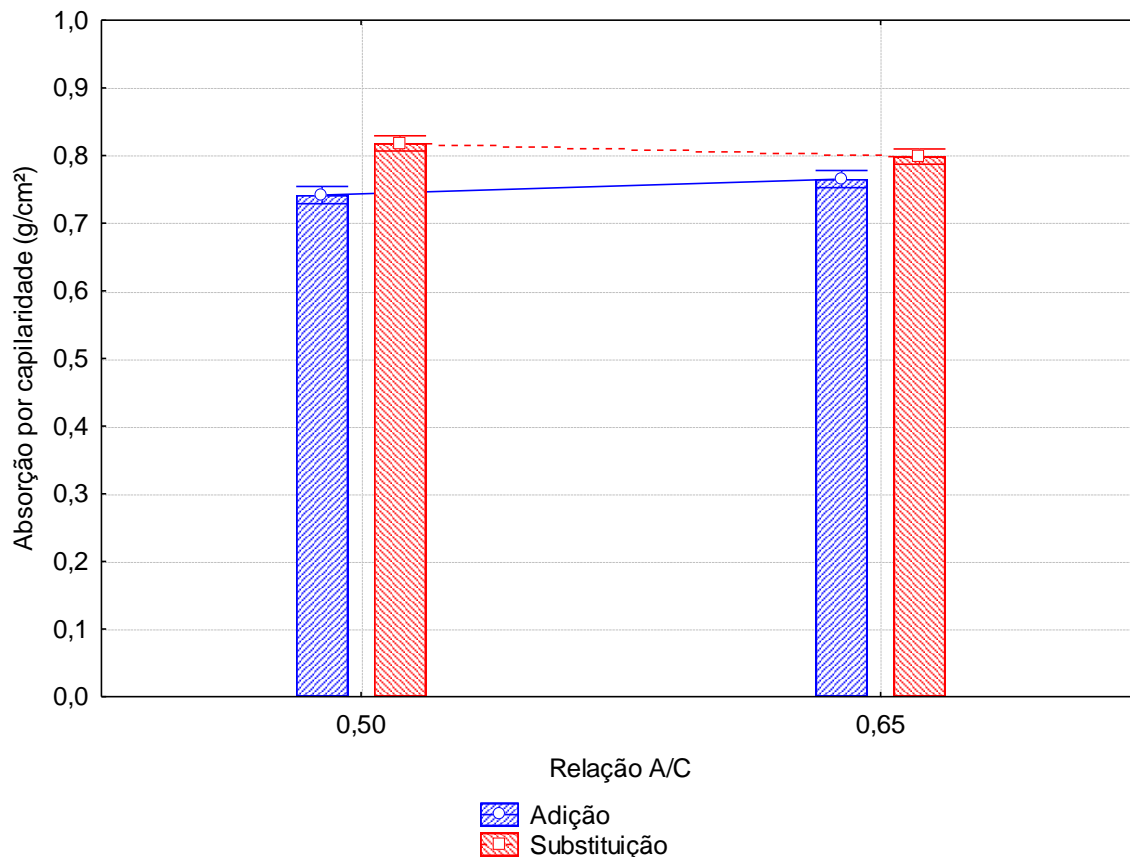
**Figura 4.16 - Gráfico do efeito isolado da variação da idade sobre a média dos resultados de absorção capilar.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando o efeito isolado da variação da relação A/C sobre a média dos resultados de absorção capilar na Figura 4.17 observou-se que os concretos produzidos com relação A/C 0,50 apresentaram absorção maior do que os concretos com relação A/C 0,65 em aproximadamente 0,02g/cm<sup>2</sup> onde o RBROTT foi utilizado como substituto do cimento e no caso da adição houve o efeito contrário o concreto com relação A/C de 0,50 apresentaram absorção menor do que os concretos com relação A/C 0,65 em aproximadamente 0,02g/cm<sup>2</sup>.

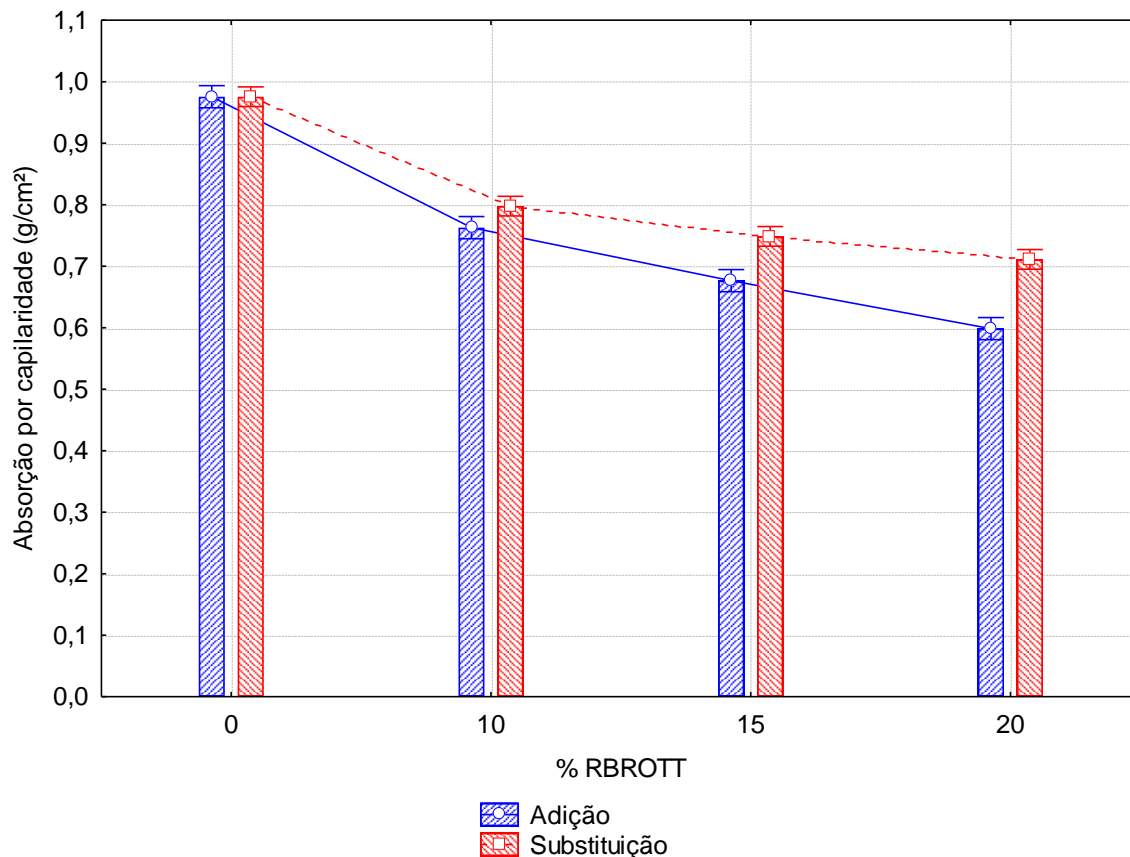
**Figura 4.17 - Gráfico do efeito isolado da variação da relação água/cimento sobre a média dos resultados de absorção capilar.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os concretos produzidos com adição e substituição de RBROTT apresentaram redução na absorção capilar para todos os teores testados como pode ser observado na Figura 4.18. A utilização do RBROTT proporcionou redução de 22, 31 e 39% na absorção capilar para os respectivos teores de 10, 15 e 20% de adição. Já para os concretos com substituição a redução da absorção capilar foi de 18, 23, e 27% referente aos teores de 10, 15 e 20%. A redução da absorção capilar pode estar associada com o preenchimento dos poros da estrutura interna do concreto devido ao efeito das reações pozolânicas. Soares (2014) utilizou o resíduo de rochas ornamentais sem tratamento térmico como adição ao concreto e observou que sua utilização provoca aumento na absorção capilar.

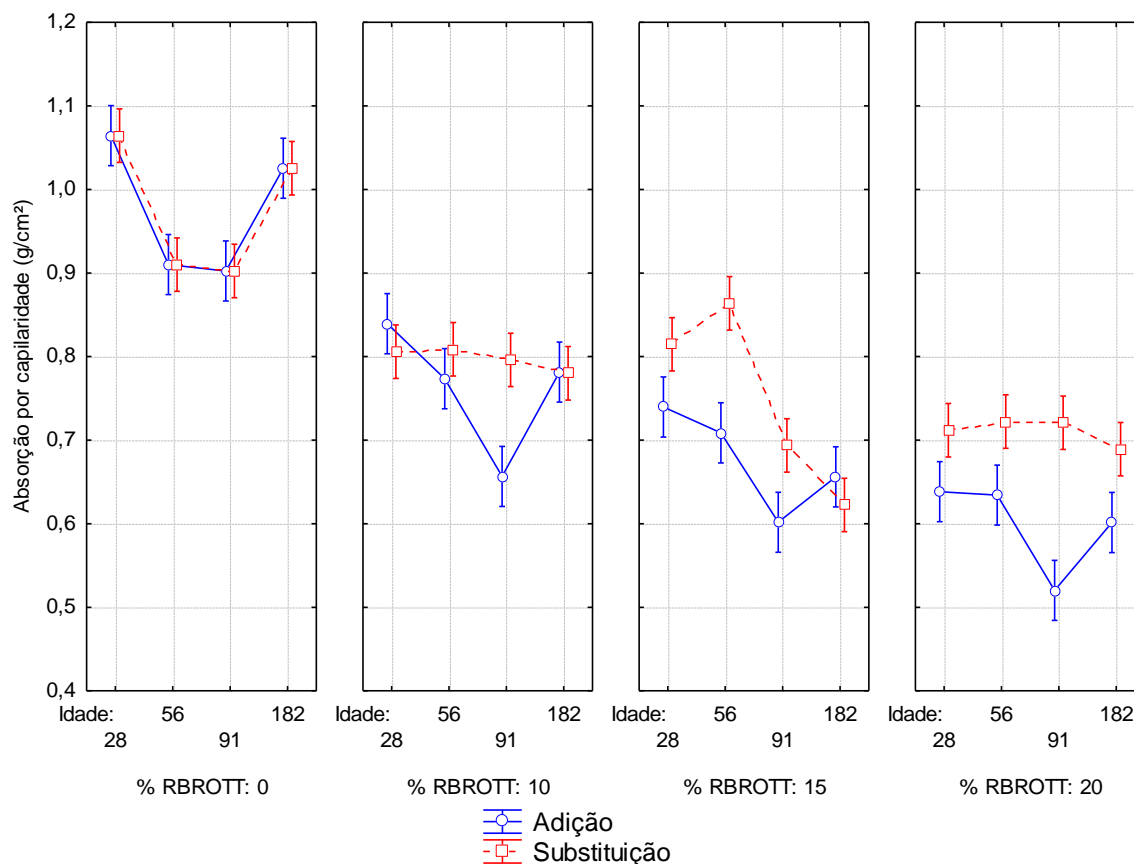
**Figura 4.18 - Gráfico do efeito isolado da variação da porcentagem de RBROTT sobre a média dos resultados de absorção capilar.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando o efeito da interação entre a idade e o percentual de RBROTT na Figura 4.19 tem-se que em todas as idades a absorção capilar dos concretos produzidos com a utilização do RBROTT foram inferiores ao concreto referência. Os concretos com adição na idade de 182 dias apresentaram aumento da absorção capilar, possivelmente o refinamento dos poros capilares provocado pela formação de C-S-H, aumentou a tensão capilar no interior do concreto provocando esse aumento na absorção.

**Figura 4.19 - Gráfico do efeito da interação entre a idade e o percentual de RBROTT sobre a absorção capilar.**

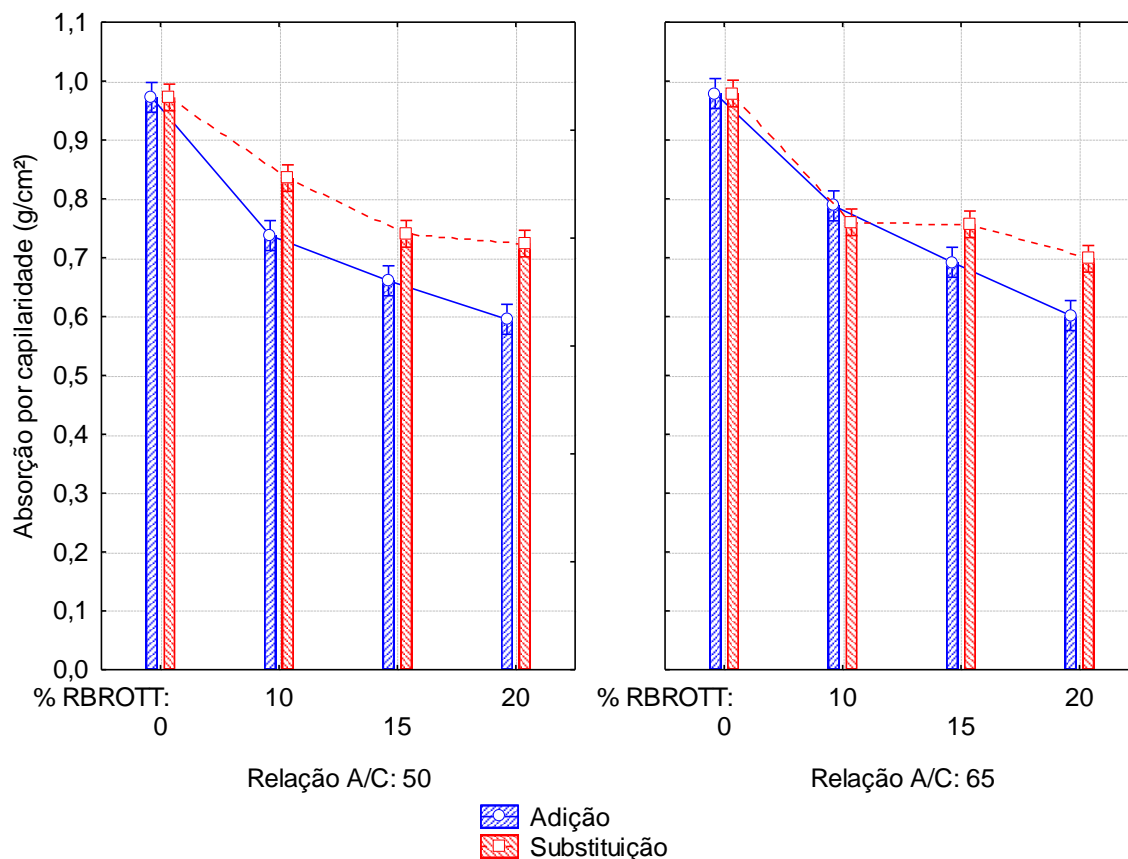


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 4.20 tem-se a interação entre o percentual de RBROTT e a relação A/C sobre a absorção por capilaridade. No caso da adição a interação foi considerada não significativa, enquanto que no caso da substituição a interação foi significativa. Pode-se observar que as misturas com substituição apresentam um pequeno aumento na absorção entre a relação A/C 0,50 e 0,65, mas inferior 0,1g/cm<sup>2</sup>. O efeito pode estar associado a mistura com menor relação A/C conter poros mais refinados que causam o aumento da poro-pressão, aumentando a absorção capilar.



**Figura 4.20 - Gráfico do efeito da interação entre o percentual de RBROTT e a relação água/cimento sobre a absorção capilar.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.3.2 Ensaios eletroquímicos de potencial de corrosão e taxa de corrosão

Com a finalidade de avaliar aspectos de durabilidade e verificar se a utilização do RBROTT proporciona benefícios ao concreto foram executados os ensaios eletroquímicos para medir o potencial de corrosão, como medida qualitativa, e a taxa de corrosão como medida quantitativa.

##### 4.3.2.1 Potencial de corrosão

O ensaio de potencial de corrosão fornece apenas a probabilidade do aço presente dentro do concreto estar no estado passivo ou no estado ativo em função da diferença de potencial medido segundo a ASTM C876:2013. Os valores de referência podem ser observados na Tabela 3.8 do capítulo anterior.

O ensaio de potencial de corrosão teve início quando os concretos apresentavam 91 dias de idade e o ensaio foi interrompido apenas quando todos os corpos de

prova apresentaram despassivação, que ocorreu na idade de 210 dias, totalizando 18 ciclos de imersão e secagem.

Os dados de potencial de corrosão foram submetidos a análise de variância (ANOVA) cujo resultado pode ser observado na Tabela 4.9. As variáveis significativas foram de forma isolada a idade, porcentagem de RBROTT e relação água/cimento e como interações a idade com a porcentagem de substituição e a porcentagem de substituição com a relação A/C.

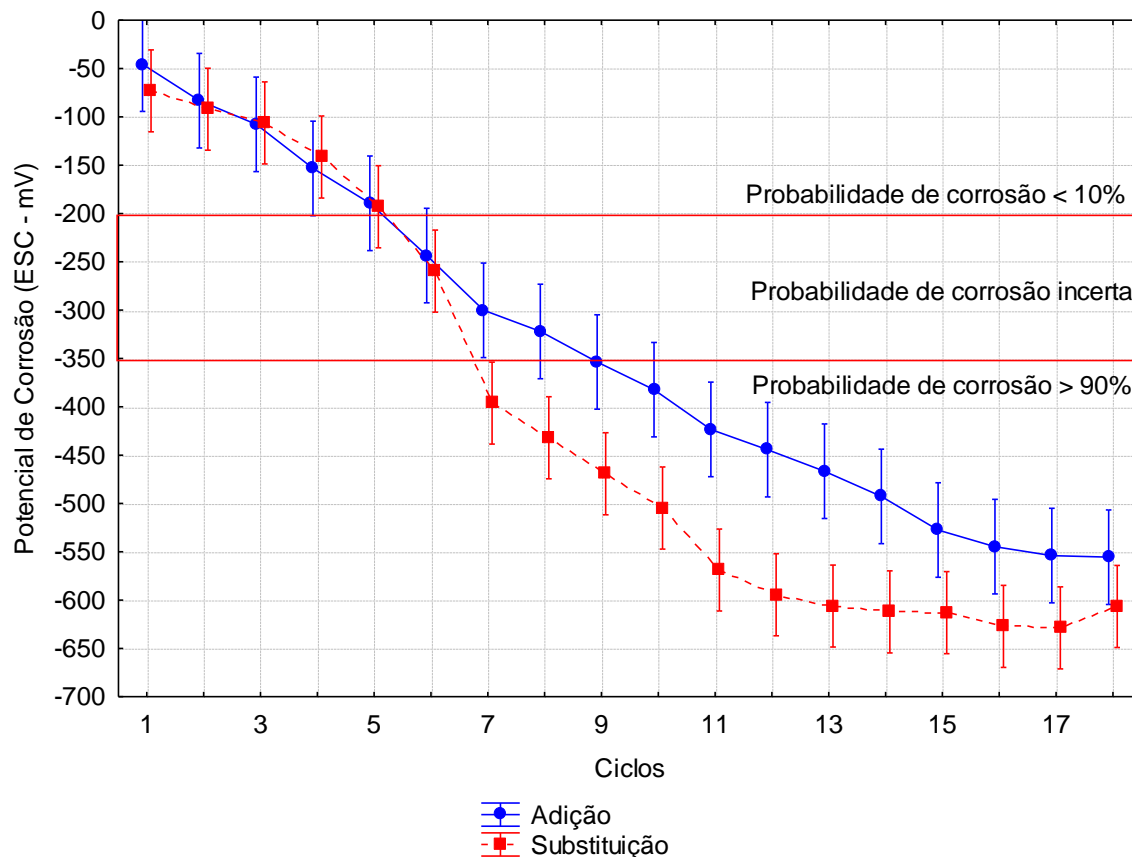
**Tabela 4.9 - Análise de variância do potencial de corrosão.**

Fatores de variação		Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Variância	Valor de F	Valor de p	Significância
Adição	Idade	24179014	17	1422295	47,735	0,000000	Sim
	Relação A/C	4909883	1	4909883	164,784	0,000000	Sim
	% RBROTT	8245442	3	2748481	92,244	0,000000	Sim
	Idade*Relação A/C	1108742	17	65220	2,189	0,003744	Sim
	Idade*% RBROTT	4285247	51	84024	2,820	0,000000	Sim
	Relação A/C*% RBROTT	555273	3	185091	6,212	0,000362	Sim
	Idade*Relação A/C*% RBROTT	1013901	51	19880	0,667	0,964229	Não
	Error	21453029	720	29796			
Fatores de variação		Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Variância	Valor de F	Valor de p	Significância
Substituição	Idade	37168347	17	2186373	97,425	0,000000	Sim
	Relação A/C	268735	1	268735	11,975	0,000571	Sim
	% RBROTT	4173719	3	1391240	61,994	0,000000	Sim
	Idade*Relação A/C	453898	17	26700	1,190	0,266438	Não
	Idade*% RBROTT	3100780	51	60800	2,709	0,000000	Sim
	Relação A/C*% RBROTT	450509	3	150170	6,692	0,000186	Sim
	Idade*Relação A/C*% RBROTT	558761	51	10956	0,488	0,999034	Não
	Error	16157876	720	22441			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 4.21 por meio do gráfico do efeito isolado da variação da idade é possível observar que a medida que os ciclos de imersão em água com cloreto de sódio e secagem em estufa ocorriam o potencial de corrosão torna-se mais negativo. Ou seja, aumenta a probabilidade de corrosão. Este comportamento era esperado devido ao aumento de cloretos livres presentes no interior da mistura que favorecem o processo de despassivação das armaduras.

**Figura 4.21 - Gráfico do efeito isolado da variação da idade sobre a média dos resultados de potencial de corrosão.**



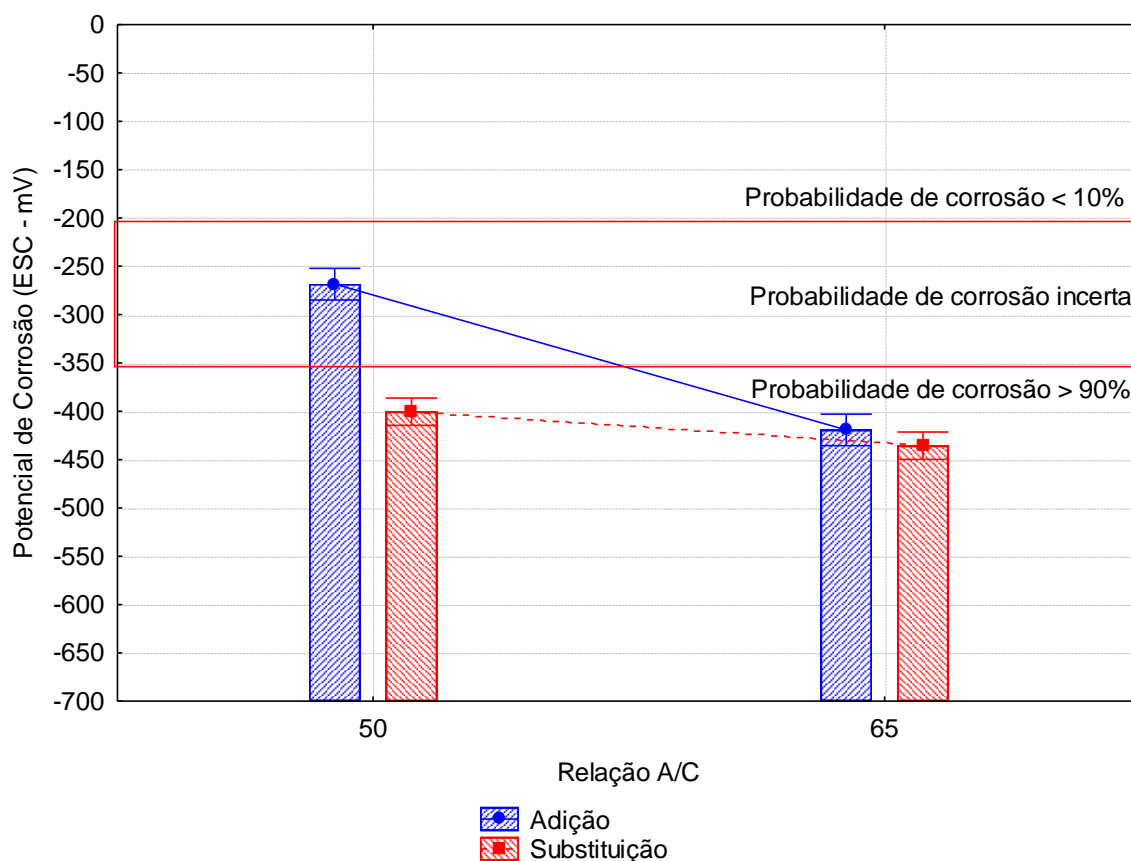
Fonte: Elaborado pelo autor.

Até a idade de 126 dias, ou a partir do sexto ciclo de imersão e secagem, os concretos com adição e substituição permaneceram num mesmo patamar de potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ). Após esse período, os concretos com adição apresentam  $E_{corr}$  menor do que os concretos com substituição do cimento por RBROTT. Para a adição a despassivação ocorreu na idade de 154 dias (10º ciclo) e para substituição ocorreu na idade 133 dias (7º ciclo).

No gráfico do efeito isolado da variação da relação A/C (Figura 4.22) observa-se que os concretos com menor relação A/C apresentam redução no potencial de corrosão devido a menor quantidade de poros disponíveis para a entrada dos agentes agressivos, sendo os concretos com adição e relação A/C 0,50 o de melhor desempenho. Observa-se ainda, que os concretos com relação A/C 0,65 com adição e substituição e o concreto com relação A/C 0,50 e substituição apresentam valores de  $E_{corr}$  muito eletronegativos, caracterizando que ocorreu despassivação

das armaduras. Este resultado pode ser explicado pelo fato dos corpos de prova terem sido submetidos a mais ciclos de imersão e secagem após a despassivação do que antes da despassivação, fazendo com que a média dos resultados apresentassem valores mais eletronegativos.

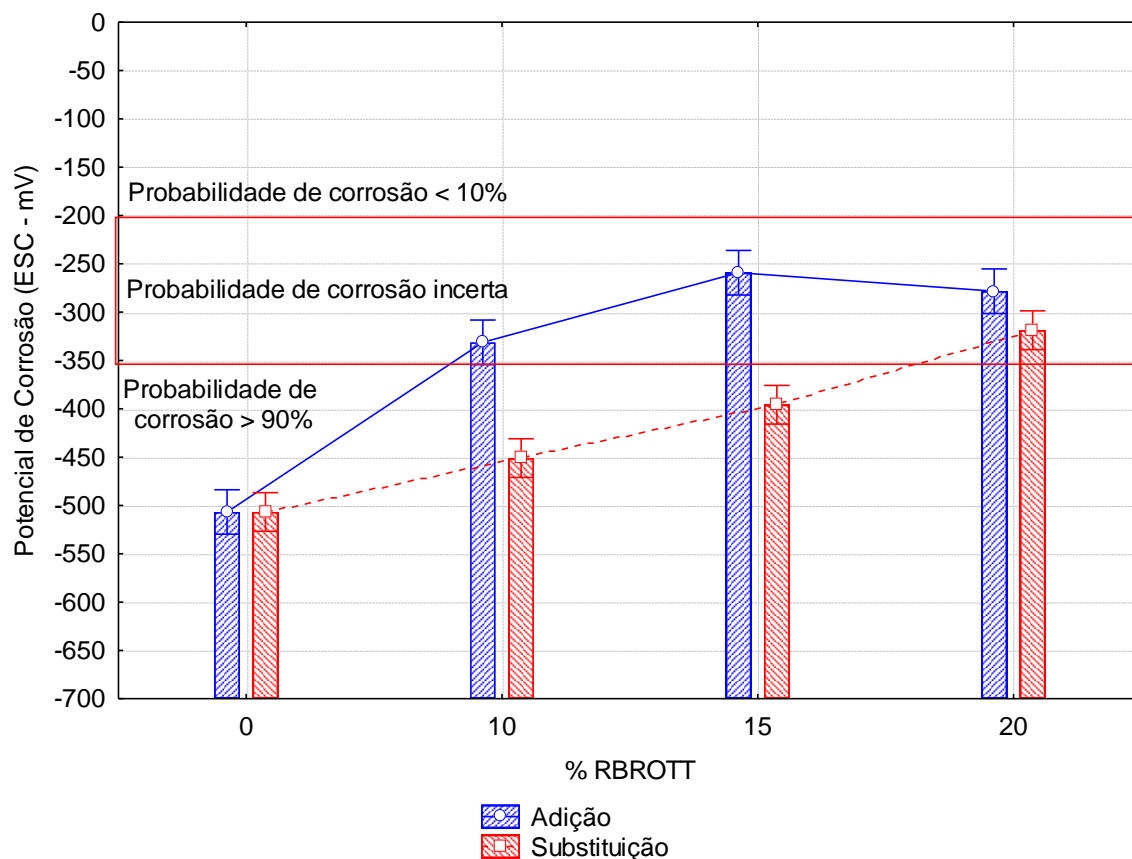
**Figura 4.22 - Gráfico do efeito isolado da variação da relação água/cimento sobre a média dos resultados de potencial de corrosão.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando o gráfico do efeito isolado da variação da porcentagem de RBROTT na Figura 4.23 é possível observar que, ao se aumentar o teor de RBROTT, ocorre a diminuição do potencial de corrosão, resultado explicado pelo fato dos concretos produzidos com o resíduo possuírem menor absorção capilar (Figura 4.18) que dificulta a entrada de agentes agressivos no interior do concreto.

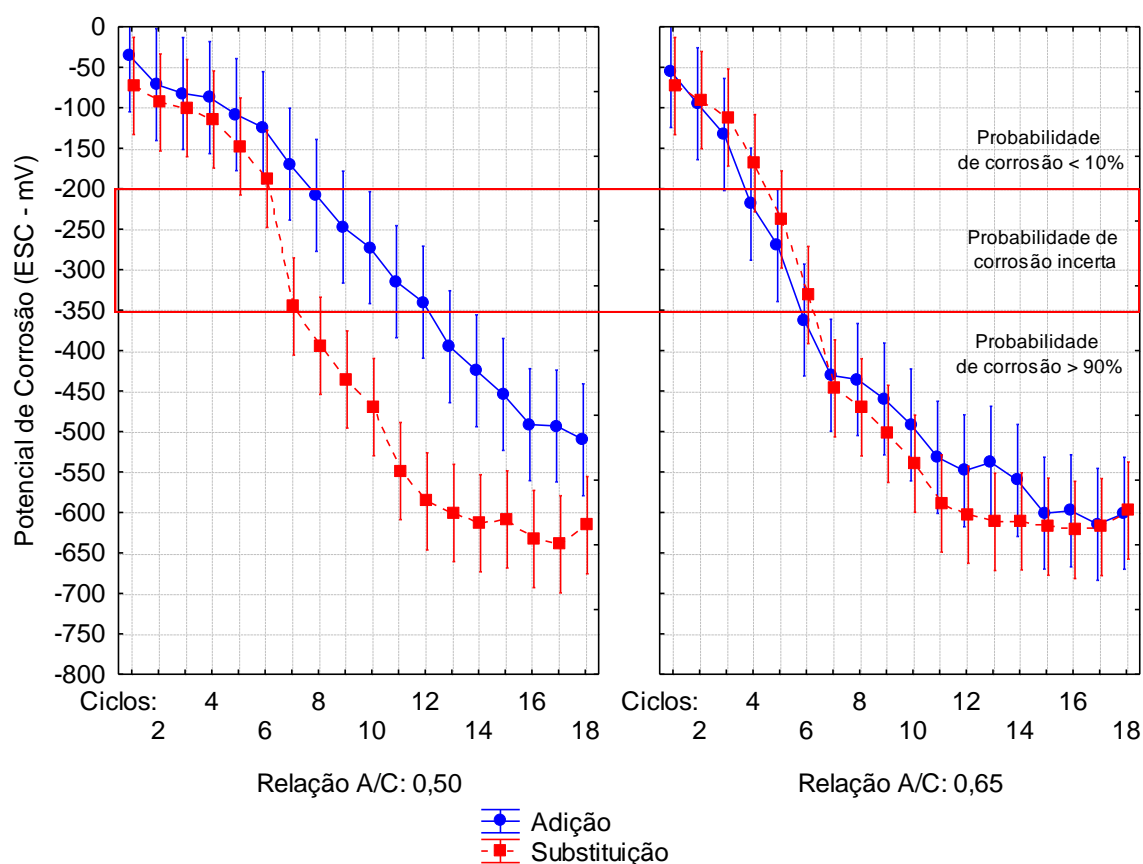
**Figura 4.23 - Gráfico do efeito isolado da variação da porcentagem de RBROTT sobre a média dos resultados de potencial de corrosão**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando o gráfico da interação entre a idade e a relação água/cimento (Figura 4.24) é possível verificar que para o caso da adição, que obteve resultado significativo, existe uma diferença entre as relações A/C 0,50 e 0,65. Os concretos produzidos com relação A/C 0,50 apresentaram maior resistência a ação dos íons cloreto fazendo com que a probabilidade de corrosão aumentasse de forma mais lenta do que nos concretos com relação água/cimento 0,65. Para os concretos produzidos com substituição não houve diferença significativa.

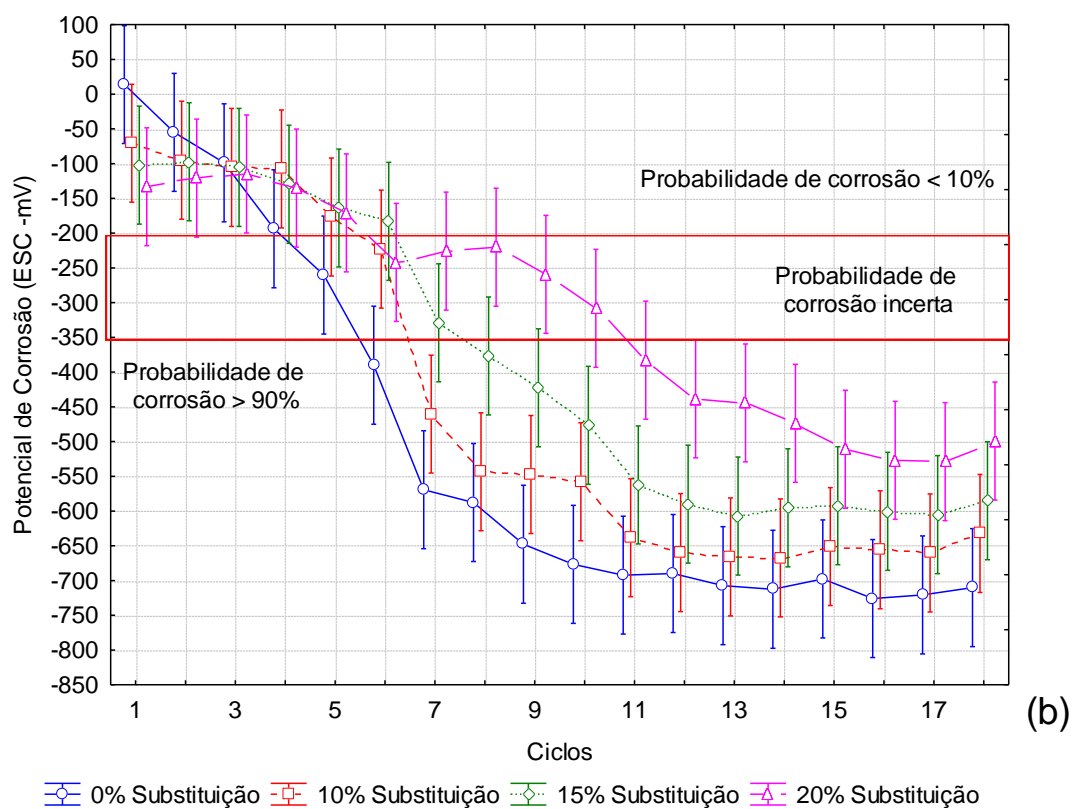
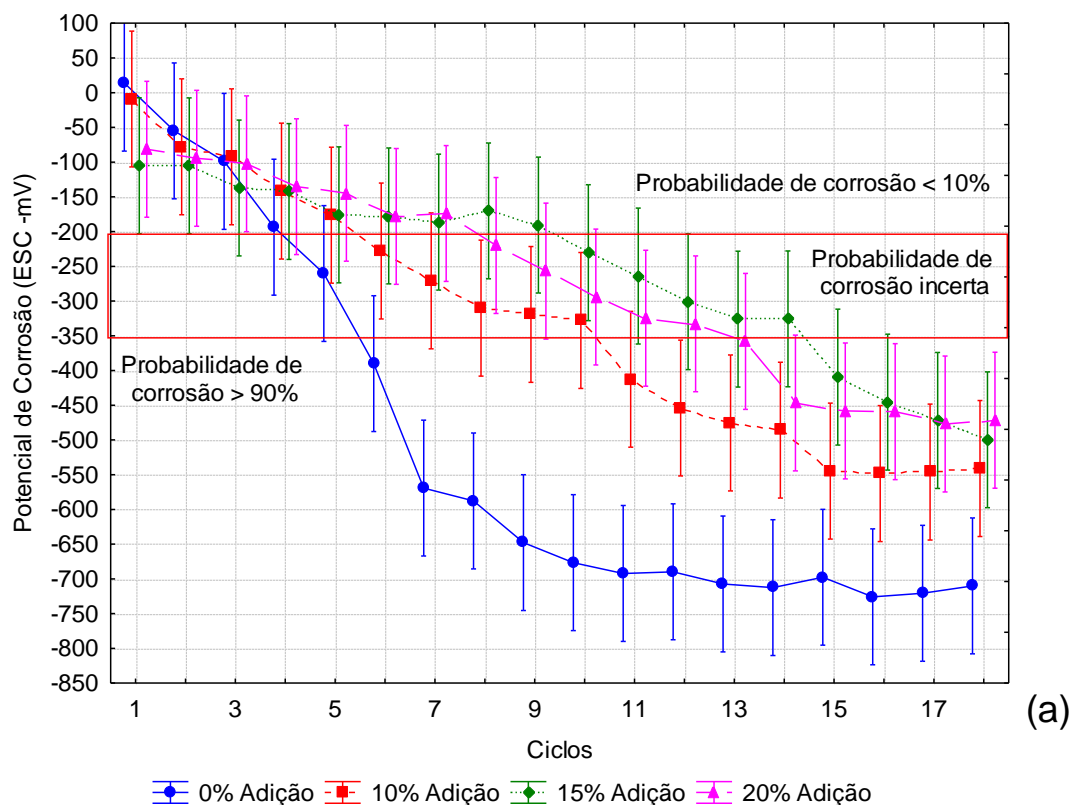
**Figura 4.24 – Gráfico do efeito da interação entre a idade e a relação A/C sobre o potencial de corrosão.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico da Figura 4.25 mostra o efeito da interação entre a idade e o percentual de RBROTT e é possível observar que os concretos com teores de 10, 15 e 20% tanto na adição como na substituição apresentaram melhor desempenho do que o referência. Dentre os concretos com adição o teor de 15% foi o que apresentou melhor desempenho e o teor 20% para a substituição foi o que mais se destacou perante a diminuição do potencial de corrosão ao longo do tempo, resultado consonante aos resultados de resistência a compressão (Tabela 4.5). Na Tabela 4.10 tem-se a idade em que foi observada a despassivação das armaduras. O concreto referência despassivou com 6 ciclos enquanto o A10, A15 e A20 despassivaram no 11º, 15º e 14º ciclo respectivamente. Já o S10, S15 e S20 despassivaram com 7, 8 e 11 ciclos.

**Figura 4.25 - Gráfico do efeito da interação entre a idade e o percentual de RBROTT sobre potencial de corrosão. (a) adição (b) substituição.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

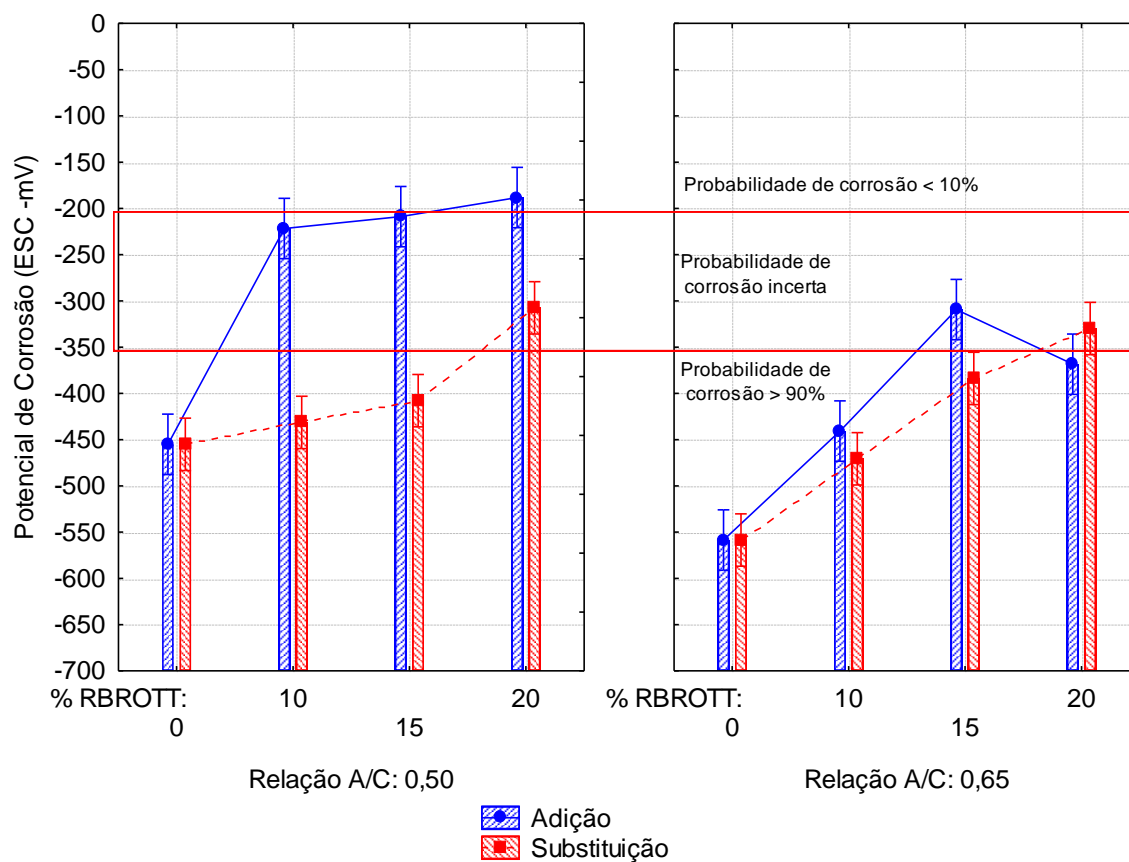
**Tabela 4.10 - Idade em que foi observada a despassivação das armaduras para cada tipo de concreto.**

Concreto	Idade (Dias)	Nº Ciclos
REF	126	6
A10	161	11
A15	189	15
A20	182	14
S10	133	7
S15	140	8
S20	161	11

Fonte: Elaborado pelo autor.

No gráfico do efeito da interação entre o percentual de RBROTT e relação água/cimento (Figura 4.26) observa-se que o efeito da adição nos concretos com relação A/C 0,50 é mais benéfica do que a substituição, para a relação A/C 0,65 tanto a adição como a substituição apresentam resultados similares.

**Figura 4.26 - Gráfico do efeito da interação entre o percentual de RBROTT e a relação água/cimento sobre potencial de corrosão.**



Fonte: Elaborado pelo autor.



#### 4.3.2.2 Taxa de corrosão

O ensaio para medir a taxa de corrosão foi executado nos mesmos corpos de prova utilizados no ensaio de potencial de corrosão e teve início quando o ensaio de potencial de corrosão foi finalizado, ou seja, todas as barras apresentavam estado ativo de corrosão e os concretos possuíam 210 dias de idade.

O ensaio de taxa de corrosão fornece um dado quantitativo sobre a corrosão das armaduras e uma indicação do aço estar no estado passivo ou no estado ativo. Na Tabela 4.11 tem-se a análise de variância da taxa de corrosão e foi observado que as variáveis relação água/cimento, porcentagem de RBROTT e a interação entre elas foi significativo tanto para adição como para substituição.

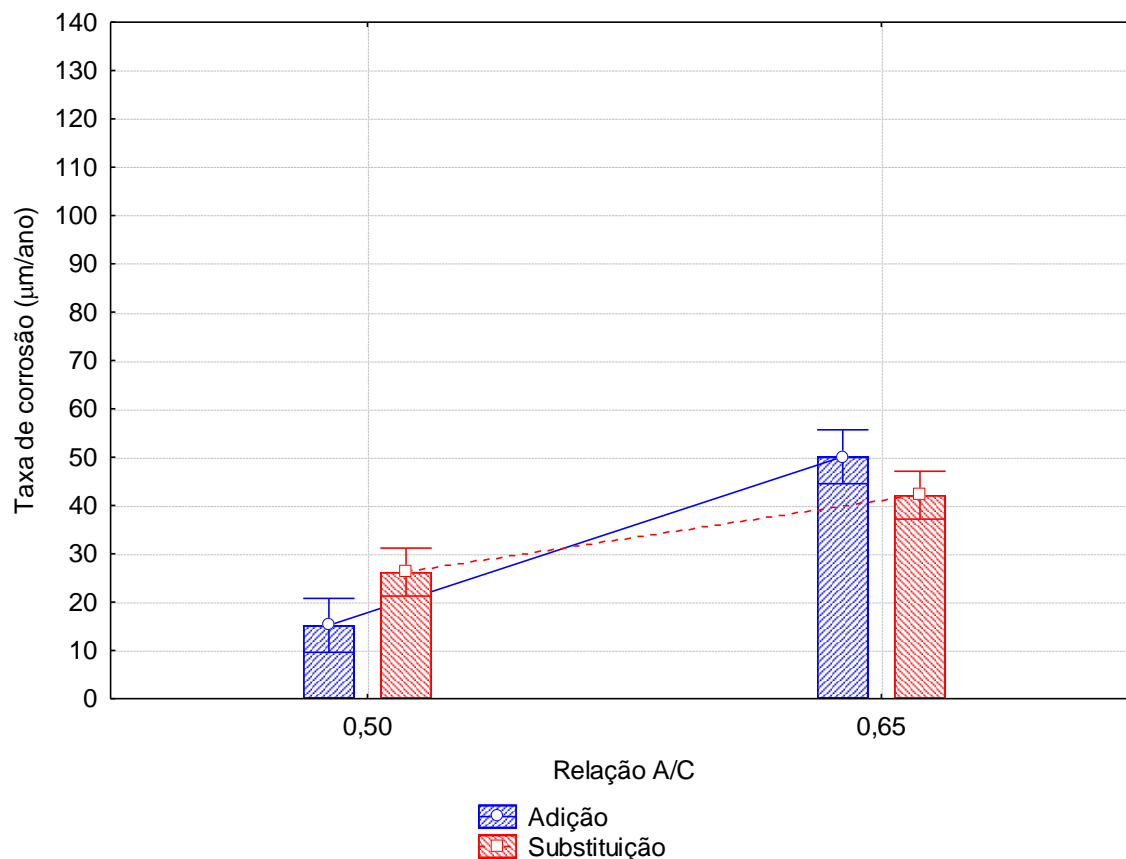
**Tabela 4.11 - Análise de variância da taxa de corrosão.**

Fatores de variação		Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Variância	Valor de F	Valor de p	Significância
Adição	Relação A/C	415652	3	138550,6	71,7094	0,000000	Sim
	% RBROTT	146062	1	146062,4	75,5973	0,000000	Sim
	Relação A/C*% RBROTT	68746	3	22915,2	11,8602	0,000000	Sim
	Erro	911956	472	1932,1			
Fatores de variação		Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Variância	Valor de F	Valor de p	Significância
Substituição	Relação A/C	393117	3	131039,0	85,7498	0,000000	Sim
	% RBROTT	30384	1	30384,1	19,8828	0,000010	Sim
	Relação A/C*% RBROTT	103122	3	34374,1	22,4938	0,000000	Sim
	Erro	721290	472	1528,2			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando o gráfico do efeito isolado da variação da relação água/cimento na Figura 4.27 é possível observar que concretos produzidos com relação A/C menor possuem melhor desempenho, protegendo o aço, em relação a corrosão, aumentando a sua durabilidade. Observando a Tabela 3.9 verifica-se que todos os concretos apresentam ataque importante mas não severo. Para a relação A/C 0,50 existe redução de 57% na taxa de corrosão entre a adição e a substituição, já para a relação A/C 0,65 o efeito ocorre de forma contrária, há um aumento de 19% na taxa de corrosão entre a adição e a substituição.

**Figura 4.27 - Gráfico do efeito isolado da variação da relação água/cimento sobre a média dos resultados de taxa de corrosão.**

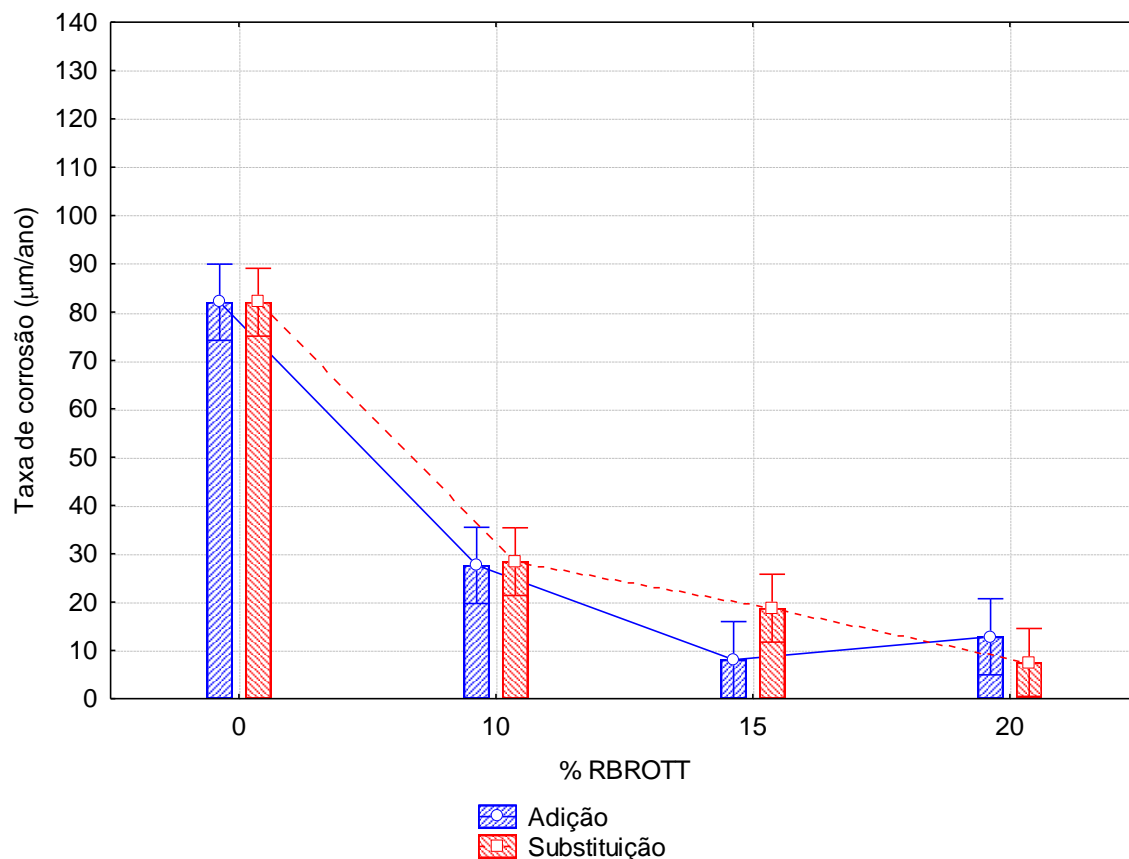


Fonte: Elaborado pelo autor.

O efeito isolado da incorporação do RBROTT pode ser observado na Figura 4.28. Os concretos produzidos com resíduo apresentam desempenho superior ao concreto referência, reduzindo a taxa de corrosão em até 90%. Os concretos de melhor desempenho foram o A15 e o S20 que apresentaram a menor taxa de corrosão, novamente corroborando com os resultados do ensaio de resistência à compressão.

Este comportamento evidencia o efeito do RBROTT nos concretos, possibilitando um aumento de vida útil das estruturas de concreto sob o aspecto de deterioração por corrosão das armaduras induzidas por íons cloreto.

**Figura 4.28 - Gráfico do efeito isolado da variação da porcentagem de RBROTT sobre a média dos resultados de taxa de corrosão.**

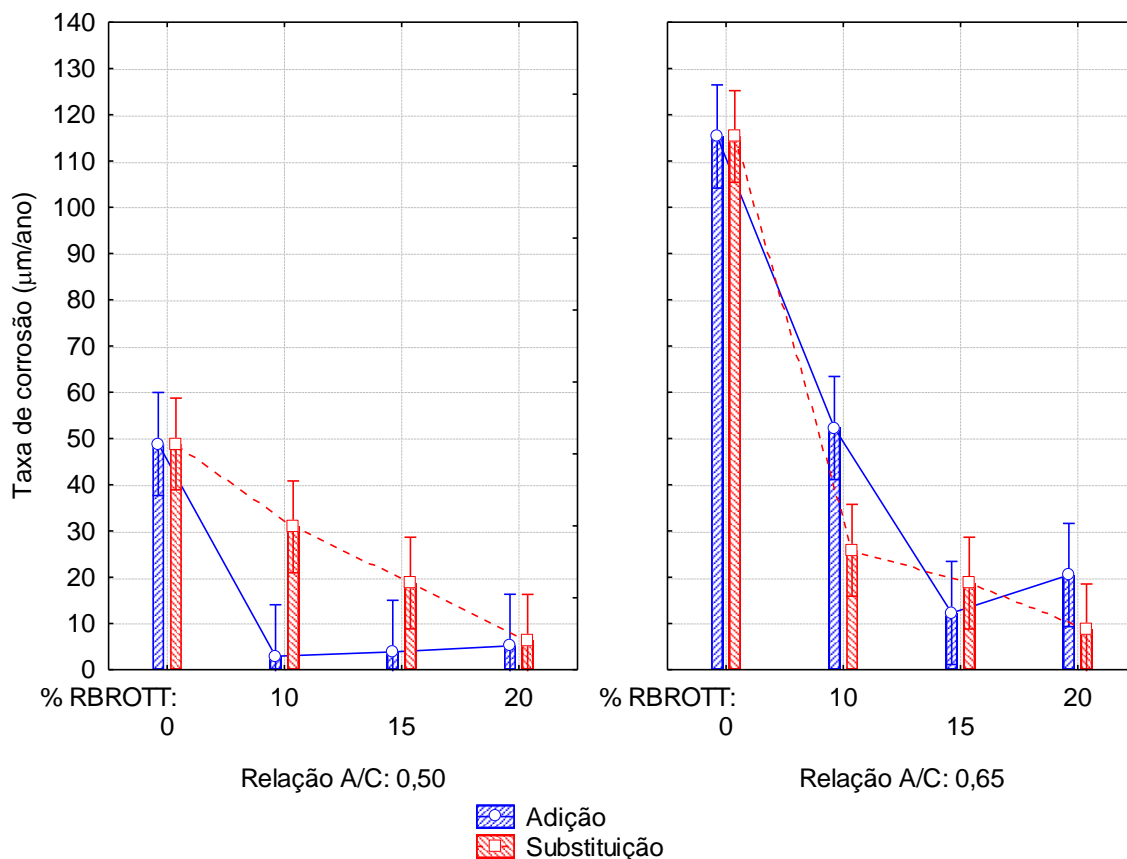


Fonte: Elaborado pelo autor.

A interação entre o percentual de RBROTT e a relação água cimento (Figura 4.29) mostra que para os concretos com menor relação água/cimento a taxa de corrosão foi menor e a utilização do resíduo como adição e como substituto do cimento proporciona taxas de corrosão ainda menores. Para os concretos com relação A/C 0,65 a taxa de corrosão para o concreto de referência foi superior aos demais, e os concretos com adição e substituição apresentaram redução da taxa de corrosão.

O concreto referência e relação A/C 0,65 foi o único que apresentou ataque severo de corrosão, como destaque tem-se os concretos A10, A15, A20 e S20 para a relação A/C 0,5 e o S20 para a relação A/C 0,65, que apresentaram taxa de corrosão inferior à 11µm/ano, caracterizando ataque não severo as barras de aço.

**Figura 4.29 - Gráfico do efeito da interação entre o percentual de RBROTT e a relação água/cimento sobre a taxa de corrosão.**



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.3.2.3 Considerações acerca dos ensaios eletroquímicos

Os ensaios eletroquímicos apontaram redução significativa do efeito dos íons cloreto na corrosão das armaduras dos concretos produzidos com RBROTT, tanto na adição como na substituição. A redução do efeito da corrosão pode estar associada ao ganho de resistência à compressão e redução de absorção de água. Outro fator que pode ter influenciado nos resultados é a redução da penetração de íons cloreto que foi observada nas seguintes pesquisas:

Mittri (2016) notou que a utilização do RBROTT proporciona redução significativa de penetração de íons cloreto no interior do concreto que pode ser atribuída a combinação dos íons cloreto com o aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) formando compostos estáveis.

Singh, Nagar e Agrawal (2016) utilizaram o resíduo de rochas ornamentais como substituto da areia e observaram que, para teores de até 25%, sua utilização reduz a penetração de íons cloreto, devido ao efeito fíler e a melhor capacidade de ligação entre as partículas, pois apresentarem formato angular e rugoso, que melhoram a microestrutura.

Ramos et al. (2013) analisaram a produção de argamassas substituindo o cimento por resíduo de granito, e também, constataram redução no ingresso de cloretos nas misturas, os autores atribuem os resultados a formação de cloroaluminatos, provenientes da combinação da alumina ( $Al_2O_3$ ), presente no resíduo, aos íons cloreto.

## 5 CONCLUSÕES

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões quanto à caracterização do RBROTT e seu efeito na consistência do concreto, quanto aos ensaios no concreto endurecido e por fim uma avaliação geral da utilização do RBROTT como uma adição mineral.

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DO RBROTT

Os ensaios de caracterização do RBROTT indicam a viabilidade do seu uso como uma pozolana, considerando que os limites estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 2015) foram atendidos nos ensaios de caracterização.

### 5.2 CONCRETO NO ESTADO FRESCO

A utilização do RBROTT como adição, em teores superiores a 15%, proporciona redução do abatimento do concreto, que possivelmente pode ser ajustada com utilização de aditivos. Já os concretos produzidos substituindo parcialmente o cimento pelo RBROTT apresentaram abatimento maior indicando melhor trabalhabilidade.

### 5.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os concretos produzidos adicionando RBROTT apresentaram melhores resultados de resistência à compressão em todas as idades e nas duas relações água/cimento estudadas, sendo o A20 0,5 o mais resistente com, aproximadamente, 76 MPa de resistência à compressão aos 365 dias de idade.

Quando o RBROTT foi utilizado substituindo parcialmente o cimento, os concretos com 28 e 56 dias de idade apresentaram resistência menor. Com 91 dias de idade o REF, S10, S15 e S20 apresentavam resistência semelhante e a partir dos 182 dias os concretos com RBROTT passaram a ser mais resistentes. Sendo o S20 0,5 o mais resistente com aproximadamente 67 MPa de resistência à compressão aos 365 dias de idade.

#### 5.4 ABSORÇÃO POR IMERSÃO

Todos os concretos produzidos apresentaram absorção por imersão com valores muito próximos uns aos outros. De forma geral, os concretos produzidos com adição apresentaram absorção capilar menor do que os concretos produzidos com substituição.

#### 5.5 ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

De forma geral os concretos com incorporação de RBROTT apresentaram redução da absorção por capilaridade em relação ao referência, porém, os concretos produzidos com adição apresentaram desempenho superior aos com substituição.

#### 5.6 POTENCIAL DE CORROSÃO

O desempenho dos concretos com RBROTT frente ao potencial de corrosão foi superior ao referência, indicando que sua utilização melhora a proteção que o concreto fornece ao aço nas estruturas armadas. Os concretos produzidos com adição obtiveram resultados melhores do que os com substituição.

#### 5.7 TAXA DE CORROSÃO

Os concretos produzidos com RBROTT apresentaram redução na taxa de corrosão quando comparados ao referência. Os concreto A15 e S20 apresentaram 90 e 91% de redução da taxa de corrosão respectivamente, corroborando com os resultados de resistência à compressão que tiveram aumento de 35 e 46% respectivamente.

#### 5.8 CONCLUSÕES GERAIS

O RBROTT pode ser utilizado como uma adição mineral ou como substituto parcial do cimento pois apresenta características de material pozolânico, proporcionou aumento significativo de resistência à compressão, principalmente quando utilizado como adição.

Os concretos produzidos com substituição apresentaram resistência inferior ao referência nas primeiras idades, portanto deve ser utilizado com parcimônia.

De forma geral os concretos com adição foram os que apresentaram melhor desempenho.

A utilização do RBROTT proporciona a produção de concretos de alto desempenho, visto que possibilita a melhoria das propriedades do concreto, como, aumento da resistência à compressão, redução na absorção de água e tem efeito extremamente significativo na proteção das armaduras em relação à corrosão provocada pelo ataque de íons cloreto.

#### 5.9 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Testar novos teores de adição ou substituição.
- Testar meios para acelerar o ganho de resistência para os concretos produzidos com substituição.
- Produzir cimentos utilizando o RBROTT.
- Avaliar a absorção em idades mais avançadas.
- Avaliar a carbonatação de concretos produzidos com RBROTT.
- Avaliar a microestrutura de concretos produzidos com RBROTT.



## 6 REFERÊNCIAS

ABIROCHAS - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE ROCHAS ORNAMENTAIS. Balanço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais em 2016. **Informe ABIROCHAS**. Brasília: ABIROCHAS, v.1, 2017. 13p. Disponível em: <[http://www.ivolution.com.br/mais/fotos/6/17/4062/Informe\\_01\\_2017.pdf](http://www.ivolution.com.br/mais/fotos/6/17/4062/Informe_01_2017.pdf)>. Acesso em: 06 mai. 2017.

ALAKA, H. A.; OYEDELE, L. O. High volume fly ash concrete: The practical impact of using superabundant dose of high range water reducer. **Journal of Building Engineering**, v.8, p. 81-90, 2016.

ALVES, M. S. **Estudo das características e da viabilidade do uso de resíduos gerados no polimento de rochas graníticas como adição em concretos**. 2008. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

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

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

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

\_\_\_\_\_.**NBR 5751**: Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_.**NBR 5752**: Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_.**NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_.**NBR 6502**: Rochas e solos - Terminologia. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_.**NBR 7211**: Agregados para concreto. 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 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 10.004:** Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_.**NBR 10.007:** Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_.**NBR 11579:** Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (n° 200) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_.**NBR 12653:** Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.

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

\_\_\_\_\_.**NBR 15012:** Rochas para revestimentos de edificações - Terminologia. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_.**NBR 15900-1:** Água para amassamento do concreto - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_.**NBR NM 15:** Cimento Portland - Análise química - Determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_.**NBR NM 18:** Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_.**NBR NM 20:** Cimento Portland e suas matérias primas - Análise química - Determinação de dióxido de carbono por gasometria. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 23:** Cimento Portland - Determinação e massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45:** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 46:** Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75µm por lavagem (material pulverulento). Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 49:** Agregado miúdo. Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53:** Agregado graúdo - Determinação de massa específica e massa aparente. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 65:** Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2002.

\_\_\_\_\_. **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, 2003.

ABRAMS, D. A. **Design of concrete mixtures – Bulletin 1.** Structural Materials Research Laboratory - Lewis Institute: Chicago, 1925. 20 p. Disponível em: <[https://www.forgottenbooks.com/en/download/Design\\_of\\_Concrete\\_Mixtures\\_1000768120.pdf](https://www.forgottenbooks.com/en/download/Design_of_Concrete_Mixtures_1000768120.pdf)>. Acesso em: 01 mai. 2017.

ALENCAR, C.R.A.; CARANASSIOS, A.; CARVALHO, D. **Tecnologias de lavra e beneficiamento: estudo econômico sobre rochas ornamentais.** Fortaleza: Ed. Instituto Euvaldo Lodi, 1996. 225 p.

ASTM. **ASTM C 125-00: Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates**. ASTM International: West Conshohocken/ PA, 2000. 4 p

ASTM. **ASTM C 876-15: Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete**. ASTM International: West Conshohocken/ PA, 2015. 7 p.

BACARJI, E.; TOLEDO FILHO, R. D.; KOENDERS, E. A. B.; FIGUEIREDO, E. P.; LOPES, J. L. M. P. Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete filler. **Construction and Building Materials**, v. 45, p. 1-10, 2013.

BAGHERI, A. R.; ZANGANEH, H.; MOALEMI, M. M. Mechanical and durability properties of ternary concretes containing silica fume and low reactivity blast furnace slag. **Cement & Concrete Composites**, v. 34, n. 5, 2012. p. 663-670.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005. 488 p. 1 v.

CABELLO, M. L. R. **Reciclagem de resíduo gerado na extração de quartzito**. 2011. 172 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2011.

CABELLO, M. L. R.; PERES; A. E. C; MARTINS; A. H.; SILVA, R. G. O; PEREIRA, C. A. Métodos de lavra aplicados à extração de rochas ornamentais. **Holos**, v. 5, ano 28, 2012. 7 p. Disponível em: <<http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/viewFile/1057/609>>. Acesso em: 01 mai. 2017.

CALMON, J. L.; TRISTÃO, F. A.; LORDÊLLO, F. S. S.; SILVA, S. A. **Aproveitamento do resíduo de corte de granito para a produção de argamassas de assentamento**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2., Salvador. **Anais...** Salvador: ANTAC, p. 64-75. 1997.

CALMON, J. L.; TRISTÃO, F. A.; SOUZA, F. L. S.; SILVA, S. C.; MATTOS, F.V. **Aproveitamento do resíduo de corte de granito para a produção de tijolos de solo-cimento**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENTAC98, 7, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ANTAC, p. 899-907, 1998.

CALMON, J. L. Resíduos industriais e agrícolas. ISAIA, G. C. (Org.) **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 1 ed. São Paulo: IBRACON, p. 1590-1627, 2008. 2 v.

CALMON, J. L.; SILVA, 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, p. 199-231, 2006.

CARANASSIOS, A., CICCU, R. Tecnologia de extração e valorização das rochas ornamentais. **Rochas de Qualidade**, São Paulo, n.109, p.58-77, abr/ jun, 1992.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: Inspeção e técnicas eletroquímicas**. 1 ed. São Paulo: UFG/PINI, 1997. 237p.

CHIODI FILHO, C. **Situação do Setor de Rochas Ornamentais e de Revestimento no Brasil – mercados interno e externo**. In: Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste, 5., Recife. **Anais...** Recife: Deminas, DAU, PPGEMinas, SBG, SINDIPEDRAS, 2005. 28p.

CHIODI FILHO, C. **Balço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais em 2013**. São Paulo: ABIROCHAS, 2014. 24 p.

CHIODI FILHO, C.; CHIODI, D. K. **O Setor de Rochas Ornamentais no Brasil**. In: VIDAL, F.V.; AZEVEDO, H.C.A.; CASTRO, N. F. **Tecnologia de Rochas Ornamentais: Pesquisa, Lavra e Beneficiamento**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI. p 493 - 526. 2013.

COSTA, K. C. **Reaproveitamento de resíduos sólidos de rochas ornamentais: sustentabilidade, educação e arte**. 2016. 154 f. Dissertação (Mestrado em Políticas Públicas e Desenvolvimento Local). Escola Superior de Ciências da Santa Casa de Misericórdia de Vitória. 2016.

SARDOU FILHO, R.; MATOS, G. M. M. MENDES, V. A.; IZA, E. R. H. **Atlas de Rochas Ornamentais do Estado do Espírito Santo**. Brasília: CRPM/Ministério de Minas e Energia. 2013. 358 p.

DADSETAN, S.; BAI, J.; Mechanical and microstructural properties of self-compacting concrete blended with metakaolin, ground granulated blast-furnace slag and fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 146, p. 658-667, 2017.

DEMBOVSKA, L.; BAJARE, D. PUNDIENE, I.; VITOLA, L.; Effect of pozzolanic Additives on the Strength Development of High Performance Concrete. **Procedia Engineering**, v. 172, p. 202-210, 2017.

DIETRICH, Y. P., **Durabilidade de concretos produzidos com adição de resíduos provenientes de rochas ornamentais frente à ação de íons cloreto**.

2015. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.

DAL MOLIN, D. C. C., **Adições Minerais**. In: CONCRETO: CIÊNCIA E TECNOLOGIA. 1 ed. São Paulo: IBRACON, v.1, 2011. 1946 p.

FEDUMENTI, M. B. **Avaliação da influência da cinza de casca de arroz no comportamento de concretos com agregado reciclado de concreto em relação a propriedades mecânicas e de durabilidade, com ênfase no transporte de íons cloreto**. 2013. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo/RS, 2013.

FREIRE; L. C.; QUEIROZ; J. P. C.; CARANASSIOS, A. **Utilização de resíduos oriundos do desdobramento de rochas ornamentais para confecção de blocos paisagísticos**. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 17., Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009. 7 p. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br/306-serie-anais-da-xvii-jornada-de-iniciacao-cientifica>>. Acesso em: 10 fev. 2014.

GONÇALVES, J. P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) para a produção de concretos**. 2000. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

GONÇALVES, J. P.; MOURA, W.A. **Reciclagem do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais na construção civil**. In: SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE, 3., 2002, Recife. **Anais...** Recife: CETEM/UFPE, p.179-189, 2002.

GOTTARDI, E. V.; CALMON, J. L.; TEIXEIRA, J. E. S. L. **O uso de resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais e de escória de aciaria como fíler em misturas asfálticas**. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 42., Gramado. **Anais...** Gramado: RAPv, 2013.

HEIDER, M.; MAIA, C. M. Rochas ornamentais e de revestimentos. In: LIMA, T. M.; NEVES, C. A. R. (Coord.). **Sumário Mineral - 2014**. Brasília: DNPM, 2015. 152p.

HELENE, P., TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. 1 ed. São Paulo: PINI, 1992. 349 p.

JAMIL, M.; KHAN, M. N. N.; KARIM, M. R.; KAISH, A. B. M. A.; ZAIN, M. F. M. Physical and chemical contributions of Rice Husk Ash on the properties of mortar. **Construction and Building Materials**, v. 128, p.185-198, 2016.

KANNAN, V.; GANESAN, K. Chloride and chemical resistance of self compacting concrete containing rice husk ash and metakaolin. **Construction and Building Materials**, v. 51, p. 225-234, 2014.

KENNER, C. S. **Acts: An Exegetical Commentary: Introduction and 1:1-2:47**. Grand Rapids: Baker Academic, 2012. 1104 p.

LAMEIRAS, R. M., TENÓRIO, J. J. L., LIMA, L.A. **Avaliação do potencial de utilização do resíduo do beneficiamento de chapas de granito (RBCG) em concretos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47., Recife. **Anais...** Recife: IBRACON, p. 317-332, 2005.

LEITE, J. Y. P.; ARAÚJO, R. C. **Reciclagem de rochas ornamentais e sua Utilização na indústria cerâmica**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 14., Natal. **Anais...** Natal: ABEQ, 2002.

LIMA FILHO, V. X.; BEZERRA, A. C.; SANTOS, F. C.; NOGUEIRA, R. E. F. Q.; FERNANDES, A. H. M. **Determinação de parâmetros para a racionalização do processamento de rochas graníticas por abrasão**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 15., São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABCM, 1999. 6 p.

LISBÔA, E. M. **Obtenção do concreto auto-adensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas**. 2004. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2004.

LOPES, J. L. M. P. BACARJI, E. PAZINI, E. J.; RÊGO, J. H. S. PEREIRA, A. C. **Estudo do potencial de utilização do resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG), como fíler, na produção de concretos**. In: CONGRESSO DE PESQUISA, ENSINO E EXTENSÃO DA UFG, 3., Goiânia. **Anais eletrônicos...** Goiânia: UFG, 2006. 5 p.

MAIA, S. M. C. **Estudo integrado geológico/tecnológico de rochas ornamentais: os granitos Flores e Jacarandá**. 2004. 79 f. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2004.

MANHÃES, J. P. V. T., HOLANDA, J. N. F. Caracterização e classificação de resíduo sólido "pó de rocha granítica" gerado na indústria de rochas ornamentais. **Quím. Nova**, São Paulo, v. 31, n. 6, p. 1301-1304, 2008.

MARÇAL, R. L. S. B. **Fabricação de vidros especiais a partir de resíduos da indústria de rochas ornamentais**. 2011. 79 f. Dissertação (Mestrado em Ciências

dos Materiais). Programa de Pós-graduação em Ciência dos Materiais. Instituto Militar de Engenharia, 2011.

MATTA, P. M. **Indústria de rochas ornamentais: rejeitos X produção limpa**. Salvador: Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPN/BA, 2003. 45 p

MATTOS, I. C. Uso/adequação e aplicação de rochas ornamentais na construção civil – parte 1. In: SENAI, **Cartilha de aplicação de rochas ornamentais**. Brasília, v. 1, 2000. 37 p.

MEDEIROS, M. H. F.; ANDRADE, J. J. O.; HELENE, P. Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. In: **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2011. 1946 p. 1 v.

MEDINA, G.; SÁEZ DEL BOSQUE, I.F.; FRÍAS, M. SÁNCHEZ DE ROJAS, M. I.; MEDINA, C.; Granite quarry waste as a future eco-efficient supplementary cementitious material (SCM): Scientific and technical considerations. **Journal of Cleaner Production**. v. 148, p. 467-476, 2017a.

MEDINA, G.; SÁEZ DEL BOSQUE, I.F.; FRÍAS, M. SÁNCHEZ DE ROJAS, M. I.; MEDINA, C.; Mineralogical study of granite waste in a pozzolan/Ca(OH)<sub>2</sub> system: Influence of the activation process. **Applied Clay Science**. v. 135, p. 362-371, 2017b.

MEHTA, P. K. AİTCIN, P. C. **Microstructural basis of selection of materials and mix proportions for high strength concrete**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UTILIZATION OF HIGH STRENGTH CONCRETE, 2., 1990, Berkeley. **Anais...** Detroit: American Concrete Institute, p. 265-287, 1990.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3 ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

MENDES, V. A.; VIDAL, F. W. H. **Controle de qualidade no emprego das rochas ornamentais na construção civil**. In: SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE, 3., Recife. **Anais eletrônicos...** Recife: CETEM/UFPE. 2002. 197 p.  
Disponível em: [http://www.fiec.org.br/sindicatos/simagran/artigos\\_palestras/Controle\\_de\\_Qualidade\\_noEmpregoRochasornamentais.htm](http://www.fiec.org.br/sindicatos/simagran/artigos_palestras/Controle_de_Qualidade_noEmpregoRochasornamentais.htm). Acesso em: 20 fev. 2017.

MITTRI, S. H. M. **Contribuição ao estudo do comportamento de concretos produzidos com resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente em relação aos aspectos mecânicos e de durabilidade**. 2016.



168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

MORAES, I. V. M. **Mármore e Granito: lavra, beneficiamento e tratamento de resíduos**. Dossiê Técnico. Rede de Tecnologia do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: SBRT, 2006. 21 p.

MOREIRA, J. M. S.; FREIRE, M. N.; HOLANDA, J. N. F. Utilização de resíduo de serragem de granito proveniente do estado do Espírito Santo em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v.49, n.312, p.262-267, 2003.

MOTA, J. D.; OLIVEIRA, D. F.; SOUSA, A. A. P.; TRAJANO, M. F.; SANTIAGO, N. O. **Caracterização e avaliação da lama abrasiva proveniente do corte de rochas ornamentais: um estudo comparativo**. In: CONGRESSO QUÍMICO DO BRASIL, 2., Natal. **Anais...** Natal: ANNQ, 2012. 8 p.

MOTHÉ FILHO, H. F.; POLIVANOV, H.; MOTHÉ, C. G. Reciclagem dos resíduos sólidos de rochas ornamentais. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, Rio de Janeiro, v. 28-2, p. 138-151, 2005.

MOURA, W. A. GONÇALVES, J. P.; LEITE, R. S. Utilização do resíduo de corte de mármore e granito em argamassas de revestimento e confecção de lajotas para piso. **Sitientibus**, Feira de Santana, n. 26, p. 49-61, jan./jun., 2002. Disponível em: <[http://www2.uefs.br/sitientibus/pdf/26/utilizacao\\_do\\_residuo\\_de\\_corte\\_de\\_marmore.pdf](http://www2.uefs.br/sitientibus/pdf/26/utilizacao_do_residuo_de_corte_de_marmore.pdf)>. Acesso em: 01 fev. 2017.

MOURA, W. A.; GONÇALVES, J. P. **Utilização do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (mármore e granitos) na construção civil**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9., Paraná. **Anais...** Paraná: ANTAC, 2002, 8 p.

MOURA, W. A. CALMON; J. L.; LIMA, M. B. L.; MORATTI, M.; CORREIA, R. F.; SENNA, D. O.; BOAVENTURA, M. C. **Relatório final do projeto utilização de resíduo de serragem de rochas ornamentais (RSRO) na produção de peças pré-moldadas para habitação de interesse social**. Relatório Final de Projeto. Feira de Santana: UFES/UEFS. 2007. 81 p.

MOURA, W. A., LEITE, M. B. Estudo da viabilidade da produção de blocos com utilização de resíduo de serragem de rochas ornamentais para alvenaria de vedação. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 64, n. 2, p. 147-154, abr/jun, 2011.

NAGROCKIENĖ, D.; GIRSKAS, G.; SKRIPKIUNAS, G. Properties of concrete modified with mineral additives. **Construction and Building Materials**. v. 135, p. 37-42, 2017.

NEVES, G.; PATRICIO, S. M. R.; FERREIRA, H. C.; SILVA, M. C. **Utilização de resíduos da serragem de granitos para a confecção de tijolos cerâmicos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 43., Florianópolis. **Anais eletrônicos...** Florianópolis: ABCERAM, 1999. 12 p.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2 ed. São Paulo: PINI, 1997. 828 p.

OLIVEIRA, J. D., **Análise de propriedades mecânicas e reológicas de matrizes cimentícias com adição de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente**. 2017. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

PEITER, C. C.; CHIODI FILHO, C. **Rochas ornamentais no século XXI: bases para uma política de desenvolvimento sustentado das exportações brasileiras**, 1 ed., Rio de Janeiro: CETEM / ABIROCHAS, 2001. 160 p.

PONTES, I. F.; STELLIN JÚNIOR, A. **Aproveitamento de Resíduos de Serrarias na Indústria de Construção Civil**. In: JORNADAS ARGENTINAS DE INGENIERIA DE MINAS, 7., Buenos Aires. **Anais eletrônicos...** Buenos Aires. 2001. 10 p. Disponível em: <  
<http://www.cetem.gov.br/images/congressos/2005/CAC01650005.pdf>>. Acesso em 01 mai. 2017.

POSI, P.; THONGJAPO, P.; THAMULTREE, N.; BOONTEE, P.; KASEMSIRI, P.; CHINDAPRASIRT, P. Pressed lightweight fly ash-OPC geopolymer concrete containing recycled lightweight concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v.127, p. 450-456, 2016.

PRANDO, L. P., BARCELOS, I. S. **Tratamento de resíduos gerados pelo beneficiamento de rochas ornamentais**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 8., Uberlândia. **Anais eletrônicos...** Uberlândia: UFU, 2009. 7 p. Disponível em: <  
<http://www.cobeqic2009.feq.ufu.br/uploads/media/79521611.pdf>>. Acesso 01 mar. 2017.

RANA, A.; KALLA, P.; VERMA, H. K.; MOHNOT, J. K. Recycling of dimensional stone waste in concrete: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 135, p. 312-331, 2016.

REGADAS, I. C. M. C. **Aspectos relacionados às lavras de granitos ornamentais com fio diamantado no norte do Estado do Espírito Santo, Brasil.** 2006. 128 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 2006.

REIS, R. C.; SOUSA, W. T. Métodos de lavra de rochas ornamentais. **Rem: Rev. Esc. Minas**, Ouro Preto, v. 56, n. 3, p. 207-209, 2003.

REIS, A. S.; TRISTÃO, F. A. **Análise de argamassas com resíduo de corte de rochas ornamentais.** In: CONGRESSO NACIONAL DE ARGAMASSAS DE CONSTRUÇÃO, 2., Lisboa. **Anais eletrônicos...** Lisboa: APFAC, 2007. 11 p. Disponível em: [http://www.apfac.pt/congresso2007/comunicacoes/Paper%2038\\_07.pdf](http://www.apfac.pt/congresso2007/comunicacoes/Paper%2038_07.pdf). Acesso em: 01 mai. 2017.

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. 272 p.

SADEK, D. M.; EL-ATTAR, M. M.; ALI, H. A. Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development. **Journal of Cleaner Production**. v. 121, p.19-32, 2016.

SANTOS, J. G.; SILVA, S. S. F.; NASCIMENTO; N. M. S.; TRAJANO; M. F.; MELLO; V. S. **Caracterização da lama abrasiva gerada nos processos de beneficiamento do granito: um estudo de caso na Granfugi localizado em campina grande – PB.** In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 30., São Carlos. **Anais...** São Paulo: ENEGEP, 2010. 13 p.

SATO, V. Y., **Contribuição ao estudo reológico de pastas cimentícias com adição de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais.** 2015. 111f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2015.

SCHMIDT, B.; MEDEIROS; M. H. F.; MATOS; A.; DUARTE, T.; RIO, J.; SOUSA-COUTINHO; J. Aplicação de tratamento térmico em resíduos de pó de pedra para substituição parcial do cimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 53., Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: IBRACON, 2011. 15 p.

SHAIKH, F. U. A.; SUPIT, S. W.M. Mechanical and durability properties of high volume fly ash (HVFA) concrete containing calcium carbonate (CaCO<sub>3</sub>) nanoparticles. **Construction and Building Materials**, v. 70, p. 309-321, 2014.

SILVA, M. G. Cimento Portland com Adições Minerais. In: ISAIA, G. C. (Org.) **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 1 ed. São Paulo: IBRACON, p. 761-793, 2008. 1 v.

SINGH, S.; KHAN, S.; KHANDELWAL, R.; CHUGH, A.; NAGAR, R.; Performance of sustainable concrete containing granite cutting waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 119, p. 86-98, 2016.

SINGH, S.; NAGAR, R.; AGRAWAL, V.; A review on Properties of Sustainable Concrete using granite dust as replacement for river sand. **Journal of Cleaner Production**, v. 126, p. 74-87, 2016.

SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório anual – 2013**. Rio de Janeiro, 2014. 40p. Disponível em: <<http://snic.org.br/pdf/RelatorioAnual2013final.pdf>>. Acesso em 06 mai. 2017.

SOARES, R. B. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com a incorporação de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais**. 2014. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

STATSOFT. Statistica. versão 7.0. Statsoft, 2004. 1 CD-ROM.

TEIXEIRA, A. F. N.; MELO, L. B.; OLIVEIRA, N. S. M. **Rochas ornamentais: o desenvolvimento econômico e suas relações com a sociedade brasileira e norte-riograndense**. In: CONGRESSO NORTE NORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO, 7., Palmas. **Anais...** Palmas: CONNEPI, 2012. 7 p.

ULIANA, J. G.; BASTOS, R. S.; CALMON, J. L.; TRISTÃO, F. A.; VIEIRA, G. L.; RODRIGUES, J. A. **Estudo comparativo da caracterização da lama do beneficiamento de rochas ornamentais com e sem granalha de aço**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 55., Gramado. **Anais...** Gramado: IBRACON, 2013, 13 p.

ULIANA, J. G. **Tratamento Térmico da Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais: Aplicação Como Pozolana em Matrizes Cimentícias**. 2014. 214 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

ULIANA, J. G.; CALMON, J. L.; VIEIRA, G. L.; TEIXEIRA, J. E. S. L.; NUNES, E.; Tratamento térmico da lama do beneficiamento de rochas ornamentais: aplicação como pozolana em matrizes cimentícias. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 8, n. 2, p. 112-123, 2015.

VANCE, K.; KUMAR, A.; SANT, G.; NEITHALATH, N.; The rheological properties of ternary binders containig Portland cement, limestone, and metakaolin or fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 52, p. 196-207, 2013.

VAZZOLER, J. S. **Investigação de potencialidade pozolânica do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais após tratamento térmico para produção de pasta cimentícia**. 2015. 145f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.

ZHAO, Q.; HE, X.; ZHANG, J.; JIANG, J.; Long-age wet curing effect on performance of carbonation resistance of fly ash concrete. **Construction and Building Materials**, v. 127, p. 577-587, 2016.