

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

RUBIELLY BASTOS SOARES

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA DURABILIDADE DE
CONCRETOS PRODUZIDOS COM A INCORPORAÇÃO DE
RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS
ORNAMENTAIS**

Vitória

2014

RUBIELLY BASTOS SOARES

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA DURABILIDADE DE CONCRETOS
PRODUZIDOS COM A INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO
DE ROCHAS ORNAMENTAIS**

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.

Orientador: Prof.^o Dr. Fernando Avancini Tristão

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Geilma Lima Vieira

Vitória

2014

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

S676c Soares, Rubielly Bastos, 1987-
Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com a incorporação de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais / Rubielly Bastos Soares. – 2014.
163 f. : il.

Orientador: Fernando Avancini Tristão.

Coorientador: Geilma Lima Vieira.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Rochas ornamentais. 2. Resíduos. 3. Mármore. 4. Granito. 5. Sulfato de magnésio. 6. Durabilidade (Engenharia). 7. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.). I. Tristão, Fernando Avancini. II. Vieira, Geilma Lima. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 624

RUBIELLY BASTOS SOARES

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA DURABILIDADE DE CONCRETOS
PRODUZIDOS COM A INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO
DE ROCHAS ORNAMENTAIS

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

Vitória, 21 de Agosto de 2014.

Prof. Dr. Fernando Avancini Tristão
Universidade Federal do Espírito Santo
Professor Orientador

Prof. Dr^a. Geilma Lima Vieira
Universidade Federal do Espírito Santo
Professora Coorientadora

Prof. Dr. Paulo Roberto do Lago Helene
Universidade de São Paulo
Membro da banca examinadora

Prof. Dr^a. Sayonara Maria de Moraes Pinheiro
Universidade Federal do Espírito Santo
Membro da banca examinadora

Aos meus pais

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu Deus que me fez chegar até aqui pela sua infinita graça e misericórdia.

Agradeço ao meu querido professor orientador Avancini, uma das pessoas mais humildes que conheço. Que sempre passou os seus conhecimentos com carinho e atenção. Um professor disposto a tudo, inclusive a carregar sacos de cimento! Muito obrigada pelo privilégio de ser sua orientanda.

A professora co-orientadora Geilma, que diante das minhas crises, desesperos e choros, sempre me ajudou, orientou e acalmou, principalmente! Obrigada por acreditar em mim!

Agradeço aos colaboradores do Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, os “meninos” do LEMAC, que ao final desses meses se tornaram amigos: Carlos, Loriato, Márcio e Henrique!

Aos colaboradores do Laboratório de Caracterização de Superfícies dos Materiais do Programa de Pós - Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, professor Marcelo e o engenheiro Nishida.

Agradeço a todo o corpo docente e administrativo do Programa de Pós – Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo.

Agradeço aos grandes amigos que fizeram essa jornada ser mais leve: Vanessa, Yustane, Júlia, Ricardo, Lorena, Aline Sauer, Aline Fernandes e Maxwell. Sentirei muitas saudades, guardarei nossas histórias!

A minha amiga, que tenho grande admiração, uma excelente professora, confidente e companheira, que caminhou comigo e me ajudou muito, Juliana Uliana.

Agradeço aos meus pais por me incentivarem, cuidar de mim e por suas constantes orações.

A minha irmã, meu exemplo, que sempre entendeu meus choros e crises.

Agradeço ao Kaio, companheiro e incentivador, sempre acreditou em mim!

Aos meus amigos e familiares, por suas orações!

A empresa Holcim pela colaboração na pesquisa, fornecendo os sacos de cimento necessários para os experimentos.

A Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) pela estrutura disponibilizada.

A CAPES pelo apoio financeiro.

Finalmente, a todos que de uma maneira ou de outra, colaboraram para que eu chegasse ao fim dessa jornada!

*Ó profundidade da riqueza, tanto da sabedoria como do conhecimento de Deus!
Quão insondáveis são os seus juízos, e quão inescrutáveis, os seus caminhos!
Quem, pois, conheceu a mente do Senhor?
Ou quem foi o seu conselheiro?
Ou quem primeiro deu a Ele para que lhe venha ser restituído?
Porque dEle, e por meio dEle, e para Ele são todas as coisas.
A Ele, pois, a glória eternamente.
Amém*

RESUMO

SOARES, Rubielly Bastos. **CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA DURABILIDADE DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM A INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS**. 2014. 000 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

A construção civil é uma indústria que consome volume significativo de recursos naturais, no entanto, possui potencial expressivo de aproveitamento de resíduos para a produção de materiais de construção. A utilização de subprodutos industriais apresenta-se como uma contribuição para a otimização de insumos e conseqüentemente para o desenvolvimento sustentável. O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de rochas ornamentais, sendo o Espírito Santo o estado brasileiro com maior representatividade no setor. Para produzir as chapas, os blocos de rocha são serrados em teares, transformando aproximadamente 25% do bloco em resíduo. Este consiste em uma lama que passa por filtros e precisa ser descartada. Devido ao montante de resíduo gerado e aos custos e dificuldades para destinação, este material tem sido alvo de estudos para sua utilização na construção civil há vários anos. Diante disso, este trabalho teve como objetivo investigar a influência da incorporação de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) sobre propriedades ligadas à durabilidade do concreto, em especial aquelas relacionadas com a resistência à agentes agressivos externos do tipo íons sulfato. Para isso, os concretos foram produzidos com três diferentes relações água/cimento (0,45; 0,55 e 0,65) e adição do RBRO em relação à massa de cimento em teares de 5%, 10% e 15%, além do concreto de referência. Foram analisadas propriedades no estado fresco, trabalhabilidade e massa específica, e no estado endurecido, resistência à compressão axial, absorção de água por capilaridade e por imersão além das análises microestrutural. Para o ensaio de degradação acelerada foi utilizado o sulfato de magnésio. Os concretos foram submetidos a ciclos de imersão e secagem e, ao final, sua resistência à compressão foi medida. Os concretos com 5% de resíduo apresentaram os melhores resultados quanto ao desempenho mecânico, com valores acima dos concretos de referência, para todas as relações a/c. Nos concretos agredidos verificou-se uma microfissuração superficial típica do ataque por sulfatos, 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 teares de 5% de adição.

Palavras-chave: resíduo de rochas ornamentais. mármore e granito. fíler. sulfato de magnésio. durabilidade. reaproveitamento.

ABSTRACT

SOARES, Rubielly Bastos. **CONTRIBUTION TO THE STUDY OF THE DURABILITY OF CONCRETE PRODUCED WITH THE MERGER OF THE WASTE PROCESSING OF STONES.** 2014. 000 f. Dissertation (Master in Civil Engineering) - Graduate Program in Civil Engineering, Federal University of Espírito Santo, Vitória, 2014.

The construction industry consumes a significant amount of natural resources, however, it has a great potential on the use of wastes in production of building materials. The use of industrial subproducts can optimize inputs, as well as contribute to sustainable development practices. Brazil is one of the largest producers of ornamental rocks in the world, and Espírito Santo state is the main contributor to this industry in the country. To produce the plates, the rock blocks are sawn on looms, and this process results in approximately 25% of residue. This residue consists in slurry that passes through filters and must be discarded. Due to the amount of waste generated, the costs and difficulties for disposal, this material has been investigated for use in construction for several years. Therefore, this study aimed to research about the influence of the incorporation of the residue generated in ornamental stones processing, named in Portuguese as Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO), relating this residue to properties like concrete durability, in particular those associated with resistance to external aggressors like sulfate ions. For this purpose, the concrete was produced with three different water/cement ratios (0.45, 0.55 and 0.65) and the RBRO was added in levels of 5%, 10% and 15% in relation to the amount of water/cement mass created originally. The proprieties analyzed when the material was still fresh were workability and density, and after the material has gotten hard, it was observed its resistance to axial compression, to water absorption by capillarity and to immersion beyond microstructural analysis. For the tests of accelerated degradation it was used magnesium sulfate. The concrete were subjected to cycles of immersion and drying and, in the end, their resistance to compression was measured. The concrete created with 5% of residue showed the best results in terms of mechanical performance. It was observed in the attack concrete superficial microcracks that are typical of attacks by sulfates, also it was noticed the consumption of calcium hydroxide and the possible presence of ettringite by EDS. However, the results show the positive effect of the use of RBRO in the resistance to attack by sulphates in concentrations of 5%.

Keywords: residue of ornamental, marble, granite, fillers , magnesium sulfate, durability, reuse.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais técnicas para retiradas dos blocos	32
Figura 2 - (a) Tear tradicional e (b) tear multifios.....	33
Figura 3 - Detalhe da aspersão da polpa abrasiva sobre o bloco durante o corte em um tear tradicional	33
Figura 4 - Detalhe do fio diamantado.....	34
Figura 5 - Tanques de sedimentação.....	34
Figura 6 - Filtro prensa.....	35
Figura 7 - Processo de polimento das chapas	35
Figura 8 - Esquema do processo do beneficiamento das rochas	36
Figura 9 - Microscopia eletrônica de varredura do resíduo ampliada 5000 vezes (a) e 10000 vezes (b).....	43
Figura 10 - Microscopia eletrônica de varredura de partículas do resíduo.....	43
Figura 11 – Microscopia eletrônica de varredura dos concretos aos 28 dias	50
Figura 12 - Microscopia eletrônica de varredura de argamassas referência (a) e argamassa com incorporação de resíduo (b), ampliadas em 500 vezes.....	51
Figura 13 - Inter-relacionamento entre conceitos de durabilidade e desempenho	55
Figura 14 – Porosidade x permeabilidade	58
Figura 15 – Nucleação de um grão de cimento coberto por etringita	61
Figura 16 – Estrutura molecular do so_4^{-2}	62
Figura 17 – Gráficos da redução da resistência à compressão.....	69
Figura 18 – Programa experimental - geral	77
Figura 19 - Curva granulométrica do agregado graúdo de acordo com a nbr nm 248 (abnt, 2003)	80
Figura 20 - Curva de distribuição granulométrica do cpv ari.....	82
Figura 21 - Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura das partículas do cpv ari	83
Figura 22 - Curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo – nbr nm 248 (abnt, 2003)	84
Figura 23 - Processo de preparação do resíduo para aplicação na pesquisa	85
Figura 24 - Processo de secagem do resíduo	85
Figura 25 - Aparência final do resíduo utilizado na pesquisa	86

Figura 26 - Programa experimental – caracterização do resíduo.....	86
Figura 27 - Ensaio de massa específica (a), finura por meio da peneira nº 325 (b) e método da permeabilidade de blaine (c).	87
Figura 28 - Ensaio de difração de raios x (a) difratômetro e (b) computador com software.	89
Figura 29 - Microscópio eletrônico de varredura	89
Figura 30 – Diagrama de dosagem	92
Figura 31 - Preparação do concreto na betoneira	93
Figura 32 - Concretos moldados e cobertos nas formas cilíndricas	94
Figura 33 - Corpos de prova imersos em solução de água saturada com cal.....	94
Figura 34 - Ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone	94
Figura 35 - Prensa utilizada para o ensaio de resistência à compressão axial	95
Figura 36 - Retífica utilizada para regularização dos corpos de prova	96
Figura 37 - Ensaio de absorção de água por imersão	96
Figura 38 - Ensaio de absorção de água por capilaridade	97
Figura 39 - Sulfato de magnésio utilizado no ensaio	98
Figura 40 - Corpos de prova imersos em solução de sulfato de magnésio	98
Figura 41 - Corpos de prova em estufa ventilada	98
Figura 42 - Microscópio eletrônico de varredura	100
Figura 43 - Curva de distribuição granulométrica (acumulada) do rbro	105
Figura 44 - Difratograma de raios x do rbro	107
Figura 45 - Micrografia do rbro – ampliação de 1000 vezes.	107
Figura 46 - Pontos e região analisados no eds para o rbro	108
Figura 47 – Gráfico dos valores médios da absorção de água por capilaridade às 72 horas	113
Figura 48 - Ascensão capilar nos corpos de prova após 72 horas	113
Figura 49 – Evolução da absorção de água por capilaridade ao longo do tempo em função do percentual de adição de rbro.....	115
Figura 50 – Efeito da interação entre os fatores teor de adição de rbro e relação a/c sobre a absorção de água por imersão.....	117

Figura 51 - Resistência à compressão axial	119
Figura 52 - Efeito isolado do teor de adição de rbro sobre a resistência à compressão axial	120
Figura 53 - Efeito isolado da relação a/c sobre a resistência á compressão axial	121
Figura 54 - Efeito da interação entre os fatores teor de adição de rbro e relação a/c sobre a resistência à compressão axial.....	122
Figura 55 - Resistência à compressão axial após agressão	124
Figura 56 - Efeito da interação entre os fatores adição de rbro e relação a/c sobre a resistência à compressão axial.....	126
Figura 57 - Efeito da interação entre os fatores teor de adição de rbro e relação a/c sobre a resistência à compressão axial do grupo agredido e do não agredido	127
Figura 58 - Aspecto dos corpos de prova de concreto após os ciclos de imersão e secagem	128
Figura 59 - Imagem obtida por mev do CREF 45	130
Figura 60 - Imagem obtida por mev do CR5 45	131
Figura 61 - Imagem obtida por mev do CR5 45 após agressão	131
Figura 62 - Pontos de análise do EDS	132
Figura 63 – EDS do ponto 1 marcado na pasta cimentícia de traço CR5 45 antes do ataque (a).....	132
Figura 64 – EDS do ponto 2 marcado na pasta de cimentícia de traço CR5 45 após ataque (b).....	133
Figura 65 - Imagem obtida por mev do CR5 55	134
Figura 66 - Imagem obtida por mev do CR10 55	134
Figura 67 - Pontos de análise do eds no CR5 55.....	135
Figura 68 - Região de análise do eds no CR5 55 após ataque	135
Figura 69 - EDS do ponto 2 marcado na pasta cimentícia CR5 55 antes do ataque	136
Figura 70 - EDS da região 1 marcada na pasta cimentícia CR5 55 após ataque	136
Figura 71 - Imagem obtida por MEV do CR15 65 (ampliação 10000x) antes da agressão	137
Figura 72 - Imagem obtida por MEV do CR15 65 com marcações de pontos para análise de EDS antes da agressão	138
Figura 73 - Imagem obtida por MEV do CR15 65 após ataque com marcação da área de análise de EDS	138
Figura 74 – EDS do ponto 2 marcado na pasta cimentícia CR15 65 antes do ataque	139
Figura 75 - EDS da região 1 marcada na pasta cimentícia CR15 65 após ataque	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 2 - Finura e tamanho das partículas.....	42
Tabela 3 - Composição química de diferentes tipos de resíduos	44
Tabela 4 - Características dos principais tipos de sais selenitosos	63
Tabela 5 - Classificação da agressividade do meio, em função da concentração de sulfato, adotada por algumas instituições internacionais	64
Tabela 6 – Resumo do programa experimental realizado nos concretos	78
Tabela 7 - Caracterização do agregado graúdo	80
Tabela 8 - Caracterização do cimento cpv ari.....	81
Tabela 9 - Propriedades físicas do agregado miúdo utilizado	84
Tabela 10 - Métodos de ensaios para caracterização física do resíduo	87
Tabela 11 - Nomenclatura dos traços unitários moldados de acordo com os percentuais de adição de resíduo e a relação a/c.....	92
Tabela 12 - Caracterização física do RBRO	104
Tabela 13 - Caracterização química do RBRO.....	105
Tabela 14 - Resultado da análise química do EDS para o RBRO	108
Tabela 15 - Resultados do ensaio de pozolanicidade com cal e com cimento para o RBRO.....	109
Tabela 16 - Resultados das consistências determinadas pelo método de abatimento de tronco de cone para os concretos frescos	110
Tabela 17 - Valores médios da massa específica para os concretos frescos	111
Tabela 18 - Valores médios de absorção de água por capilaridade dos concretos às 72 horas.....	112
Tabela 19 - Análise de variância do efeito da adição do rbro e da relação a/c sobre a absorção de água por capilaridade às 72 horas	115
Tabela 20 - Valores médios da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica	116
Tabela 21 - Análise de variância do efeito do teor de adição do rbro e da relação água cimento sobre a absorção de água por imersão	117
Tabela 22 - Resultados dos valores médios de resistência à compressão axial	118
Tabela 23 - Análise de variância do efeito do teor de adição de resíduo e a relação a/c sobre a resistência à compressão axial.....	119
Tabela 24 - Resultados dos valores médios de resistência à compressão após agressão	123

Tabela 25 - Resultados dos valores médios de resistência à compressão axial 125

Tabela 26 - Análise de variância do efeito da adição do rbro e da relação a/c sobre a resistência à compressão axial 126

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
1.1 OBJETIVO	24
1.1.1 Objetivo geral	24
1.1.2 Objetivos específicos	24
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	25
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
2.1 RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS	29
2.1.1 Panorama Geral do Setor de Rochas Ornamentais	29
2.1.2 Processo do beneficiamento de rochas ornamentais e obtenção do resíduo usado neste estudo	31
2.1.3 Classificação do Resíduo	37
2.2 ESTUDOS DA APLICAÇÃO DO RBRO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS	39
2.2.1 Características Gerais	41
2.2.2 Influência no estado fresco	45
2.2.3 Influência no estado endurecido	46
2.2.3.1 Resistência à compressão axial	46
2.2.3.2 Durabilidade	48
2.2.3.3 Absorção de água	48
2.2.3.4 Microestrutura	49
2.2.4 Considerações sobre a influência da aplicação do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais em matrizes cimentícias	51
2.3 ASPECTOS GERAIS SOBRE DURABILIDADE DO CONCRETO	52
2.3.1 Considerações iniciais	52
2.3.2 Conceitos sobre durabilidade do concreto	53
2.3.3 Aspectos que influenciam a durabilidade do concreto	56
2.3.3.1 Permeabilidade e difusão	57
2.3.3.2 Adições minerais e o efeito fíler	59
2.4 DEGRADAÇÃO DO CONCRETO DEVIDO À AÇÃO DE SULFATOS.....	62

2.4.1	Considerações Iniciais	62
2.4.2	Tipos de sulfato e grau de agressividade	62
2.4.3	Determinação da resistência ao ataque por sulfatos	67
2.4.4	Ataque de sulfato em materiais cimentícios contendo fíler.....	69
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS.....	73
3.1	PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS	74
3.1.1	Variáveis Dependentes	75
3.1.2	Variáveis Independentes.....	75
3.1.3	Variáveis de Controle	75
3.2	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	76
3.3	MATERIAIS.....	79
3.3.1	Agregado Graúdo	79
3.3.2	Cimento	80
3.3.3	Agregado Miúdo	83
3.3.4	Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais.....	84
3.4	MÉTODOS.....	90
3.4.1	Estudo de dosagem e preparo dos concretos	90
3.4.1.1	Ajuste do teor ideal de argamassa	91
3.4.1.2	Mistura dos materiais e moldagem dos corpos de prova...	93
3.4.2	Ensaio no estado fresco	94
3.4.3	Ensaio no estado endurecido.....	95
3.4.3.1	Resistência à compressão axial	95
3.4.3.2	Absorção de água por imersão	96
3.4.3.3	Absorção de água por capilaridade	97
3.4.4	Ensaio de agressão por sulfato de magnésio.....	97
3.4.5	Análise microestrutural.....	99
3.4.6	Análise estatística	101
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	103
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS (RBRO).....	104

4.1.1	Caracterização física	104
4.1.2	Caracterização química.....	105
4.1.3	Caracterização mineralógica	106
4.1.4	Análise microestrutural.....	107
4.1.5	Índice de atividade pozolânica	108
4.2	ANÁLISE DOS ENSAIOS REALIZADOS NO CONCRETO	109
4.2.1	Avaliação das propriedades do concreto no estado fresco	109
4.2.1.1	Análise da consistência pelo abatimento de tronco de cone 109	
4.2.1.2	Determinação da massa específica	110
4.2.2	Avaliação das propriedades do concreto no estado endurecido..	111
4.2.2.1	Grupo de controle (sem ataque de sulfato)	112
4.2.2.1.1	Absorção de água por capilaridade	112
4.2.2.1.2	Absorção de água por imersão.....	116
4.2.2.1.3	Resistência à compressão axial	118
4.2.2.2	Análise dos concretos com ataque de sulfatos.....	122
4.2.2.2.1	Resistência à compressão axial	123
4.2.3	Análise Microestrutural dos concretos	129
5	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	142
5.1	CONCLUSÃO GERAL	143
5.2	CONCLUSÕES ESPECÍFICAS	143
5.2.1	Quanto à caracterização do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais	143
5.2.2	Conclusões relativas ao concreto no estado fresco	144
5.2.3	Conclusões relativas ao concreto no estado endurecido	144
5.3	SUGESTÕES PARA FUTUROS ESTUDOS.....	145
	REFERÊNCIAS NORMATIVAS	148
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	151

Capítulo 1

Introdução

1. Introdução

A importância de se discutir e refletir sobre os limites suportáveis do planeta Terra e a situação do meio ambiente vem acontecendo ao longo das últimas quatro décadas. Os altos níveis de poluição, a crescente quantidade de produção de resíduos e a elevada utilização de recursos naturais, são alguns exemplos que nos alertam para essa discussão.

Diante desse panorama, espera-se que o desenvolvimento de novos materiais e processos construtivos esteja não somente ligado a aspectos econômicos, mas também a aspectos ambientais e sociais, baseando-se no desenvolvimento sustentável e em modelos cíclicos de produção e consumo, nos quais os produtos possam voltar para as fases iniciais de produção após a sua vida útil ou, no caso dos resíduos, serem reaproveitados antes do seu descarte. Assim, todos os

recursos empregados são otimizados e a geração de resíduos é reduzida a um mínimo reciclável (JOHN e AGOPYAN, 2000).

Sendo a indústria da construção civil um dos maiores e mais importantes setores econômicos no mundo, sua participação no consumo de matérias-primas é elevada, além de gerar quantidades significativas de resíduos. Entretanto, devido a grande variedade de produtos gerados, a construção civil também é uma grande absorvedora dos seus próprios resíduos como também de resíduos de outros setores industriais.

Exemplo disso é a evolução das pesquisas no sentido de utilizar tais resíduos na construção civil, que com uma nova aplicação, passam a ser denominados de subprodutos. É o caso das escórias de alto forno, a sílica ativa e as cinzas volantes, que atualmente são adicionadas aos materiais com matrizes cimentantes, tornando-os menos impactantes ao meio ambiente. Dessa forma, muda-se a destinação final de tais materiais, evitando deposição em aterros e minimizando os impactos ambientais.

Dentre os resíduos gerados na cadeia produtiva estão aqueles provenientes da produção de rochas ornamentais. Destaca-se aqui, o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais gerado no processo de corte dos blocos em chapas. Durante esse processo, 25% a 30% do volume do bloco (GONÇALVES, 2000; CAVALCANTI, 2006) sofre desgaste, transformando-se em um pó de pedra que, misturado com a água e outros componentes, torna-se uma lama acinzentada, também denominada de lama abrasiva. No caso da lama abrasiva várias pesquisas são realizadas com o intuito de aplicá-la na construção civil.

O setor de rochas é considerado uma das mais importantes áreas emergentes de negócios minero-indústrias, e o Brasil participa com cerca de 5% da produção e 6% do volume mundial de exportação de blocos de rochas ornamentais. Dentre os estados brasileiros destaca-se o Espírito Santo como o principal produtor, com 47% do total nacional, tendo o Porto de Vitória como o maior responsável pelas exportações nacionais de rochas, com uma participação de 58% do total exportado (ABIROCHAS, 2009).

No Brasil o desdobramento dos blocos de rochas em placas acontece principalmente através de teares. O país possui um parque de beneficiamento operando com mais de 1600 teares, totalizando uma capacidade de serragem, estimada, em 40 milhões de m²/ano (ABIROCHAS, 2009).

A elevada produção nacional gera, conseqüentemente, grandes quantidades de resíduos, que ocorrem desde a extração do bloco nas jazidas até o polimento das placas e colocação das peças acabadas. O resíduo produzido durante a etapa do beneficiamento fica armazenado nos pátios das serrarias e depois é descartado em aterros, provocando impactos ambientais, como a poluição atmosférica, do solo, além da poluição visual e estética. Estima-se que, por ano, é gerada cerca de 1,8 milhão de tonelada deste resíduo no Brasil (REIS, 2008).

Diante do exposto, buscar alternativas para minimizar os impactos ambientais e os elevados custos com aterros se faz necessário, sendo a indústria da construção civil uma importante contribuidora, já que consome grandes quantidades de matérias-primas e absorve resíduos de outros setores industriais.

Estudos já foram feitos visando à utilização de tais resíduos na indústria da construção civil. Os restos de rocha, por exemplo, podem passar por um processo de britagem transformando-se em pó de pedra e agregados, que por sua vez podem ser aplicados em diversas áreas industriais (RIBEIRO e ARRUDA, 2003). O resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) vem sendo amplamente estudado para diversas aplicações também em materiais de construção, como em matrizes cimentícias, cerâmicas, matrizes betuminosas, entre outros.

Em matrizes cimentícias, o RBRO atua com eficiência como adição mineral em concreto (GONÇALVES, MOURA e DAL MOLIN, 2002), em blocos de concreto para pavimentação (GENCEL *et al.*, 2012) e em concreto auto-adensável (CALMON *et al.*, 2005) e também como substituição de cimento em peças pré-moldadas com teares limitados conforme resistência necessária (MOURA *et al.*, 2007). Há também a possibilidade de substituição parcial do clínquer na fabricação de cimento (ARUNTAS *et al.*, 2010; GOBBO e MELLO, 2005) e em cimento composto associado à escória de aciaria (ARRIVABENE, 2012).

O resíduo também possui resultados positivos em argamassas de assentamento, substituindo parcialmente a cal (MENEZES *et al.*, 2009) e em argamassas coloridas, tendo o resíduo atuando como filer e corante após queima (MÁRMOL *et al.*, 2010). No entanto, diante das aplicações, em teores maiores que 20% de substituição de cimento Portland por resíduo ocorre uma queda significativa na resistência mecânica (JAIN, 2012).

Em matrizes cerâmicas, pesquisas confirmam a possibilidade de incorporação do RBRO em cerâmica vermelha (SEGADÃES, CARVALHO e ACCHAR, 2005; ACCHAR, VIEIRA e HOTZA, 2006), para a produção de telhas (TORRES *et al.*, 2008) e de tijolos (ELICHE-QUESADA *et al.*, 2012; BILGIN *et al.*, 2013) devido ao seu efeito positivo na redução da absorção de água. A utilização do resíduo é viável tecnicamente na produção de concreto betuminoso, atuando como um filer (KARASBAHIN e TERZI, 2007; RUBIO *et al.*, 2010; AKBULUT *et al.*, 2012) ou como um substituto de agregados naturais (MORENO, RUBIO e ECHEVARRIA, 2011).

No entanto, a maioria das pesquisas voltadas à utilização do RBRO incorporada à matrizes cimentícias está direcionada para o estudo das propriedades mecânicas do mesmo, sendo que as propriedades relacionadas à durabilidade devem ser igualmente avaliadas. Aspectos para produção de concretos duráveis são abordados a luz de requisitos da NBR 6118 (ABNT, 2014), que devem ser atendidos. Além disso, os altos custos com manutenção, a preocupação com a sustentabilidade e a conservação dos recursos naturais, exigem a produção de materiais mais duráveis.

Para tanto, o uso de adições minerais em matrizes cimentícias torna-se uma solução eficiente no incremento das propriedades relacionadas com a durabilidade uma vez que esses materiais agem como preenchedores de vazios, diminuindo com isso a permeabilidade da pasta, alterando sua microestrutura e influenciando beneficentemente na durabilidade do material (SILVEIRA, 1996).

Visando contribuir com o tema, este trabalho busca fazer a incorporação do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais ao ciclo produtivo do concreto, reduzindo custos com descarte e aterros, colaborando com o meio ambiente, abrindo novas oportunidades de negócios e contribuindo para a aquisição de conhecimento tecnológico para a produção de concretos mais duráveis. Não pretende-se com este

trabalho solucionar todas as dúvidas referentes ao assunto, mas contribuir para o avanço do conhecimento na área

1.1 Objetivo

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é investigar a influência da incorporação de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais sobre propriedades ligadas à durabilidade do concreto, em especial aquelas relacionadas com a resistência à agentes agressivos externos do tipo íons sulfato.

1.1.2 Objetivos específicos

Para o atendimento do objetivo geral, devem ser alcançados os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar o resíduo utilizado para análise de suas características físicas, químicas, mineralógica, microestrutural e seu índice de atividade pozolânica.
- Avaliar a influência dos diferentes teores de incorporação do resíduo nas propriedades do concreto fresco produzidos com diferentes relações água/cimento, através do ensaio de abatimento do tronco de cone (ABNT NBR NM 67:1998).
- Avaliar a influência dos diferentes teores de incorporação do resíduo sobre o estado fresco de concretos produzidos com diferentes relações água/cimento, através do ensaio de massa específica (ABNT NBR 9833:2009).
- Analisar a correlação existente entre as diferentes relações água/cimento e os diferentes percentuais de incorporação de resíduo na resistência à compressão axial (ABNT NBR 5739:2007) do concreto.
- Avaliar a influência dos diferentes teores de incorporação do resíduo na resistência à compressão axial (ABNT NBR 5739:2007) de concretos produzidos com diferentes relações água/cimento, após sofrerem ataques de sulfatos.

- Avaliar a influência dos diferentes teores de incorporação do resíduo nos aspectos microestruturais de concretos produzidos com diferentes relações água/cimento, através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

1.2 Estrutura do trabalho

Esta dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos, além das referências bibliográficas. A seguir é apresentada uma breve descrição do conteúdo de cada capítulo.

O capítulo 1 é introdutório e nele foram abordados a justificativa e a importância do tema escolhido para a pesquisa. Além disso, são apresentados os objetivos geral e específicos da pesquisa e a estrutura do trabalho.

O capítulo 2 é voltado para a revisão bibliográfica apresentando o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais, sua produção, suas características bem como os resultados alcançados por algumas pesquisas já realizadas utilizando este resíduo em matrizes cimentícias. Além disso, são abordados aspectos importantes sobre durabilidade, e considerações fundamentais a respeito da ação dos íons sulfatos de magnésio em concretos.

O capítulo 3 explica a metodologia do programa experimental, descrevendo as variáveis envolvidas na pesquisa, os materiais empregados e sua caracterização, incluindo o método de preparo do resíduo para torná-lo apto à aplicação neste estudo. Também constam neste capítulo as dosagens e os teores de substituição adotados para os concretos estudados, além do método de moldagem dos corpos de prova, dos ensaios em estado fresco e endurecido, e da obtenção das imagens para análise microestrutural.

No capítulo 4 são apresentados os resultados dos ensaios descritos no programa experimental e analisados estatisticamente. Também é apresentada a análise microestrutural dos concretos que ajudam a explicar e corroborar alguns destes resultados.

No capítulo 5 estão descritas as principais conclusões obtidas através das observações, resultados e análises feitas ao longo deste estudo. Além de algumas

sugestões para trabalhos futuros de pesquisa nessa área a partir das lacunas encontradas durante esta pesquisa.

Por fim, são relacionadas as referências normativas e bibliográficas que auxiliaram na elaboração deste trabalho.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2. Revisão Bibliográfica

No capítulo anterior foram apresentados os objetos e justificativas dessa pesquisa além de sua estrutura para entendimento do processo realizado. Neste capítulo será apresentada a revisão bibliográfica que dará embasamento teórico ao projeto desenvolvido.

Primeiramente será apresentado o resíduo a ser utilizado, seu processo de produção e os resultados pertinentes de estudos da sua aplicação em matrizes cimentícias. Em seguida será apresentado os principais conceitos sobre durabilidade do concreto, os aspectos envolvidos à esse tema. Por fim, será discutido o comportamento do concreto frente à ação dos sulfatos de magnésio.

2.1 Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais

2.1.1 Panorama Geral do Setor de Rochas Ornamentais

As rochas ornamentais, também denominadas de rochas lapídeas, rochas dimensionais, materiais de cantaria ou pedras naturais, constituem os materiais geológicos que são extraídos da natureza em forma de blocos ou chapas, cortados em diversas formas e beneficiadas através dos processos de desdobramento, polimento, corte e acabamento. Na construção civil são usadas como revestimentos internos e externos de paredes, pisos, pilares, soleiras, além de serem amplamente usadas para confecção de bancadas, balcões, tampos, etc.

Comercialmente as rochas ornamentais são basicamente subdivididas em granitos e mármore. Genericamente enquadram-se como granitos as rochas silicáticas enquanto que os mármore englobam as rochas carbonáticas. Além dessas, outros tipos litológicos são importantes para o setor, como os quartzitos, serpentinitos, travertinos e ardósias.

O setor de rochas é considerado uma das mais importantes áreas emergentes de negócios minero-industriais. Conforme os dados técnicos do Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2009) as décadas de 1980 e 1990 foram consideradas como a “nova idade da pedra” devido ao notável crescimento do intercâmbio mundial de rochas. A produção no mundo evoluiu de 1,8 milhão t/ano na década de 1920 para um patamar de 100 milhões t/ano em 2007 (BRASIL, 2009).

A década de 2000 foi marcada pela expansão das feiras setoriais internacionais, pela modernização das tecnologias de lavra, beneficiamento e acabamento, pela diversificação dos produtos comerciais e da cartela de rochas comercializadas, pelo crescente consumo no mercado dos Estados Unidos da América e pela notável expansão chinesa no mercado internacional.

Ao longo da década de 2000, cresceu significativamente a produção de rochas ornamentais em países como a China, Índia, Irã, Turquia e Brasil, enquanto permaneceu inalterada, ou até com leve declínio, a produção nos países europeus tradicionais, como a Itália, Espanha, Portugal e Grécia. O crescimento mais expressivo foi da China, cuja produção evoluiu de 14 milhões de toneladas em 2002, para 26,5 milhões toneladas em 2007. Em decorrência da crise do mercado

imobiliário dos EUA e da economia mundial, a produção de rochas ornamentais em 2008 se estabilizou, recuando ligeiramente e mantendo essa tendência de queda em 2009 (BRASIL, 2009).

No ano de 2011, a produção mundial de rochas ornamentais somou quase 120 milhões de toneladas, com transações comerciais internacionais de aproximadamente US\$ 20 bilhões e 50 milhões de toneladas. Neste mesmo ano o Brasil colocou-se como o 4º maior produtor e 7º exportador mundial de rochas ornamentais, em volume físico; como 3º maior exportador de blocos de granito e de produtos de ardósia; como 5º maior exportador de rochas processadas especiais, na forma de chapas; e como 8º exportador de rochas processadas simples, com produtos de quartzito foliado (ABIROCHAS, 2013).

No Brasil, os estudos realizados pelo Instituto Metas (2002) para o Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT indicam a existência de 18 aglomerações produtivas relacionadas ao setor de rochas ornamentais, envolvendo atividades de lavra em 10 estados e 80 municípios. Mais amplamente, foram registrados 370 municípios com recolhimento da CFEM – Compensação Financeira pela Exploração Mineral –, para extração de rochas ornamentais. Até o ano de 2007, existiam, em média, 1.500 frentes ativas de lavra, sempre a céu aberto e em maciço ou matacões, responsáveis por cerca de 1.000 variedades comerciais de rochas colocadas nos mercados interno e externo.

Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (ABIROCHAS, 2013), mais de 60% da produção de granitos, mármore, travertinos e materiais afins está concentrada na Região Sudeste, principalmente no Espírito Santo e Minas Gerais.

Os primeiros relatos sobre as unidades produtivas do setor de mármore e granito no Estado do Espírito Santo datam da década de 1930, sendo que foram consolidadas apenas na década de 1960 (COELHO e VIDAL, 2006). Segundo Furtado (2009) as empresas de rochas ornamentais são uma das mais representativas e importantes da economia do Estado, já que sua atividade reflete também sobre a indústria mecânica e o comércio exterior. A produção de rochas ornamentais encontra-se de forma disseminada por todo o Estado, mas a grande concentração da atividade

acontece na região sul, mais especificamente no entorno do município de Cachoeiro do Itapemirim.

O Espírito Santo exporta chapas polidas e blocos de rochas, sendo que em 2008 as exportações somaram US\$ 630,3 milhões, o que corresponde à comercialização de 1,12 milhão de tonelada, respondendo por 66% do faturamento e 56,5% do volume físico total brasileiro. Além de liderar as exportações setoriais, o setor de rochas corresponde há mais de 85% do faturamento das exportações do estado (BRASIL, 2009).

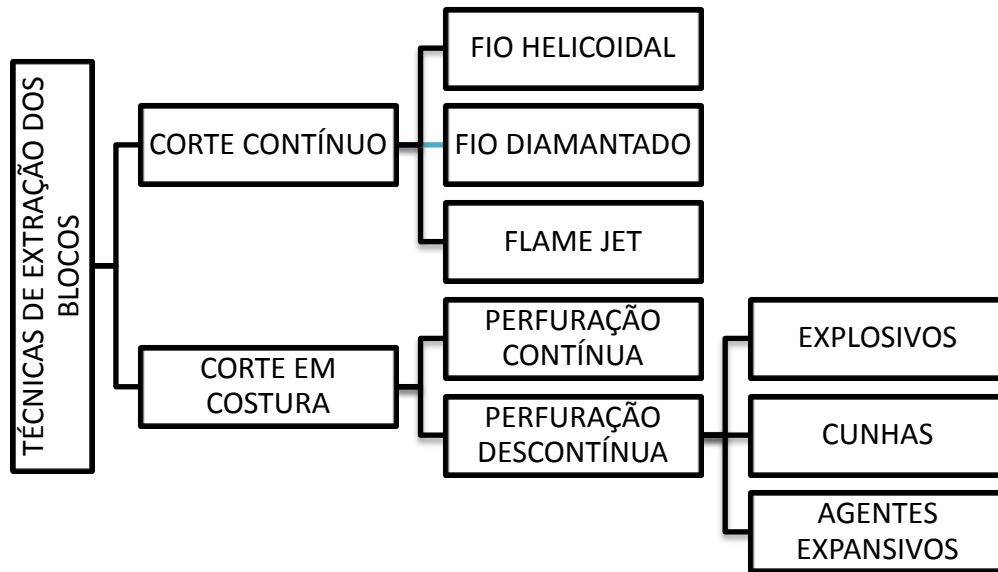
Diante desses dados, constata-se a importância do setor de rochas ornamentais na economia do país e do estado do Espírito Santo. Logo, é de grande importância a preocupação com pesquisas e estudos que visam à sustentabilidade do setor, sobretudo no aspecto ambiental, como a melhoria nos índices de aproveitamento dos rejeitos da lavra e do beneficiamento.

2.1.2 Processo do beneficiamento de rochas ornamentais e obtenção do resíduo usado neste estudo

O processo de desdobramento dos blocos de rochas ornamentais acontece por etapas. De acordo com Gonçalves (2000) a primeira delas é a pesquisa e definição dos locais de extração dos blocos, que envolve um estudo geológico da área a ser explorada, identificação dos afloramentos rochosos além das documentações necessárias para explorar a área, exigidas pelos órgãos competentes.

Após a definição do local inicia-se a retirada dos blocos, essa etapa envolve diferentes técnicas, que podem ser divididas em duas grandes categorias, as tecnologias de corte contínuo e as tecnologias de corte em costura. Essas, por sua vez, são subdivididas em diferentes outras técnicas, as mais usadas de acordo com Regadas (2006) e Menezes (2005), estão representadas na Figura 1.

Figura 1 - Principais técnicas para retiradas dos blocos



Fonte: produção da autora

Já nesta etapa de extração dos blocos é gerado o resíduo de lavra que são pedaços de rochas que não foram aproveitados ou rochas que fissuraram (GONÇALVES, 2000). Os blocos, então, são cortados em formatos retangulares com volume variando entre 5 a 10 m³ e transportados até as beneficiadoras.

O desdobramento do bloco em chapas é feito através de equipamentos denominados teares, que podem ser convencionais ou multifios (Figura 2). Os teares convencionais fazem o corte do bloco através de lâminas metálicas com o auxílio da polpa abrasiva (lama abrasiva). A polpa abrasiva é uma mistura de água, pó de rocha, granalha de ferro e cal que é aspergida sobre os blocos durante o processo de corte e serve para lubrificar e resfriar as lâminas, evitar a sua oxidação, limpar os canais entre as chapas e servir como um abrasivo para facilitar o corte (Figura 3).

Figura 2 - (a) Tear tradicional e (b) tear multifios

Fonte: Barros *et al.*, 2006

Figura 3 - Detalhe da aspersão da polpa abrasiva sobre o bloco durante o corte em um tear tradicional

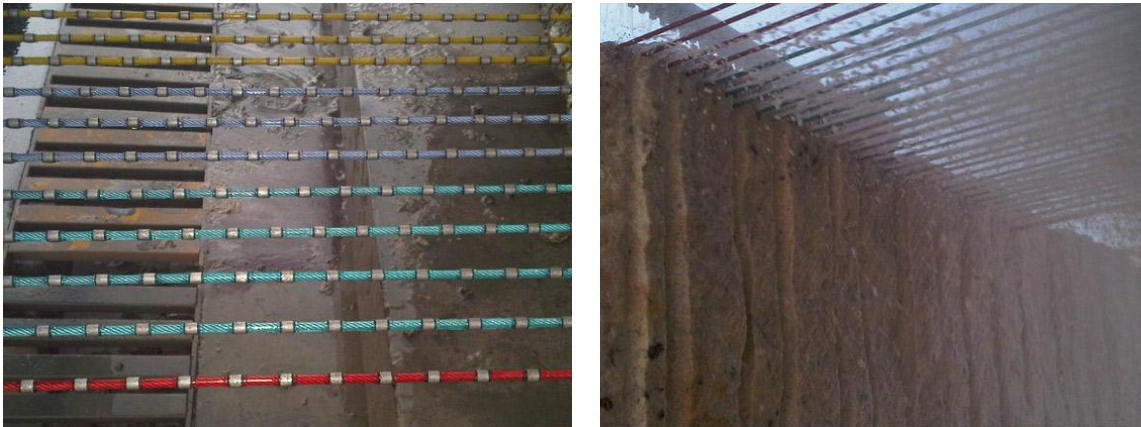


Fonte: Produção da autora

À medida que o bloco vai sendo cortado, a lama abrasiva tem a sua viscosidade aumentada devido ao teor maior de finos. Para não comprometer a abrasão no corte é acrescida à lama mais água e, se necessário, mais cal para garantir a viscosidade adequada. Quando não é mais possível equilibrar a viscosidade a lama é então descartada.

Os teares multifios, por sua vez, fazem o corte dos blocos através de fios diamantados (Figura 4). Com esse tipo de tear é usado apenas água para resfriar e lubrificar os fios e o resíduo gerado nesse tipo de equipamento é uma mistura dessa água e pó de rocha proveniente do desgaste do bloco durante o seu processo de corte. Essa lama, diferente do que ocorre no tear tradicional, é descartada sem retornar ao processo de corte.

Figura 4 - Detalhe do fio diamantado



Fonte: Guidoni, 2010

Quando a lama é descartada a mesma é encaminhada a lagoas ou tanques de sedimentação (Figura 5) em que a água é reaproveitada e o material sólido é enviado para aterros. Em algumas empresas, a parte sólida antes de ser descartada, ainda passa por equipamento denominado filtro prensa (Figura 6) que tem como finalidade diminuir o teor de umidade do material para maior reaproveitamento da água.

Figura 5 - Tanques de Sedimentação



Fonte: Produção da autora

Figura 6 - Filtro prensa



Fonte: produção da autora

Após o desdobramento dos blocos ocorre o processo de beneficiamento secundário das rochas, que consiste no polimento e lustro das placas, reduzindo a rugosidade da superfície serrada, imprimindo brilho à chapa. Esse polimento ocorre através de um equipamento denominado politriz e neste processo também é gerado um resíduo, em quantidade menor, constituído de água, pó de pedra, resinas e materiais provenientes do desgaste das sapatas de polimento (Figura 7). Este resíduo também é descartado e lançado nos tanques de sedimentação no qual é misturado com a lama proveniente do corte dos blocos, passando pelos mesmos processos citados anteriormente.

Figura 7 - Processo de polimento das chapas

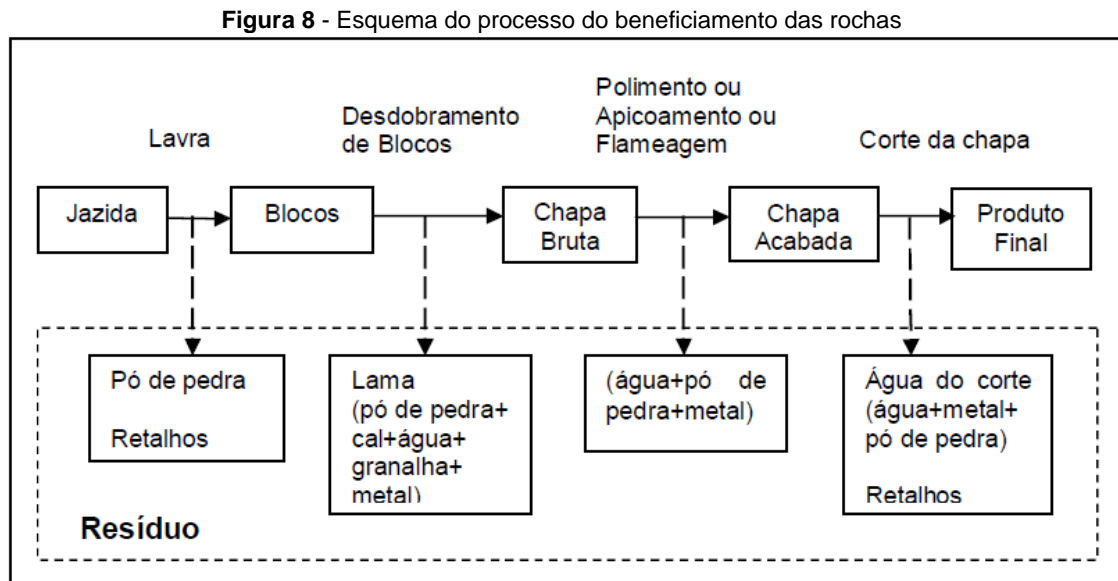


Fonte: produção da autora

Vale ressaltar que, tanto a estocagem do resíduo nos pátios das empresas quanto o transporte e disposição final em aterros industriais, geram custos consideráveis. Além disso, conforme destaca Reis (2008), as indústrias de beneficiamento de

rochas ornamentais são consideradas pelos ambientalistas como fontes de contaminação e poluição do meio ambiente devido ao grande volume de resíduo gerado e ao descarte do mesmo que, em muitos casos, acontece diretamente nos ecossistemas.

A Figura 8 mostra esquematicamente o processo de beneficiamento de rochas ornamentais e o tipo de resíduo gerado em cada etapa.



Fonte: Gomes, Lameiras e Rocha, 2004 apud Reis, 2008

De acordo com Binici, Kaplan e Yilmaz (2007), durante o processo de corte do bloco cerca de 25% do seu volume resulta em pó. Para Braga *et al.* (2010) esse valor pode chegar a aproximadamente 1/3 (um terço) em peso seco ou 2/3 (dois terços) em peso úmido do bloco. Estima-se que no Brasil são geradas cerca de 1.600.000 ton/ano da lama do beneficiamento (MOURA *et al.*, 2006). Calmon (2010) considera que no estado do Espírito Santo, maior produtor nacional, esse valor chegue a 60.000 toneladas por mês.

Quando a lama abrasiva não é enviada para aterros, a mesma é descartada inadequadamente, o que afeta esteticamente a paisagem, além de acarretar em custos de armazenamento e aumento da poluição ambiental. Além disso, no caso da lama ser depositada diretamente em rios, acarreta a poluição das águas e conseqüentemente impactos ambientais como o comprometimento da sobrevivência animal e vegetal, além do assoreamento do rio (MOURA e LEITE, 2011).

De acordo com Cerqueira e Prezotti (2006), na cidade de Verona (Itália) é gerado cerca de 550.000 ton/ano da lama sendo que 100.000 ton/ano são encaminhadas às indústrias de cimento, 30.000 ton/ano para termoelétricas e 40.000 ton/ano são utilizadas para sub-base asfáltica. Esse reaproveitamento do resíduo diminui o uso dos aterros como destino final. Já na cidade de Carrara, também na Itália, 90% do resíduo que sai do filtro prensa é utilizado como matéria-prima em outras indústrias. A lama proveniente do mármore branco é usada para branqueamento de papel, a lama oriunda de outros mármore é encaminhada a indústrias de gesso, e lamas resultantes do corte de granitos é encaminhada a indústrias de cimento.

Segundo os autores, essa postura adotada pela Itália, quanto ao gerenciamento do resíduo, mostra a preocupação do país com o controle e destinação correta deste material. Eles destacam que esse aproveitamento é possível devido ao financiamento de cooperativas e dos custos ambientais, a escassez de recursos naturais, a rigorosa fiscalização para que se cumpram as normas, boa gestão do resíduo desde a fonte, normas claras e objetivas, um maior foco por parte dos órgãos competentes com a fiscalização e não apenas com a liberação do licenciamento e parceria com as universidades.

O grande potencial de utilização da lama é um fato evidente. Exemplo disso são os vários trabalhos desenvolvidos com esse material, que se iniciaram na década de 1990 por pesquisadores como Calmon, Tristão e Lordello (CALMON *et al.*, 1997 e 1998). No entanto, existe a necessidade de parcerias e maior interação entre os segmentos envolvidos, como o setor de rochas, os órgãos competentes, a população e as universidades.

2.1.3 Classificação do Resíduo

Através da NBR 10004 – Resíduos Sólidos – Classificação (ABNT, 2004) pode-se classificar os resíduos sólidos quanto aos seus riscos tanto ao meio ambiente quanto à saúde pública e assim gerenciá-los corretamente. Sendo a lama abrasiva um resíduo considerado sólido de origem industrial, a mesma se encaixa na classificação dessa norma.

De acordo com essa norma os resíduos sólidos dividem-se em dois grandes grupos:

- Resíduos Classe I – Perigosos
- Resíduo Classe II – Não perigosos

Os resíduos Classe II são subdivididos em dois outros grupos:

- Resíduo Classe II A – Não Inertes
- Resíduo Classe II B – Inertes

Conforme a norma, os resíduos Classe II A (não inertes) podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Já os resíduos Classe II B (inertes) são aqueles que não possuem constituintes que se solubilizam em água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, em concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água.

Baseado nesses aspectos o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais deve ser analisado com base em ensaios de lixiviação e solubilização, para sua correta classificação, pois, dependendo da composição da rocha e outros compostos usados no processo de polimento, a lama abrasiva pode ser classificada como Resíduo Classe II A - Não Inerte (MOURA *et al.*, 2006).

No entanto, nos trabalhos de Gonçalves (2000), Lopes *et al.* (2006), Manhães e Holanda (2008) e Santos *et al.* (2010) o resíduo de rochas ornamentais é classificado como sendo Resíduo Classe II A – Não Inerte, podendo ser utilizado como um subproduto da construção civil.

Para esse trabalho, os resultados do ensaio de lixiviação mostraram que no extrato lixiviado ocorreu a presença de arsênio, bário, cádmio, chumbo e prata, porém, as concentrações obtidas estão abaixo dos valores limites máximos estabelecidos no anexo F da norma NBR 10004 (ABNT, 2004). Assim sendo, está descartada a classificação do resíduo como sendo Classe I - Perigoso.

Para o ensaio de solubilização os resultados mostraram que o extrato solubilizado apresentou resultados dentro do limite estabelecido pelo anexo G da norma NBR 10004 (ABNT 2004). Portanto, o RBRO utilizado neste estudo é classificado como resíduos de Classe II A – Não Perigoso – Não Inerte.

2.2 Estudos da Aplicação do RBRO em matrizes cimentícias

A utilização do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais tem sido amplamente estudada para produção de diferentes produtos, não apenas concretos e argamassas, como também cimento, cerâmicas, asfalto (SOUZA, RODRIGUES e NETO, 2005; CONCEIÇÃO, CARANASSIOS e RIBEIRO, 2010; SILVA, 2011), compósitos poliméricos (RIBEIRO *et al.*, 2011), vidro (MARÇAL, 2011; RODRIGUES *et al.*, 2011), lã mineral (RODRIGUES, 2009) e até mesmo fertilizantes (OLIVEIRA, QUEIRÓZ e RIBEIRO, 2009; COSTA *et al.* 2010).

As primeiras publicações referentes ao uso desse resíduo iniciaram na década de 1990 sendo o Brasil um dos pioneiros neste estudo, com desenvolvimento de pesquisas no Espírito Santo e posteriormente no Rio Grande do Sul, Minas Gerais e depois se difundindo para outros Estados produtores de rochas. (ULIANA, 2014).

De acordo com o objetivo desse estudo, realizou-se um levantamento atual de importantes estudos com a aplicação do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) em matrizes cimentícias e os principais resultados encontrados em cada um deles. No Quadro 1 está apresentada uma sintetização dos últimos estudos publicados internacionalmente sobre este tema, separados conforme o tipo de aplicação.

Quadro 1 - Estudos da aplicação do resíduo de rochas ornamentais em matrizes cimentícias
(continua)

Autores	Publicação	Produto final da pesquisa
Concreto		
Calmon <i>et al.</i> (2005)	World Sustainable Building Conference, Tokyo	Concreto auto-adensável com RBRO como adição tipo fíler
Almeida <i>et al.</i> (2007)	Cement and Concrete Research	Concreto com substituição parcial de agregado miúdo por RBRO
Binici, Kaplan e Yilmaz (2007)	Scientific Research and Essay	Concreto com substituição parcial de agregado miúdo por resíduo de mármore
Almeida, Branco e Santos (2007)	Building and Environment	Concreto branco com substituição parcial de agregado miúdo por RBRO
Alyamaç e Ince (2009)	Construction and Building Materials	Concreto auto-adensável com resíduo de mármore de diferentes origens de rochas como adição tipo fíler
Alzboon e Mahasneh (2009)	International Journal of Civil and Environmental Engineering	Concreto com substituição parcial da água pela lama fluida do processo de corte de rochas
Topçu, Bilir e Uygunoglu (2009)	Construction and Building Materials	Concreto auto-adensável com substituição parcial de aglomerante (cimento+cinza volante) por resíduo de mármore

(conclusão)

Autores	Publicação	Produto final da pesquisa
Concreto		
Hameed e Sekar (2009)	Journal of Engineering and Applied Sciences	Concreto com substituição parcial de agregado miúdo por resíduo de mármore
Ambarish <i>et al.</i> (2011)	International Journal of Advanced Engineering Technology	Bloco de concreto com substituição de agregado miúdo por resíduo de granito
Gencil <i>et al.</i> (2012)	Journal of Cleaner Production	Bloco de concreto para pavimentação com substituição de agregado miúdo por resíduo de mármore
Argamassa		
Al-Akhras, Ababneh, Alaraji (2010)	Construction and Building Materials	Argamassa com substituição parcial de agregado miúdo por LBRO calcinado a 700°C
Colangelo, Marroccoli e Cioffi (2010)	International Union of Laboratories and Expert in Construction Materials, Systems and Structures (RILEM) – Proceedings pro	Argamassa de auto nivelamento com substituição parcial de agregado miúdo e cimento por resíduo de mármore
Corinaldesi, Moriconi e Naik (2010)	Construction and Building Materials	Argamassa com substituição parcial de agregado miúdo e cimento por resíduo de mármore
Mármol <i>et al.</i> (2010)	Cement and Concrete Composites	Argamassa de alvenaria coloridas com substituição parcial de cimento e material de enchimento por resíduo de granito
Uliana (2014)	Dissertação de Mestrado - UFES	Argamassa com substituição parcial de cimento pelo RBRO após tratamento térmico
Cimento		
Aruntas <i>et al.</i> (2010)	Materials and Design	Cimento com substituição de parte do clínquer por resíduo de mármore
Bdour e Al-Juhani (2013)	International Journal of Environment and Waste Management	Clínquer para produção do cimento com substituição parcial do calcário por resíduo de mármore

Fonte: produção da autora

Neste capítulo serão apresentadas, primeiramente, as principais características físicas e químicas do resíduo abordadas nos estudos levantados e, posteriormente, será discutida a influência desse material no estado fresco, no estado endurecido e nas propriedades relacionadas à durabilidade das matrizes cimentícias.

Vale ressaltar que cada autor adota uma nomenclatura para o resíduo estudado, como por exemplo: RCRO (resíduo do corte de rochas ornamentais), RCMG (resíduo do corte de mármore e granito), LBRO (lama do beneficiamento de rochas ornamentais), RBMG (resíduo do beneficiamento do mármore e granito), RCM (resíduo do corte de mármore), RCG (resíduo do corte de granito), RM (resíduo de mármore), RG (resíduo de granito), etc.

Neste capítulo optou-se em respeitar a nomenclatura usada por cada autor, sendo que a nomenclatura adotada neste trabalho será “resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais” (RBRO) que inclui tanto a lama proveniente do desdobramento de blocos de rochas em chapas nos teares multifios, quanto o resíduo do polimento dessas chapas.

2.2.1 Características Gerais

Nos trabalhos estudados o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais foi utilizado como uma adição mineral na matriz cimentícia, ora sendo usado como um substituto parcial do agregado miúdo ou do clínquer para produção de cimento, e em outras pesquisas como um material de enchimento (fíler), ou até mesmo substituindo parcialmente o cimento ou a água.

É importante destacar que em cada trabalho foi utilizado o resíduo de diferentes tipos de rochas, em alguns casos foi utilizado a lama apenas do corte de mármore (GENCEL *et al.*, 2012; ALYAMAÇ e INCE, 2009; TOPÇU, BILIR e UYGUNOGLU, 2009; BINICI, KAPLAN e YILMAZ, 2007; BDOUR e AL-JUHANI, 2013; HAMEED e SEKAR, 2009; COLANGELO, MARROCCOLI e CIOFFI, 2010; ARUNTAS *et al.*, 2010) ou apenas do corte de granito (AMBARISH *et al.*, 2011; MÁRMOL *et al.*, 2010), ou proveniente tanto de mármore quanto de granito (CALMON *et al.*, 2005; ALZBOON e MAHASNEH, 2009) e, em alguns casos, não era especificado, sendo apenas identificado como proveniente de rochas ornamentais (ALMEIDA *et al.*, 2007; ALMEIDA, BRANCO e SANTOS, 2007; AL-AKHRAS, ABABNEH e ALARAJI, 2010).

Diante desses diversos usos, sua caracterização física e química é essencial para se compreender o comportamento desse material e sua influência no desempenho dos produtos gerados. Topçu, Bilir e Uygunoglu (2009) destacam que a quantidade e o tipo do resíduo a ser utilizado dependerão das propriedades físicas e químicas desse material, pois a distribuição do tamanho das partículas, sua finura, dentre outras características, afetam o desempenho da pasta de cimento.

Na Tabela 1 são apresentados os tamanhos das partículas e sua finura (pelo método de Blaine) dos resíduos utilizados pelos diferentes autores pesquisados.

Tabela 1 - Finura e tamanho das partículas

PESQUISAS	FINURA (MÉTODO DE BLAINE)	TAMANHO DAS PARTÍCULAS
Calmon <i>et al.</i> (2005)	1295 m ² /kg	6,47 µm
Alyamaç e Ince (2009)	3924 m ² /kg	Não informado
Colangelo, Marroccoli e Cioffi (2010)	1500 m ² /kg	Entre 50µm e 7,0 µm
Alzboon e Mahasneh (2009)	Não informado	Entre 300µm e 0,5 µm
Topçu, Bilir e Uygunoglu (2009)	614 m ² /kg	Não informado
Almeida <i>et al.</i> (2007)	7100 m ² /kg	5,0 µm
Binici, Kaplan e Yilmaz (2007)	Não informado	Menores que 1 mm
Bdour e Al-Juhani (2013)	Não informado	Menores que 343,2 µm
Hameed e Sekar (2009)	1500 m ² /kg	170 µm
Almeida, Branco e Santos (2007)	7128 m ² /kg	5,0 µm
Colangelo, Marroccoli e Cioffi (2010)	Não informado	10,10 µm
Mármol <i>et al.</i> (2010)	Não informado	Entre 60 µm e 2 µm
Aruntas <i>et al.</i> (2010)	3097 m ² /kg	Não informado

Fonte: produção da autora

Observa-se a diferença da finura e tamanho das partículas devido às diferentes fontes de coleta do material, o tipo de rocha, o processo de desdobramento do bloco, o tipo de tear, etc. Na maioria dos trabalhos apresentados o tamanho das partículas variou entre 0,5µm até 1mm. Almeida *et al.* (2007) destacam que essa dimensão favorece o preenchimento da zona de transição e dos poros capilares, com isso o resíduo atua como um microfiller.

Para Calmon *et al.* (2005), Alyamaç e Ince (2009), Topçu, Bilir e Uygunoglu (2009), Al-Akhras, Ababneh e Alaraji (2010), Corinaldesi, Moriconi e Naik (2010) e Mármol *et al.* (2010) a baixa granulometria e a área específica são as propriedades mais importantes para a aplicação em matrizes cimentícias quando atuando como fíler, incorporado ou como substituto ao cimento, pois preenche poros e com os efeitos de nucleação¹ podem melhorar o desempenho mecânico do material.

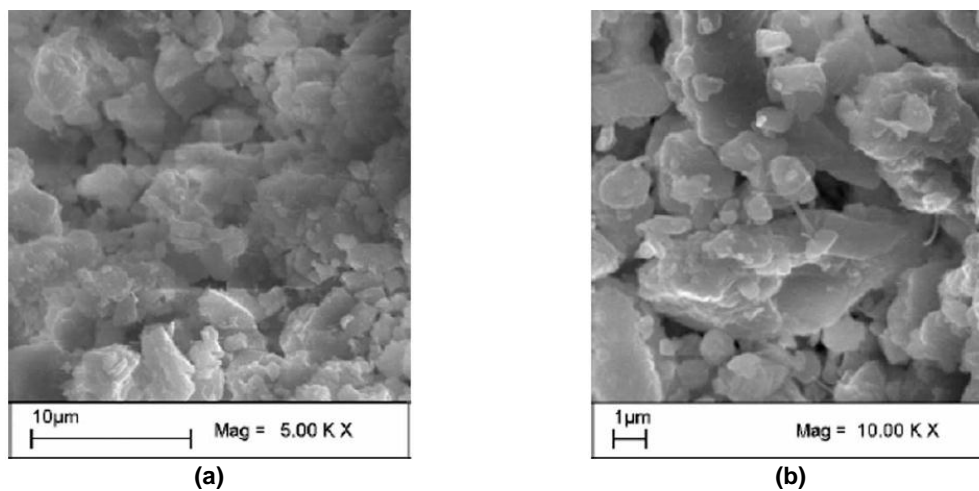
No trabalho de Colangelo, Marroccoli e Cioffi (2010) a morfologia das partículas não afetou significativamente a trabalhabilidade dos concretos cuja lama do corte de

¹ O efeito de nucleação está abordado no item 2.3.3.2 deste capítulo

mármore foi usada como um substituto parcial do agregado miúdo, para os autores isso deve-se às pequenas dimensões do resíduo. No entanto, os autores salientam que a trabalhabilidade das misturas depende significativamente da forma e do tamanho das partículas, principalmente partículas maiores, portanto essas características do resíduo devem ser observadas.

Através das micrografias do trabalho de Alyamaç e Ince (2009) (Figura 9) é possível verificar que o resíduo possui formas angulares com uma textura de superfície áspera sem uma forma definida.

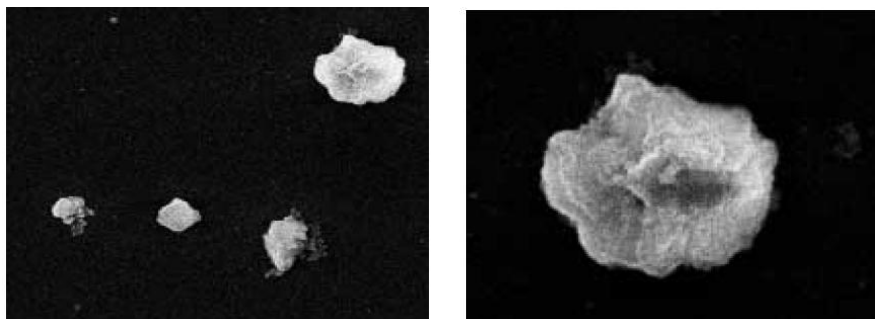
Figura 9 - Microscopia eletrônica de varredura do resíduo ampliada 5000 vezes (a) e 10000 vezes (b)



Fonte: Alyamaç e Ince, 2009

Essa morfologia do resíduo pode ser confirmada nas imagens geradas no trabalho de Colangelo, Marroccoli e Cioffi (2010) (Figura 10) que comprovam a irregularidade das partículas.

Figura 10 - Microscopia eletrônica de varredura de partículas do resíduo



Fonte: Colangelo, Marroccoli e Cioffi, 2010

O estudo da composição química do resíduo se faz necessário, pois a presença de determinados elementos químicos pode contribuir na alteração de algumas

características da matriz em que o RBRO será inserido. Pois, é a partir da composição química do material que são norteados os principais parâmetros e tomadas de decisão acerca da aplicação do resíduo nas diferentes matrizes cimentantes. Na Tabela 2 é apresentada a composição química do resíduo proveniente do corte do mármore e do granito, separadamente.

Tabela 2 - Composição química de diferentes tipos de resíduos

Óxidos	Teores (%)			
	Resíduo de mármore		Resíduo de granito	
	Alyamaç e Ince (2008)	Alzboon e Mahasneh (2009)	Mármol <i>et al.</i> (2010)	Calmon <i>et al.</i> (2005)
SiO ₂	0,14	0,83	61,76	59,95
Al ₂ O ₃	-	0,21	13,38	10,28
Fe ₂ O ₃	0,32	0,11	6,85	6,05
CaO	54,55	54,22	5,90	6,51
MgO	4,17	0,91	1,87	3,25
K ₂ O	-	0,00	3,45	4,48
Na ₂ O	-	-	2,35	3,39

Fonte: adaptado de Alyamaç e Ince (2008); Alzboon e Mahasneh (2009); Mármol *et al.* (2010) e Calmon *et al.* (2005)

Observa-se que, apesar da variação da composição química devido ao tipo e origem da rocha, há uma predominância da sílica (SiO₂) para os resíduos provenientes do granito e do óxido de cálcio (CaO) para os de mármore, principal constituinte das rochas metamórficas. Mármol *et al.* (2010) salientam que o ferro contido no resíduo é proveniente da própria rocha, apesar dessa afirmação os diferentes tipos de máquinas de corte de bloco também podem ser responsáveis por essa variação no teor de ferro.

Como já visto anteriormente, teares tradicionais necessitam de um abrasivo para o corte do bloco e nele é adicionado granalha de aço. Com isso, é importante salientar que no estado do Espírito Santo, o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais é separado apenas pelo tipo de tear que o bloco foi cortado, obtendo assim dois diferentes tipos de lama, a com granalha (tear tradicional) e a sem granalha (tear multifios), não sendo encontrada ainda, empresas que separam o resíduo por tipo de rocha.

2.2.2 Influência no estado fresco

É importante salientar que as propriedades do concreto em seu estado fresco influenciam diretamente o seu comportamento no estado endurecido, principalmente em relação à sua resistência e garantia de sua durabilidade. Portanto, o controle de sua trabalhabilidade, tempo de pega, exsudação, entre outros, é de grande importância para garantir um concreto de qualidade, que atenda aos requisitos ao qual foi projetado.

Nos trabalhos estudados notou-se a grande influência do resíduo na trabalhabilidade das matrizes cimentícias. Nos estudos em que o resíduo foi usado como um substituído do agregado miúdo em diferentes porcentagens (GENCEL *et al.*, 2012; CORINALDESI, MORICONI e NAIK, 2010; AMBARISH *et al.* 2011) observou-se uma diminuição da fluidez com o aumento do uso do RBRO e, conseqüentemente, um aumento do consumo de água à medida que a porcentagem de resíduo era maior. Este comportamento pode ser explicado devido à elevada área específica do material (AL-AKHRAS, ABABNEH, ALARAJI, 2010).

Outros autores encontraram resultados diferentes quanto à consistência. Hameed e Sekar (2009) obtiveram um concreto mais fluido com o uso do RBRO em substituição da areia e, nos estudos de Almeida *et al.* (2007), a trabalhabilidade se manteve constante, mesmo com o aumento do percentual do resíduo.

Apesar da maior necessidade de água com o aumento do consumo do resíduo, trabalhos que utilizaram aditivos superplastificantes usou esse produto em menores quantidades nos traços em que o resíduo estava em maior porcentagem, justamente devido ao menor diâmetro médio das partículas do RBRO (COLANGELO, MARROCCOLI, CIOFFI, 2010).

Já nos estudos nos quais o RBRO foi utilizado como um fíler, sendo adicionado à mistura em diferentes porcentagens em relação à massa de cimento, a fluidez necessária foi obtida (CALMON *et al.*, 2005) e, mesmo resíduos provenientes de diferentes tipos de mármore, não influenciaram a fluidez do concreto (ALYAMAÇ e INCE, 2009).

Como o resíduo possui alto teor de umidade, no trabalho de Alzboon e Mahasneh (2009) o material foi utilizado como substituído parcial da água. Apesar de utilizar o

RBRO com um teor de umidade de 96%, a consistência não foi adequada em valores com substituição acima de 25%. Esse comportamento pode ser explicado devido à presença de muitas partículas finas no resíduo.

Essa característica do material possuir alto teor de finos e a sua influência no estado fresco das matrizes cimentícias pode ser observado também no trabalho de Topçu, Bilir e Uygunoglu (2009) que utilizaram o resíduo como substituto parcial dos aglomerantes, em que os valores no ensaio consistência através do abatimento do tronco de cone (Slump Flow Test) também diminuíram em teores de substituição acima de 30%.

2.2.3 Influência no estado endurecido

2.2.3.1 Resistência à compressão axial

Segundo Metha e Monteiro (2008) a resistência do concreto é uma das propriedades mais valorizadas desse material. Portanto o estudo do comportamento do concreto submetido à tensões se torna fundamental, uma vez que acredita-se que a partir desta propriedade é possível deduzir os outros tipos de resistência, bem como módulo de elasticidade, permeabilidade da matriz, entre outras propriedades.

Nos trabalhos cujo resíduo foi utilizado como um substituto parcial do agregado miúdo observou-se uma queda da resistência à compressão axial com o aumento do uso do resíduo, mas os valores se mantiveram satisfatórios em porcentagens mais baixas, entre 5% e 10% (GENCEL *et al.* 2012; CORINALDESI, MORICONI e NAIK, 2010).

No entanto, no trabalho de Colangelo, Marroccoli e Cioffi (2010) que produziram argamassa auto-adensável com substituição parcial de agregado miúdo pela lama do corte de mármore observou-se um ganho de resistência na idade de 7 dias mesmo em argamassas cuja substituição chegou a 30%. Já em idades mais avançadas, como 180 dias, nenhum aumento foi observado.

Em alguns casos, houve um aumento significativo da resistência em substituições de até 5% da areia comparado ao concreto de referência, especialmente em idades mais avançadas (ALMEIDA *et al.*, 2007; BINICI, KAPLAN e YILMAZ, 2007, ALMEIDA, BRANCO e SANTOS, 2007; MÁRMOL *et al.*, 2010). Mármol *et al.* (2010),

Hameed e Sekar (2009) e Ambarish *et al.* (2011) também obtiveram ganhos de resistência mesmo em substituições de 50% e 25%, respectivamente.

Sendo usado como um material finamente moído adicionado à matriz, em valores até 20% de adição em relação à massa de cimento, os resultados para a resistência à compressão foram satisfatórios (CALMON *et al.*, 2005), sendo que para a mesma relação a/c misturas com adição de resíduo apresentaram resultados superiores (ALYAMAÇ e INCE, 2009). Essa melhora de resistência pode estar ligada ao efeito fíler do material, ao preencher vazios, diminuir a porosidade e com isso garantir uma melhor resistência ao concreto.

Os benefícios do resíduo na matriz cimentícia também foi observado por Alzboon e Mahasneh (2009) ao substituir parte da água da mistura do concreto pelo resíduo *in natura*, já que os autores constataram que, do volume total do resíduo utilizado, 96% era água. Tal substituição não causou diferenças significativas na resistência à compressão, pelo contrário, todas as amostras testadas atenderam o padrão exigido.

Na produção de cimento, como um substituto parcial do clínquer, de um modo geral, o aumento da razão de resíduo afetou negativamente a resistência das argamassas. Apesar dessa queda, os valores de resistência se mantiveram dentro do exigido por norma em substituições de até 10% (ARUNTAS *et al.*, 2010).

Autores como Al-Akhras, Ababneh e Alaraji (2010), através de testes experimentais preliminares, observaram que o uso do resíduo após queima, a uma temperatura de 700°C, melhora as propriedades mecânicas do concreto se comparado ao resíduo não queimado. Os mesmos autores obtiveram em seu trabalho um aumento de resistência de forma constante com o aumento do teor de resíduo em substituição do agregado miúdo, obtendo um aumento máximo de 26% na idade de 7 dias com 10% de substituição de resíduo. Essa melhoria global da resistência à compressão pode ser atribuída à reação do resíduo com a sílica formando gel de silicato de cálcio hidratado adicional, contribuindo para o aumento da resistência. (AL-AKHRAS, ABABNEH e ALARAJI, 2010)

No trabalho de Uliana (2014) o RBRO foi tratado termicamente a uma temperatura de 1200°C e utilizado como um substituto parcial do cimento para produção de

argamassas. As argamassas com substituição de cimento por resíduo obtiveram resultados inferiores aos da argamassa de referência, porém atenderam em todos os níveis de substituição resistência satisfatória de 40 MPa. Para a autora o resíduo após tratamento, apresentou uma tendência de desorganização da rede cristalina com o aparecimento de halo amorfo, obtendo um comportamento típico de materiais pozolânicos.

2.2.3.2 Durabilidade

Durabilidade de um material é a sua capacidade de manter suas qualidades por um longo tempo sem qualquer deterioração significativa. No caso do concreto, sua durabilidade irá depender das suas condições de exposição, que incluem ataque químico e agressão física.

No trabalho de Gencel *et al.* (2012) a durabilidade do concreto foi testada através de ensaios de congelamento e descongelamento e desgaste abrasivo utilizando o resíduo como um substituto parcial do agregado miúdo. Quanto à resistência ao congelamento e descongelamento, todos os concretos obtiveram perdas. No entanto para os concretos com resíduo, essas perdas foram menores. Os autores atribuem esse comportamento ao fato de os concretos que contém resíduo absorverem menos água. Além disso, a adição do resíduo aumentou a resistência ao desgaste.

Quanto à resistência a ataques químicos Binici, Kaplan e Yilmaz (2007) e Hameed e Sekar (2009) obtiveram resultados positivos quando os concretos foram submetidos ao ataque de sulfatos, sendo observado um aumento da resistência à esse ataque com o aumento da porcentagem de substituição de areia por resíduo.

No caso da reação álcali-sílica estudos de Al-Akhras, Ababneh e Alaraji (2010) concluíram que tanto os concretos de referência quanto os com 10% de substituição de resíduo possuem a mesma expansão.

2.2.3.3 Absorção de água

O índice de absorção de água do concreto é um dos fatores que influenciam na durabilidade do material. O fato de o concreto ser mais ou menos permeável está intimamente relacionado com a interconectividade dos poros. Poros capilares interligados influenciam na velocidade à qual a água e agentes agressivos penetram nos poros do concreto (KALLA *et al.*, 2013).

Vale salientar a influência dos materiais finamente moídos, atuando no preenchimento dos poros das matrizes cimentícias, modificando a estrutura, provocando a formação do efeito filer e, conseqüentemente, colaborando para uma diminuição da absorção daquela matriz.

Nos trabalhos estudados, os resultados quanto à absorção de água foram divergentes. Gencel *et al.* (2012) e Hameed e Sekar (2009) que utilizaram o resíduo como um substituto do agregado miúdo obtiveram maiores índices de absorção nos concretos com maiores quantidades de resíduo. Esse resultado deve-se ao fato de uma maior demanda de água com o aumento do uso de resíduo e, conseqüentemente, a estrutura do concreto acaba ficando menos densa, com mais poros.

Por outro lado, Ambarish *et al.* (2011) obtiveram resultados diferentes, observando uma redução de cerca de 30% da absorção de água com uso do resíduo, mesmo usando esse material como um substituto da areia. Assim como no trabalho de Almeida *et al.* (2007) que alcançaram uma redução na absorção de água de até 15%, e Colangelo, Marroccoli e Cioffi (2010) que observaram melhores resultados nos concretos com resíduos, em relação ao de referência. Para Almeida *et al.* (2007) essa melhora na absorção está associada ao efeito microfíler do resíduo, cujas partículas completam os interstícios da matriz (zona de transição e poros capilares) reduzindo espaço para a água livre.

Quando o resíduo foi usado em substituição parcial do cimento, Colangelo, Marroccoli e Cioffi (2010) obtiveram coeficientes de capilaridade semelhantes ou ligeiramente maiores do que o da mistura de referência. Assim como os resultados encontrados por Topçu, Bilir e Uygunoglu (2009) cuja porosidade e absorção foram maiores com o aumento do uso do resíduo, porém até 30% de substituição essa diferença não foi significativa.

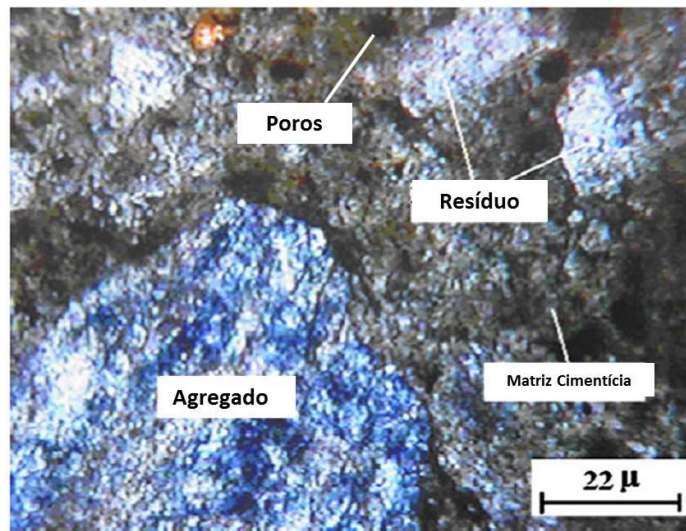
2.2.3.4 Microestrutura

O estudo da microestrutura do concreto é de suma importância para compreender os mecanismos e as propriedades desse material. Metha e Monteiro (2008) destacam essa importância ao afirmar que as relações microestrutura-propriedades do concreto devem ser estudadas a fim de auxiliar no entendimento das propriedades

mecânicas e de durabilidade, já que as alterações encontradas na avaliação destas propriedades podem ter origem na microestrutura do material.

Ao analisar a microestrutura (Figura 11), Topçu, Bilir e Uygunoglu (2009) observaram pequenos poros situados, sobretudo em torno de grandes partículas do resíduo, e que mesmo essas partículas sendo muito pequenas elas ainda existiam na matriz cimentícia após 28 dias de hidratação. Os autores também perceberam uma boa ligação entre o agregado graúdo e a pasta, ou seja, uma zona interfacial mais densa caracterizando um concreto que possivelmente terá um desenvolvimento maior da sua resistência.

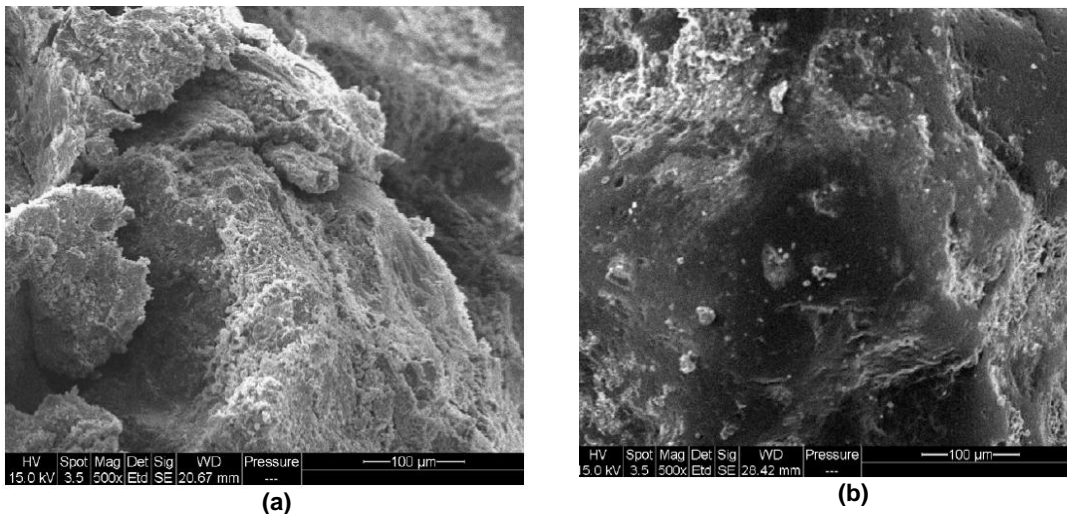
Figura 11 – Microscopia eletrônica de varredura dos concretos aos 28 dias



Fonte: Topçu, Bilir e Uygunoglu, 2009

Por outro lado, Al-Akhras, Ababneh, Alaraji (2010) observaram uma diminuição da porosidade e uma estrutura mais densa nas argamassas contendo resíduo comparadas a de referência. Os autores concluíram que o teor de 10% de resíduo causa um empacotamento na matriz e conseqüentemente torna essa matriz mais densa (Figura 12)

Figura 12 - Microscopia eletrônica de varredura de argamassas referência (a) e argamassa com incorporação de resíduo (b), ampliadas em 500 vezes



Fonte: Al-Akhras, Ababneh, Alaraji, 2010

2.2.4 Considerações sobre a influência da aplicação do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais em matrizes cimentícias

Após analisar os estudos apresentados anteriormente, notou-se que:

- A dimensão das partículas do resíduo varia entre 0,5 µm a 1 mm, sendo possível preencher a zona de transição, que mede entre 10µm e 50µm (METHA e MONTEIRO, 2008) e os poros capilares, que variam entre 50µm a 10µm de diâmetro (CAMPITELI, 1987), com isso o material age como um filer;
- De acordo com sua composição química, o RBRO possui uma estrutura cristalina, formada principalmente por dióxido de sílica (SiO_2), não apresentando atividade hidráulica ou pozolânica;
- O resíduo afeta a trabalhabilidade do concreto devido à sua morfologia. Com o aumento do uso do RBRO há uma diminuição da trabalhabilidade e um aumento no consumo de água;
- Em baixas porcentagens (até 5%) há uma melhora na resistência à compressão dos concretos, possivelmente devido ao seu efeito filer que garante uma dispersão mais eficaz do cimento, promovendo uma formação acelerada de compostos hidratados (GONÇALVES, 2000);

- O efeito filler do resíduo melhora a porosidade das matrizes cimentícias, reduzindo o volume de vazios e a absorção de água. Além disso, esse efeito traz benefícios às propriedades ligadas à durabilidade dos materiais, aumento da resistência de concretos à ataques químicos.

De modo geral, é possível verificar as várias soluções técnicas para a incorporação do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais na produção de diferentes materiais, como argamassas, concretos, blocos, cimento, além de materiais em cerâmica (LIMA, 2010; SOUZA, PINHEIRO e HOLANDA, 2011), entre outros. Ainda há a possibilidade de incorporá-lo a outras soluções construtivas como base e sub bases asfálticas (CONCEIÇÃO, CARANASSIOS e RIBEIRO, 2010).

Assim, o resíduo pode ser consumido por diversas atividades industriais como um subproduto, podendo ser utilizado em substituição ao agregado miúdo, ao cimento, agindo como um fíler, trazendo benefícios à várias propriedades das matrizes nas quais está sendo incorporado.

2.3 Aspectos gerais sobre durabilidade do concreto

2.3.1 Considerações iniciais

A durabilidade é uma questão importante a ser levantada no que diz respeito ao desenvolvimento de novas tecnologias de concreto, pois a longa vida útil de uma estrutura envolve razões ambientais e também econômicas. Ao se projetar um concreto visando o seu desempenho e conseqüentemente, sua longa vida útil, os gastos com manutenção serão diminuídos e o consumo de novos materiais para reparos também.

Diante disso, conhecer e entender alguns conceitos fundamentais sobre a durabilidade do concreto e os parâmetros correlacionados, como vida útil e desempenho, se fazem indispensáveis. Portanto, nos itens seguintes será apresentada uma revisão dos conceitos básicos que fundamentam a durabilidade do concreto e alguns fatores que influenciam em seu desempenho, fatores estes estudados nesta pesquisa.

2.3.2 Conceitos sobre durabilidade do concreto

Entende-se que o concreto é um material instável e que, ao longo do tempo, suas propriedades físicas e químicas podem sofrer alterações diversas devido aos componentes que o constituem e o seu comportamento no meio ambiente em que está inserido. Portanto, os aspectos que envolvem a durabilidade se tornam parâmetros cada vez mais relevantes ao se projetar estruturas de concreto. Estas, por sua vez, são continuamente expostas a ataques de agentes físicos, químicos e biológicos que podem causar deterioração rápida, encurtando sua vida útil e aumentando os custos de manutenção e reparação.

A durabilidade do concreto depende de suas condições de exposição, que incluem ataque químico e agressão física. Os principais ataques químicos são: ataques por sulfatos, por íons cloretos, reação álcali-agregado em agregados reativos, carbonatação, ataque de ácidos, corrosão das armaduras, entre outros. Os ataques físicos acontecem devido ao congelamento e descongelamento da pasta e agregados, molhagem e secagem, mudanças de temperatura na pasta e no agregado e desgaste à abrasão (KALLA *et al.*, 2013).

De acordo com o American Concrete Institute (2008) a durabilidade representa uma das principais características do concreto, o que levou à sua utilização generalizada. O Committee 201 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008) define que a durabilidade do concreto de cimento Portland é determinada pela sua capacidade de resistir à ação das intempéries, ataque químico, à abrasão ou qualquer processo de deterioração. Um concreto durável irá manter a sua forma original, qualidade e facilidade de manutenção, quando exposto ao ambiente. Se corretamente projetado, proporcionado, executado, finalizado, testado e inspecionado, o concreto é capaz de fornecer décadas de serviço com pouca ou nenhuma manutenção.

O Comitê Europeu de Normalização (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 1996) também salienta esses aspectos e afirma que “a estrutura durável deve cumprir os requisitos de manutenção, força e estabilidade em toda a sua vida útil prevista, sem perda significativa de utilidade ou manutenção excessiva”.

No Brasil as propriedades relacionadas à durabilidade do concreto devem basear-se nos parâmetros determinados pelas normas nacionais. Neste caso tem-se a NBR

6118 (ABNT, 2014) que apresenta novos critérios a serem considerados pelo projetista para se garantir a durabilidade dos elementos estruturais e contribuir de forma global para os demais elementos do sistema construtivo.

Pela norma, durabilidade é entendida pela capacidade da estrutura de resistir às influências ambientais previstas e definidas em projeto. A vida útil, por sua vez, é o período de tempo durante o qual a estrutura mantém suas características previstas em projeto, levando em consideração o seu uso adequado bem como a execução de manutenções e reparos.

Outra norma que dá suporte e subsídio à NBR 6118 (ABNT, 2014) no que se refere aos aspectos relativos à durabilidade é a NBR 12655 (ABNT,2006). Ao apresentar diretrizes para especificação, solicitação e controle do concreto, considerando principalmente as condições de agressividade ambiental do local onde a obra é executada, tal norma corrobora para garantir uma maior durabilidade das estruturas de concreto.

Para Mehta e Monteiro (2008), ao ser inserido no ambiente para o qual foi projetado, o concreto será considerado durável se ele mantiver suas características iniciais, como sua forma, qualidade e capacidade de uso. Os autores afirmam que existe uma implicação sócio-econômica da durabilidade de estruturas de concreto, pois os reparos e substituições por falhas nos materiais geram custos altos, aumentando substancialmente o orçamento total da construção.

Souza e Ripper (2009) afirmam que existe uma associação entre os conceitos de durabilidade e vida útil. Para eles a durabilidade é um parâmetro que relaciona a aplicação das características de deterioração do material concreto e dos sistemas estruturais a uma construção e a sua resposta aos efeitos da agressividade do meio ambiente em que está inserida, como ocorre essa relação é que determina sua vida útil.

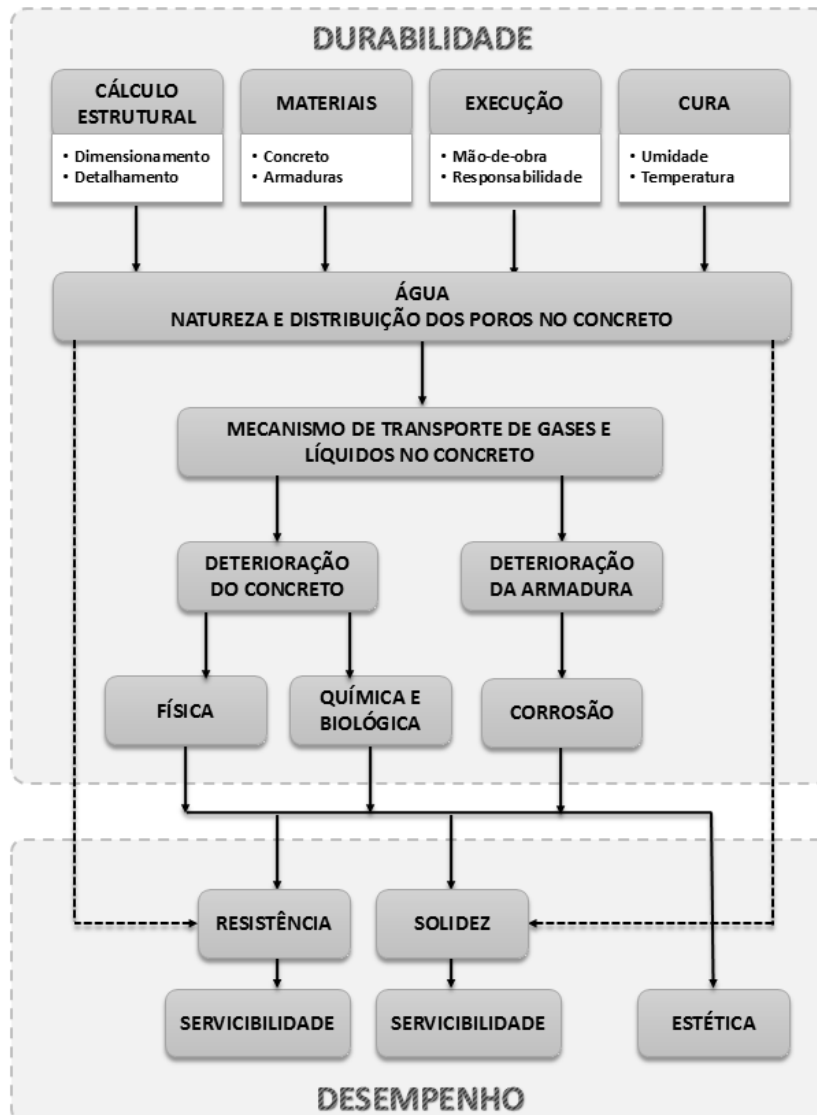
Além de considerar os aspectos de durabilidade e vida útil, vale salientar que o desempenho está interligado com esses dois parâmetros. Souza e Ripper (2009) afirmam que o desempenho é o comportamento de um determinado produto durante a sua vida útil. De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014) “desempenho em serviço

consiste na capacidade da estrutura manter-se em condições plenas de utilização, não devendo apresentar danos”.

Destaca-se dentro deste contexto a NBR 15575 (ABNT, 2013), que trata sobre o desempenho de edificações habitacionais e estabelece padrões mínimos de desempenho para diversos requisitos como segurança estrutural, vida útil, acústica entre outros na produção de edificações. De acordo com a norma, desempenho é entendido como “comportamento em uso de uma edificação e de seus sistemas.”.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta os diversos fatores que influenciam na durabilidade da estrutura de concreto e, conseqüentemente, resultam no seu desempenho.

Figura 13 - Inter-relacionamento entre conceitos de durabilidade e desempenho



Fonte: adaptado Comitê euro-internacional du betón, 1992

Observa-se que, a partir do momento que o concreto é dimensionado e calculado, sua durabilidade pode ser afetada por um bom ou mau projeto. E, a partir dele, os materiais utilizados, a forma como o concreto é executado e o seu processo de cura influenciam diretamente no seu desempenho. Todos esses processos são afetados pela água, responsável pela formação dos poros na matriz cimentícia.

A partir dessa rede de poros, o transporte de gases e líquidos agressivos pode deteriorar tanto o concreto quanto sua armadura, afetando sua resistência e colocando em risco a segurança da estrutura, além de alterar sua solidez influenciando diretamente na servicibilidade do concreto, além de trazer prejuízos estéticos ao material.

Kalla *et al.* (2013) destacam que, entre os vários fatores que afetam a durabilidade do concreto, a água e a sua proporção (relação a/c) é um dos parâmetros que têm maior influência sobre ela, pois afeta a porosidade e a permeabilidade do concreto. Bauer (1995) destaca que a durabilidade do concreto está relacionada com a sua microestrutura, sendo assim a porosidade capilar é um importante aspecto a ser considerado no trato da durabilidade e, conseqüentemente, o tipo de aglomerante e a relação água/cimento.

Assim, ressalta-se a importância de se produzir concretos duráveis, pois, um material durável ajuda o meio ambiente, na conservação dos recursos naturais, na redução de resíduos e dos impactos ambientais ao reduzir o número de reparações e substituições de materiais.

2.3.3 Aspectos que influenciam a durabilidade do concreto

Como já visto anteriormente, é de fundamental importância estudar o desempenho do concreto quanto às propriedades relacionadas à durabilidade. Tal comportamento pode ser avaliado através de algumas de suas características. A permeabilidade é uma delas, pois influencia no ingresso ou não de fluidos, podendo estes serem agressivos e comprometerem a vida útil do concreto.

Conhecer também a influência das adições minerais quanto às características do concreto se faz necessário, pois, ao serem incorporadas na matriz cimentícia afetam diretamente sua microestrutura.

Nos próximos pontos deste trabalho serão levantados os principais aspectos dos critérios citados anteriormente e suas influências nas propriedades relacionadas à durabilidade do concreto.

2.3.3.1 Permeabilidade e difusão

O concreto mesmo sendo um sólido compacto e denso ele é poroso. Seus vários poros formam uma rede de canais e capilares, que permitem o concreto ter certa permeabilidade aos líquidos e aos gases, estes por sua vez, carregam agentes agressivos que, ao ingressarem para o interior do concreto, causam danos e comprometem sua durabilidade.

Dentre esses agentes tem-se o CO₂ que provoca a carbonatação do concreto e despassivação das armaduras, os cloretos que causam corrosão da armadura, e os sulfatos que agredem a matriz cimentícia. Portanto, a permeabilidade do concreto é um importante fator determinante de sua durabilidade. Lu, Chen e Yuan (2000) afirmam que uma avaliação rápida da permeabilidade do concreto pode ser usada para estimar indiretamente a sua durabilidade.

Cascudo (1997) salienta que a baixa qualidade do concreto está intimamente ligada aos altos índices de permeabilidade e absorção. Mehta e Monteiro (2008) definem permeabilidade como uma propriedade que “governa a taxa de fluxo de um fluido através de um sólido poroso”. Portanto um material é permeável quando ele permite a passagem de fluidos no seu interior.

Esse fluxo de fluidos através dos poros ocorre através da diferença de pressão entre dois pontos, e é regido pela Lei de Darcy (1), que estabelece que a vazão de um fluido (dq/dt) é diretamente proporcional ao gradiente de pressão (ΔH) externo aplicado, sendo a constante de proporcionalidade (K), um coeficiente dependente (da microestrutura) do meio (A) e da viscosidade absoluta do fluido (μ) (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

$$\frac{dq}{dt} = K \frac{\Delta H A}{L \mu} \quad (1)$$

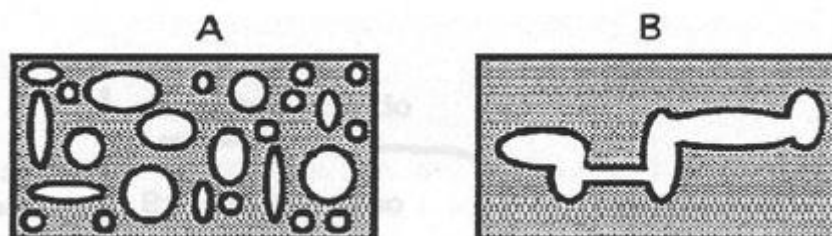
onde dq/dt = taxa de fluxo do fluido
 ΔH = gradiente de pressão
 A = área da superfície

L = espessura do sólido

μ = viscosidade do fluxo

Observa-se, assim, que a permeabilidade está diretamente relacionada com a estrutura do material e, conseqüentemente, com sua porosidade. Como destaca Kacejko (2011), para assegurar uma baixa permeabilidade não é necessária apenas uma baixa porosidade, mas deve-se também observar a interligação dos canais. Se os vazios são descontínuos, a permeabilidade é baixa, mesmo os valores da porosidade sendo elevados. Na Figura 14 é possível observar essa diferença: a peça A é mais porosa em relação a B, mas provavelmente menos permeável devido a interligação entre os poros.

Figura 14 – Porosidade x Permeabilidade



Fonte: Dhanya (s.d.)

Sato, John e Agopyan (1995) salientam que essa rede de poros também é constituída de capilares. Estes por sua vez, terão suas formas e dimensões definidas desde o estado fresco do concreto e irão se perfazer no estado endurecido. Essa forma e a interconexão entre os capilares irão interferir de maneira decisiva na vulnerabilidade do concreto ao ataque de agentes agressivos. Portanto, estão diretamente relacionadas com a durabilidade do material.

A relação água/cimento é um dos fatores determinantes nos valores do coeficiente de permeabilidade. É inegável a importância da água na estrutura do concreto, principalmente nas primeiras idades, pois irá determinar a resistência do mesmo. No entanto, a presença da água após as reações de hidratação, pode provocar deterioração do concreto, pois os espaços deixados por ela formam os capilares e poros, nisso a água pode agir como um agente direto (lixiviação) ou transportando substâncias nocivas, tais como os íons cloreto, íons sulfatos e ácidos, ou até mesmo outros componentes que podem ativar e impulsionar reações químicas que aceleram o processo de degradação da matriz, proporcionando, de certa forma, uma redução substancial da durabilidade e da vida útil do concreto (GOMES *et al.*, 2003).

Alguns autores (MUNN *et al.* 2003; OBLA *et al.* 2005; CAMPBELL, 2010) enfatizam que a permeabilidade é um dos fatores mais importantes para estimar a durabilidade sob as mais diversas condições em que a estrutura está inserida. Para Gomes *et al.* (2003), a permeabilidade regula a velocidade de penetração de água agressiva para dentro do concreto. Portanto, o concreto deve ser projetado e executado de forma adequada para o ambiente para o qual ele vai ser exposto, pois a permeabilidade está relacionada com a porosidade e esta varia de acordo com a composição do concreto, a sua relação água/cimento, a sua idade e a sua forma de lançamento e adensamento.

A permeabilidade pode ser controlada restringindo o movimento da umidade no concreto através da modificação e aperfeiçoamento da sua estrutura de poros. Isto é geralmente conseguido através do uso de aditivos minerais e outros aditivos modificadores de poros, que são capazes de melhorar a impermeabilidade da matriz. Adições minerais como cinza volante, sílica ativa, escórias, fílers, entre outros, são amplamente utilizadas em misturas de concreto para aumentar a resistência a longo prazo e suas propriedades de durabilidade.

Dal Molin (2011) destaca que essa incorporação de adições minerais melhoram as características técnicas dos materiais cimentícios e, dentre os vários fatores, promove a redução da porosidade capilar do concreto. No próximo item serão feitas algumas considerações gerais referentes às adições minerais e os seu benefício no aumento da durabilidade do concreto, com foco nos fílers.

2.3.3.2 Adições minerais e o efeito fíler

As adições minerais são materiais oriundos tanto de fontes naturais quanto de subprodutos industriais, sendo materiais insolúveis e finamente moídos. A incorporação de adições minerais alteram algumas características específicas do concreto, como a melhoria da trabalhabilidade, melhoria da resistência do concreto à fissuração térmica, à expansão álcali-agregado e ao ataque por sulfatos, além de reduzir os custos (METHA e MONTEIRO, 2008).

Para Barros (2008) as adições minerais podem ser classificadas de duas formas, conforme a sua ação no concreto: predominantemente inertes (API) ou predominantemente reativas (APR). As APR contribuem para a formação dos

hidratos, como: pozolanas naturais, cinza volante, cinza da casca de arroz, cinzas da caldeira da queima do bagaço da cana de açúcar, sílica ativa e metacaulim. Já as API provocam uma ação física, proporcionando uma estrutura com maior compacidade, como por exemplo, os fíleres de calcário, quartzo, e o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais.

Outra classificação dada para as adições minerais é apresentada por Dal Molin (2011). A autora destaca que as adições minerais podem ser de três tipos, dependendo de sua ação físico-química: material pozolânico, material cimentante e fíler. Neste trabalho o foco será as adições minerais com efeito fíler.

Segundo Neville e Brooks (2013), o fíler calcário é um material finamente moído, com aproximadamente a mesma finura do cimento Portland, e apresenta efeitos benéficos sobre as propriedades do concreto, como a trabalhabilidade, densidade, permeabilidade, capilaridade ou exsudação.

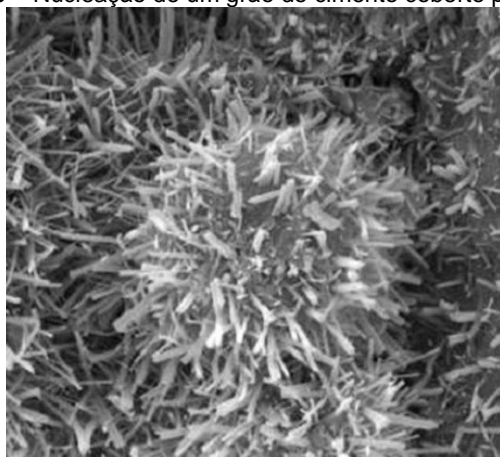
De acordo com o American Concrete Institute (2000) o fíler além de ser um material finamente moído, inerte e coloidal, como por exemplo o pó de pedra calcária, que adicionado ao cimento Portland com o objetivo de reduzir a retração, melhorar a trabalhabilidade e preencher vazios.

Moosberg-Bustnes, Lagerblad e Forssberg (2004) salientam que o fíler exerce diferentes efeitos na pasta de cimento conforme o seu tamanho e forma. Dependendo dessas características o fíler pode interagir com cimento, melhorando o empacotamento das partículas e atribuindo melhoras às várias propriedades do concreto, e ainda reduzir a quantidade de cimento, sem perda de resistência. Para Schutter (2011) o efeito do fíler sobre as propriedades da pasta de cimento pode atingir diferentes níveis: o efeito químico, o efeito físico e o efeito de enchimento.

Para o autor, apesar da possibilidade do fíler ser quimicamente ativo, o seu efeito químico é limitado, contribuindo apenas para formação de aluminatos ao acelerar a hidratação do cimento, introduzindo novos processos de reação durante a hidratação ou modificando as reações existentes. Esse fenômeno foi observado no trabalho de Bonavetti *et al.* (2001) em que foi detectada a presença de aluminatos de cálcio em concretos com 3 dias de idade, devido a presença de fíler calcário.

O efeito físico do fíler possivelmente está relacionado com o processo de nucleação (SCHUTTER, 2011). A nucleação ocorre em uma das fases do processo de hidratação do cimento, na qual uma deposição contínua e relativamente rápida dos produtos de hidratação (principalmente gel de CSH e CH) acontece nos poros capilares, espaço esse que originalmente era ocupado pela água da mistura. A microestrutura da pasta neste ponto consiste em núcleos de partículas de cimento que não reagiram, cobertos por uma camada contínua de produtos de hidratação (grão anidro) (Figura 15), esse estágio é denominado de nucleação. Essa deposição provoca uma grande redução do volume total de poros e um aumento concomitante na resistência (THOMAS e JENNINGS, 2014).

Figura 15 – Nucleação de um grão de cimento coberto por etringita



Fonte: Lau (2014)

As partículas de fíler atuam como locais de nucleação, aumentando a hidratação inicial do cimento e, por conseguinte, produzindo uma cristalização mais desorientada de CH (IRASSAR, 2009).

A influência do fíler na hidratação do cimento é, na maioria dos casos, relacionada à velocidade das reações. O fíler reduz o período de dormência e acelera o processo de hidratação nas primeiras horas, ao promover locais de nucleação para precipitação de mais ou menos hidratos cristalizados (SCHUTTER, 2011). Para Moosberg-Bustnes, Lagerblad e Forssberg (2004) a promoção da nucleação através do material de enchimento também está relacionada com o tamanho dos grãos. Partículas com pequenos diâmetros e maior superfície específica colaboram na densificação e homogeneização da pasta.

2.4 Degradação do concreto devido à ação de sulfatos

2.4.1 Considerações Iniciais

A resistência do concreto à deterioração por soluções de sulfato é necessária numa variedade de condições de exposição. Estas incluem fundações e lajes de concreto em contato com solos contaminados, pisos de concreto e outras unidades expostas a certos ambientes industriais, tubos de concreto expostos a águas residuais, além de parte das estruturas expostas a água do mar ou em algum fluxo de água contaminada.

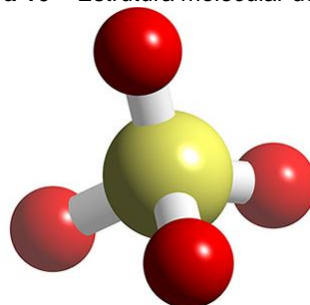
Os íons sulfato externos penetram lentamente no concreto através dos poros capilares e reagem com cimento hidratado e outros compostos presentes nos poros, produzindo reações e produtos expansivos tais como gesso e etringita. Essas reações de expansão levam à um processo de deterioração do concreto, afetando significativamente, a longo prazo, a durabilidade das estruturas.

Os estudos do comportamento do concreto submetido à ataque de sulfatos iniciaram na década de 1920 (TUTHILL, 1988 apud SANTOS, 2006). Mas, para DePuy (1994) apesar desse tema ser amplamente investigado, esse campo não é totalmente compreendido.

2.4.2 Tipos de sulfato e grau de agressividade

De acordo com a International Union of Pure and Applied Chemistry o sulfato é um sal cuja fórmula empírica é SO_4^{-2} . É um íon formado por um átomo central de enxofre rodeado por quatro átomos equivalentes de oxigênio, formando um tetraédrico (Figura 16).

Figura 16 – Estrutura molecular do SO_4^{-2}



Fonte: Gallery (s.d.)

Existe uma grande variedade de sulfatos que são encontrados na natureza e muitos deles altamente solúveis em água, com exceção do sulfato de cálcio (CaSO_4), de

estrontício (SrSO_4), de chumbo (PbSO_4) e bário (BaSO_4) que são pouco solúveis. Os mais conhecidos são os sais selenitosos, apresentados na Tabela 3, classificados conforme o grau de agressividade ao concreto.

Tabela 3 - Características dos principais tipos de sais selenitosos

Tipo	Cátion	Cor	Solubilidade	Origem	Agressividade
K_2SO_4	potássio	branca	baixa	Água do mar e subterrânea	elevada
NH_4SO_4	amônia	branca	alta	Fabrica de explosivos, indústrias químicas	elevada
Na_2SO_4	sódio	branca	alta	Ind. Química, leite e água do mar	elevada
CaSO_4	cálcio	branca	baixa	Água subterrânea, escória	elevada
MgSO_4	magnésio	branca	alta	Água do mar e subterrânea	elevada
CuSO_4	cobre	branca	alta	Conservação de madeira, galvanotecnia	elevada
FeSO_4	ferro	verde	alta	Desinfetante, tinturaria	elevada
$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	ferro	branca	alta	Tratamento de água	elevada
ZnSO_4	Zinco	branca	alta	Tinturarias, indústrias químicas	Média
KAlSO_4	Potássio	branca	baixa	Indústrias químicas	média
PbSO_4	chumbo	branca	Muito baixa	Indústrias químicas	reduzida
CoSO_4	cobalto	vermelha	Baixa	-	reduzida
NiSO_4	níquel	verde	Baixa	Indústrias químicas	reduzida

Fonte: Silva Filho (1994) *apud* Silveira (1996)

Antes de entender os mecanismos de ataque do sulfato ao concreto é importante compreender o que venha a ser esse ataque. Segundo Neville (2004) uma ação que não resulte em deterioração ou perda de durabilidade não é um ataque e, dentro da área de sulfatos, esse ataque pode ser químico ou físico dependendo dos mecanismos de ação que estão envolvidos no ataque.

Quando ocorrem reações químicas entre os íons sulfatos e a pasta de cimento hidratada, ocasionando alterações químicas e, conseqüentemente, mudanças físicas no concreto, é considerado um ataque químico. Por outro lado, o ataque físico envolve a cristalização de sais devido a certas condições ambientais. Esse acúmulo de sais, conhecido como intemperismo, provoca pressões que causam danos ao material (NEVILLE, 2004; METHA, 2000). Para Neville (2004), enfatizar essa diferença é importante para prevenção, pois é suscetível a ser diferente para cada tipo de ataque.

Além disso, o ataque pode ser externo ou interno. O ataque externo ocorre devido à penetração de íons sulfatos a partir de fonte externa; o interno ocorre a partir de uma fonte solúvel incorporada no concreto no momento da mistura (WINTER, 2012).

O processo de ação do sulfato inicia-se na superfície do concreto e avança para o interior com o aumento do tempo de exposição. Para Silveira (1996), vários fatores influenciam na intensidade do ataque, sendo o principal deles a solubilidade. Além disso, a concentração desses sais na solução, o tipo de íon cátion ligado ao radical (SO_4^{-2}) e a natureza do contato entre o sulfato e o concreto também influenciam nessa intensidade.

Concretos expostos a ciclos de molhagem e secagem alternados são atacados mais intensamente devido à deposição dos sais nos poros do concreto. Da mesma forma, a água em movimento é mais agressiva que a água parada, mesmo ambas tendo a mesma concentração de íons sulfato. Isso ocorre devido à pressão que a água em movimento exerce sobre o elemento de concreto (SILVEIRA, 1996).

Para Irassar (2009), além do nível de agressividade do ambiente, que envolve também temperatura e pH, a magnitude do ataque depende também de fatores como a composição da mistura do concreto, principalmente o tipo de cimento, a relação a/c e o processo de cura, fatores esses que contribuem para o transporte de água.

Sendo assim, diferentes instituições internacionais estabelecem classificações para o grau de agressividade do meio ambiente conforme a concentração de íons. Ou seja, a intensidade do ataque é dada pela quantidade de sulfatos disponíveis, conforme apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Classificação da agressividade do meio, em função da concentração de sulfato, adotada por algumas instituições internacionais

Instituição	Unidade de SO_4	Agressividade				
		Nula	Fraca	Média	Forte	Muito Forte
Bureau of Reclamation (EUA)	% no solo	0,00 a 0,10	0,10 a 0,20	-	0,20 a 2,00	2,00 ou mais
	ppm na água	0 a 150	150 a 1500	-	1500 a 10000	10000 ou mais
(conclusão)						
Instituição	Unidade de SO_4	Agressividade				
		Nula	Fraca	Média	Forte	Muito Forte

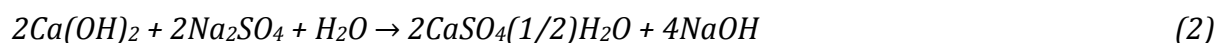
Cembureau (Europa)	mg/l na água do solo	<400	400 a 600	600 a 3000	3000 a 6000	>6000
BRE Digest 250 (Europa)	mg/kg no solo	0 a 2400	2400 a 6000	6000 a 12000	12000 a 24000	>24000
	mg/l na água do solo	0 a 360	360 a 1440	1410 a 3000	3000 a 6000	>6000
CEB (Centre of Biological Engineering) (Portugal)	mg/l na água	<200	200 a 600	600 a 3000	3000 a 6000	>6000

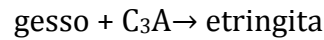
Fonte: adaptado de Silveira (1996)

No Brasil a NBR 6118 (ABNT, 2014) não classifica especificamente um ambiente, em grau de agressividade, por quantidade de sulfato disponível. A classificação refere-se ao tipo de ambiente onde a estrutura ficará exposta (rural, urbana, marinha, industrial, entre outros). Essa classificação encontra-se no item 6.4 da referida norma. Há ainda a NBR 9917 (ABNT, 2009) que estabelece os limites de teor de sulfatos em agregados para produção de concreto, e a NBR 5737 (ABNT, 1992) que propõe os requisitos para o cimento Portland resistentes aos sulfatos.

Dos tipos de sulfatos apresentados o de cálcio, sódio e magnésio são os mais abundantes, agressivos e de maior interesse no estudo dos concretos. Por isso é importante apresentar as principais reações destes com a pasta de cimento. Portanto, serão apontados os produtos finais das várias reações entre os íons sulfatos e os produtos de hidratação do cimento que resultam em diferentes danos ao concreto.

O sulfato de sódio reage com o hidróxido de cálcio formando sulfato de cálcio, ou seja, gesso (2). Essa reação realiza-se em maior ou menor grau, dependendo das condições: na água em movimento, por exemplo, com um fornecimento constante de sulfato de sódio, a reação continua a ponto de lixiviar todo o hidróxido de cálcio (um dos principais produtos de hidratação do cimento Portland) (NEVILLE, 2004). A transformação do hidróxido de cálcio em gesso pode ser acompanhada de expansão.

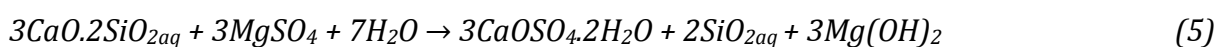
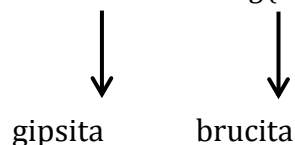
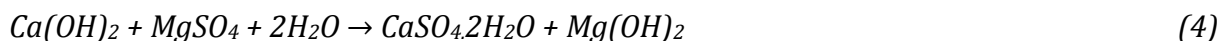
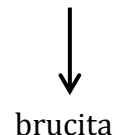
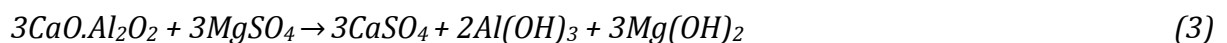




O sulfato de cálcio, por sua vez, pode reagir com o aluminato tricálcico (C_3A), normalmente através da formação de monosulfoaluminatos, para formar etringita (sulfoaluminato hidratado). Essa reação pode ser acompanhada de aumento de volume. Além disso, o sulfato de cálcio também pode reagir com hidróxido de sódio e de potássio. (NEVILLE, 2004). Cimentos com o teor de C_3A limitados são indicados na prevenção de ataque por sulfato de cálcio.

De acordo com o American Concrete Institute (2008), para a classe mais severa de exposição (classe C2) o teor de C_3A deve ser inferior a 5% para relações a/c menores ou iguais a 0,45. Já a norma alemã DIN 1045-2:2001-07 estabelece um limite menor que 3% de C_3A para relações a/c menores ou iguais a 0,50. No Brasil a NBR 5737 (ABNT, 1992) estabelece os critérios para cimentos Portland resistentes a sulfatos, para tanto o teor de C_3A do clínquer deve ser igual ou inferior a 8%.

O sulfato de magnésio por sua vez é o mais agressivo e severo se comparado aos sulfatos de sódio e cálcio, pois reage com todos os produtos de hidratação do cimento: com o C_3A , formando hidróxido de magnésio ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) ou brucita (3); com o hidróxido de cálcio (4) e com os silicatos hidratados (C-S-H) (5), formando hidróxido de magnésio e sulfato de cálcio. Este pode continuar a reagir com o C_3A .



gipsita

brucita

No caso de reagir com o C-S-H este se decompõe e libera cal. Essa cal reage com o sulfato de magnésio e forma ainda mais hidróxido de magnésio e gesso. Essa reação continua até que o gesso é cristalizado. Neville e Brooks (2013) salientam que o C-S-H pode estar sujeito a uma forma diferente de ataque por sulfatos, que resulta na formação da taumasita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$).

O ataque de sulfato na forma de taumasita pode iniciar uma grave degradação em argamassas e concretos mesmo sendo feitos com cimento resistente a sulfatos (TORRES *et al.*, 2004). Al-Amoudi (2002) observou que, no caso do sulfato de magnésio, um menor teor de C_3A no cimento é indesejável já que estimula a reação com o C-S-H, levando ao amolecimento da matriz, perda de massa e redução da resistência.

De forma geral, as reações entre os sulfatos e os produtos de hidratação do cimento induzem a uma alteração da porosidade, microfissuras, expansão, elasticidade, perda de resistência à flexão e à compressão, estilhaçamento, perda de massa e degradação grave da superfície. Quando se tem a mesma agressividade do meio e mesma relação *a/c*, a evolução da deformação, perda de massa ou perda das propriedades mecânicas irá depender da constituição dos espécimes analisados, o tamanho das amostras e o tipo de sulfato utilizado (IRASSAR, 2009).

A proteção contra o ataque de sulfatos é obtida através da produção de um concreto com baixa relação *a/c* e bem curado, fatores esses que retardam a entrada e movimentação de água. (IRASSAR, 2009). Além disso, vários autores (KHATRI, SIRIVIVATNANON, YANG, 1997; SKALNY, 1999) mencionam a importância da permeabilidade e da porosidade como parâmetros para o concreto resistir aos sulfatos, o que pode ser melhorado com a incorporação de fíleres.

2.4.3 Determinação da resistência ao ataque por sulfatos

Para monitorar a agressão causada pelo ataque dos sulfatos ao concreto, a mudança de vários parâmetros pode ser acompanhada, tais como: a variação da resistência mecânica, a variação das dimensões, a variação da massa, a modificação da estrutura dos poros, a variação no módulo de elasticidade dinâmico,

o aspecto visual além do estudo da microestrutura com a utilização do microscópio eletrônico de varredura (MEV).

A maior ou menor variação desses aspectos e o teste mais adequado para essa avaliação irá depender do nível de agressividade do meio, da geometria da amostra, do tempo de agressão, da composição da mistura de concreto, da natureza de contato, do mecanismo de ação do ataque e do tipo de sulfato.

Como visto anteriormente, o ataque por sulfato de cálcio pode resultar na formação de etringita que, provavelmente, conduz à expansão, o que pode ocorrer também com o sulfato de sódio, que também lixivia o hidróxido de cálcio. Já o sulfato de magnésio tem um efeito nocivo sobre várias propriedades do concreto e, mais especificamente, sobre a resistência à compressão em consequência da decomposição do C-S-H.

Para Silveira (1996) os testes de resistência à sulfatos podem se dividir em dois grandes grupos: os testes de agressão por incorporação de sulfatos para análise de ataque interno e testes de agressão por imersão em solução de sulfatos, foco desse trabalho.

No segundo caso, como o próprio nome já propõe, o material a ser analisado é imerso em solução de sulfato durante um tempo, podendo essa imersão ser parcial ou total. Para Silva Filho (1994) apud Silveira (1996) não há diferença significativa entre imersão parcial ou total. Em ambos os casos, o processo pode ser acelerado através de ciclos de imersão e secagem, pois, como já citado anteriormente, a natureza de contato entre o sulfato e o concreto influencia na intensidade do ataque.

Os ensaios podem ser realizados em pasta, argamassa ou concreto. Sendo que, como salienta Santos (2006), a degradação em concreto é mais severa devido à presença da interface pasta/agregado graúdo, além disso, como a pasta é capaz de suportar maiores deformações antes de fissurar, os ensaios podem subestimar a resistência à fissuração da pasta.

Contudo, os relatos de trabalhos que se destinam à avaliação de resistência a degradação por ataque de sulfatos em concreto são reduzidos se comparados àqueles que dedicados ao estudo de pastas e argamassas. No próximo ponto desse

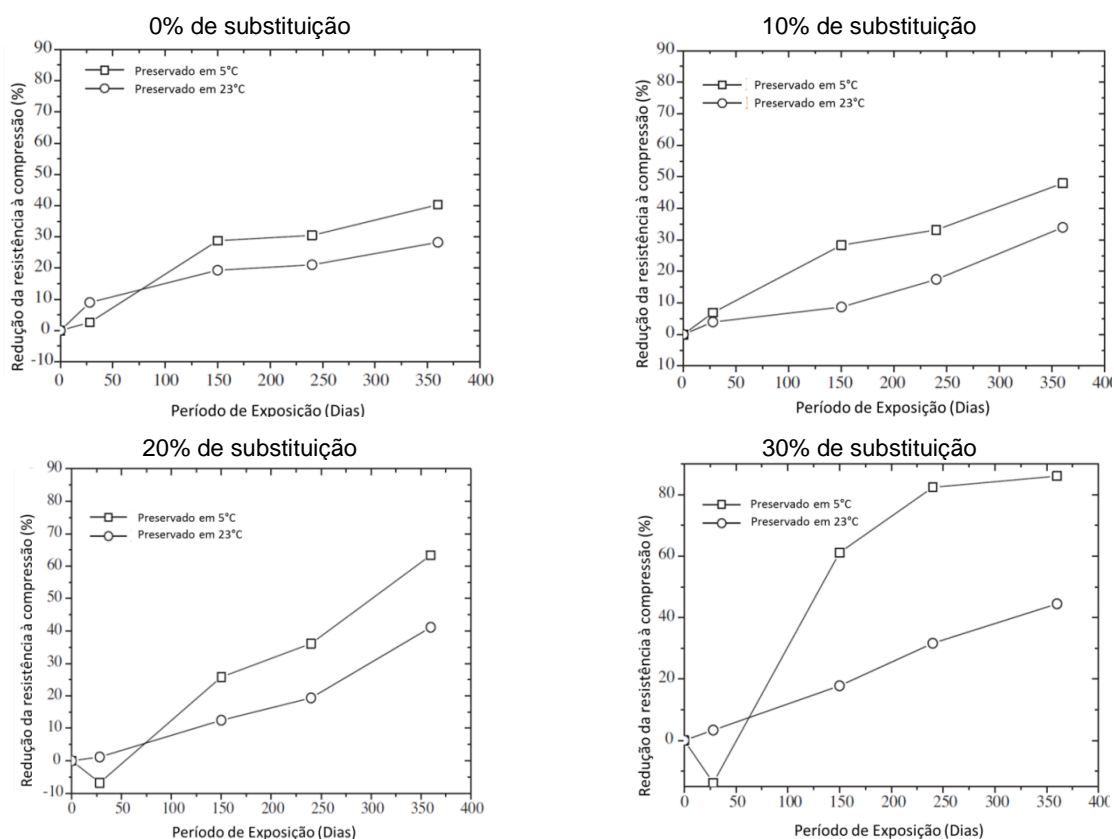
trabalho serão apresentados estudos do ataque de sulfatos de magnésio em matrizes cimentícias em que houve a utilização de fíler calcário.

2.4.4 Ataque de sulfato em materiais cimentícios contendo fíler

Os estudos aqui apresentados fizeram uso do calcário como um fíler em diferentes substituições do cimento. Como relatado por Lee *et al.* (2008), tem havido numerosos estudos sobre o efeito do fíler calcário na durabilidade do concreto, sendo observado que o uso de grandes volumes desse material pode levar ao aumento da probabilidade de ataque de sulfato até mesmo associado a formação de taumasita.

Os estudos usaram soluções de sulfato de magnésio a temperaturas acima de 20° C e diferentes níveis de substituições do cimento por fíler calcário. Resultados da resistência à compressão mostradas no trabalho de Senhadji *et al.* (2010) indicam uma diminuição em todas as amostras expostas à uma solução de sulfato de magnésio a 23°C, sendo essa queda mais acentuada em substituições de 20 e 30% (Figura 17).

Figura 17 – Gráficos da redução da resistência à compressão



Fonte: Senhadji *et al.* (2010)

A diminuição da resistência também foi observada no trabalho de Lee *et al.* (2008), que verificaram uma queda progressiva com o aumento da substituição de cimento por fíler calcário.

Essa tendência não foi encontrada no trabalho de Kakali *et al.* (2003), que após 28 dias de exposição à 25°C, a resistência à compressão aumentou na maioria das amostras, diferentemente daquelas armazenadas à 5°C. Para os autores, a longo prazo, as amostras sofreriam maiores danos devido ao efeito da substituição frente ao ataque de sulfato.

Senhadji *et al.* (2010) concluíram que os valores da resistência à compressão diminuem com o aumento dos níveis de substituição do calcário, e que a deterioração por ataque de sulfato é mais grave com o uso desse fíler.

Quanto à inspeção visual dos espécimes Lee *et al.* (2008), observaram muita fragmentação e perda de material substancial para amostras com 30% de substituição, sendo que as amostras de referência apresentaram apenas pequenas rachaduras nos cantos e bordas. Torres *et al.* (2004) em seu trabalho registraram sinais claros de degradação em todas as amostras, que aumentou em intensidade com o aumento do teor de calcário. Já Senhadji *et al.* (2010) observaram apenas deteriorações nos cantos das amostras. Diferentemente de Kakali *et al.* (2003), cujas amostras não mostraram nenhuma evidência clara de ataque de sulfato mesmo após 11 meses de exposição.

Para Senhadji *et al.* (2010) e Torres *et al.* (2004), o grau de deterioração da superfície tem uma tendência a aumentar com o aumento do nível de substituição de fíler calcário. Lee *et al.* (2008), sugerem que a incorporação de altos níveis desse material, tanto na substituição de parte da massa de cimento quanto na produção do próprio cimento, eleva os níveis de degradação em ambientes com a presença de sulfatos, sendo observado a formação de taumasita, mesmo em temperaturas mais elevadas, além de etringita, gesso e brucita (HARTSHORN *et al.*, 2001; TORRES *et al.*, 2003; TSIVILIS *et al.*, 2003; IRASSAR *et al.*, 2005).

Diante disso, espera-se investigar o comportamento de concretos produzidos com a incorporação do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais frente a ação de

sulfato de magnésio a temperatura ambiente, buscando compreender o aspecto benéfico ou maléfico da utilização desse filer em ambiente agressivos.

Capítulo 3

Programa Experimental, Materiais e Métodos

3 Programa Experimental, Materiais e Métodos

Após o embasamento científico e técnico realizado neste trabalho, foi possível observar a possibilidade da utilização do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais como um material potencial a ser incorporado na matriz cimentícia, sendo uma alternativa para a produção de novos materiais de construção.

Como o objetivo desse trabalho é avaliar o comportamento do concreto com a incorporação desse resíduo frente ao ataque de sulfato de magnésio, as hipóteses levantadas serão verificadas através de um programa experimental. Portanto, neste capítulo será apresentado o programa experimental que engloba tanto a caracterização dos materiais utilizados na produção do concreto, quanto os procedimentos e métodos utilizados para se atingir os objetivos propostos.

O programa experimental procurou abranger (avaliar) as propriedades fundamentais para um concreto considerado durável e resistente à agentes agressivos. Portanto, foram feitos ensaios no estado fresco, como determinação do índice de consistência e massa específica, e no estado endurecido, resistência à compressão axial,

absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão, ataque de sulfatos de magnésio à altas concentrações, além de análises de imagens da microestrutura dos concretos produzidos através da microscopia eletrônica de varredura (MEV). Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaio em Materiais de Construção do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo (LEMAC-UFES) e no Laboratório de Caracterização de Superfícies dos Materiais também do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo.

Ao final dos experimentos, os resultados foram analisados estatisticamente com o auxílio de *software* específico, para ordenar e estruturar os dados, procurando tendências, diferenças e variações das informações obtidas para transformá-las em conclusões.

3.1 Planejamento dos Experimentos

O planejamento experimental é uma técnica que auxilia na determinação das diversas variáveis que irão influenciar nos resultados de um determinado processo. De acordo com Ribeiro e Caten (2010), essa metodologia está apoiada nos conceitos da estatística e tem como objetivo otimizar o planejamento, a execução e a análise de um experimento.

Button (2012) salienta que, de acordo com o objetivo dos ensaios, o planejamento experimental pode determinar e atribuir valores às variáveis que mais influenciam nos resultados de modo a minimizar a variabilidade dos mesmos e a influência das variáveis incontroláveis.

Para Ribeiro e Caten (2010) essas variáveis que mais influenciam no resultado são denominadas fatores controláveis, que são escolhidos para serem estudados a vários níveis no experimento. As variáveis incontroláveis também chamadas de fatores de ruído são as responsáveis pelo erro experimental ou variabilidade residual. Além desses, os mesmos autores também listam os fatores invariáveis, que se mantêm constantes durante todo o experimento.

Neste trabalho estão estabelecidas três tipos de variáveis do problema: variáveis dependentes, variáveis independentes e variáveis de controle, como seguem.

3.1.1 Variáveis Dependentes

São aquelas cujo comportamento se quer verificar em função das oscilações das variáveis independentes, ou seja, correspondem àquilo que se deseja prever e/ou obter como **resultado**. Ocorrem em função da realização do experimento (são os resultados do experimento). Neste trabalho, as variáveis dependentes são:

- Consistência do concreto
- Massa específica do concreto no estado fresco
- Resistência à compressão axial
- Absorção por imersão
- Absorção por capilaridade

3.1.2 Variáveis Independentes

São aquelas que se introduz **intencionalmente** para verificar a relação entre suas variações e o comportamento de outras variáveis. Ocorrem por ações do pesquisador quando da realização do experimento. As variáveis independentes escolhidas neste trabalho são:

- Percentual de incorporação do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais em relação à massa de cimento em quatro níveis (0%, 5%, 10% e 15%);
- Relação água/cimento em três níveis (0,45; 0,55 e 0,65);

3.1.3 Variáveis de Controle

São variáveis que **não são diretamente objeto de estudo**, mas que também interferem na relação entre as variáveis independentes e dependentes e também no resultado dos experimentos, portanto devem ser controlados.

- Características dos agregados constantes;
- Procedimento de mistura constante;
- Procedimento de cura (umidade e temperatura);

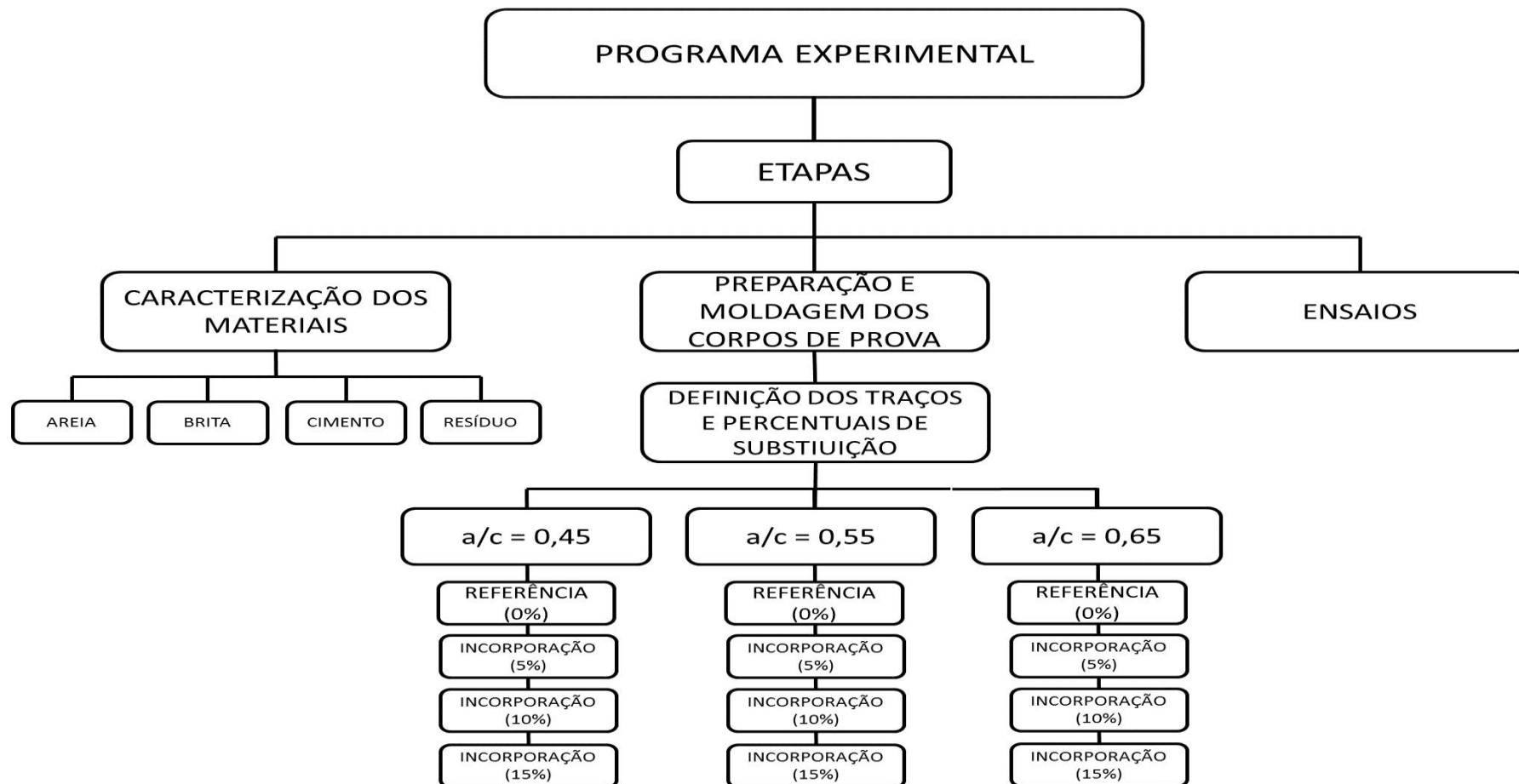
- Idade do ensaio (28 dias);
- Concentração íons sulfatos na solução;

3.2 Programa experimental

Para alcançar os objetivos estabelecidos nessa pesquisa, o programa experimental foi dividido em três etapas conforme a Figura 18.

.

Figura 18 – Programa Experimental - Geral



Fonte: produção da autora

Foram estabelecidas três relações água/cimento, 0,45, 0,55 e 0,65, e quatro misturas variando a porcentagem de incorporação do resíduo, que foi de 0, 5, 10 e 15% em relação à massa de cimento. Esses parâmetros foram estabelecidos a partir da revisão bibliográfica conforme estudos de Almeida *et al.* (2007), Binici, Kaplan e Yilmaz (2007), Binici *et al.* (2007) e Almeida, Branco e Santos (2007).

Através do programa experimental buscou-se estudar o comportamento do concreto com diferentes relações a/c e diferentes percentuais de incorporação do resíduo frente ao ataque de íons sulfato. Como não existem normas brasileiras para essa avaliação adaptou-se a metodologia de ensaios usada por Costa (2004), que em sua tese estudou as propriedades mecânicas de concretos produzidos com três tipos de cimento e três tipos de agregado graúdos submetidos a três soluções de sulfato de magnésio, em três idades distintas. Os demais procedimentos experimentais foram executados conforme as normas brasileiras com o intuito de validar os resultados dessa dissertação.

Os ensaios realizados nos concretos foram divididos em duas etapas: propriedades no estado fresco e propriedades no estado endurecido, realizados conforme o programa experimental apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Resumo do programa experimental realizado nos concretos

(continua)

CONCRETO						
Ensaio	Tipo do CP	Idade	a/c			
			0,45	0,55	0,65	
Referência (0%)	Índice de consistência (ABNT NBR NM 67:1998)	Amostras da preparação dos CP's	-	-	-	-
	Massas específica (ABNT NBR 9833:2009)	Amostras da preparação dos CP's	-	-	-	-
	Resistência à compressão axial - Fc controle (ABNT NBR 5739:2007)	10x20cm	28	6	6	6
	Absorção de água por imersão (ABNT NBR 9778:2009)	10x20cm	28	3	3	3
	Absorção de água por capilaridade (ABNT NBR 9779:2012)	10x20cm	28	3	3	3
	Ataque por sulfatos (COSTA, 2004)	10x20cm	28	6	6	6
	Análise Microestrutural	Fragmentos de um CP cilíndrico de 10x20cm	28	1	1	1
5% de RBRO	Índice de consistência (ABNT NBR NM 67:1998)	Amostras da preparação dos CP's	-	-	-	-
	Massas específica (ABNT NBR 9833:2009)	Amostras da preparação dos CP's	-	-	-	-
	Resistência à compressão axial - Fc controle (ABNT NBR 5739:2007)	10x20cm	28	6	6	6
	Absorção de água por imersão (ABNT NBR 9778:2009)	10x20cm	28	3	3	3

(conclusão)						
CONCRETO						
	Ensaio	Tipo do CP	Idade	a/c	3	3
				0,45	0,55	0,65
	Análise Microestrutural	Fragmentos de um CP cilíndrico de 10x20cm	28	1	1	1
10% de RBRO	Índice de consistência (ABNT NBR NM 67:1998)	Amostras da preparação dos CP's	-	-	-	-
	Massas específica (ABNT NBR 9833:2009)	Amostras da preparação dos CP's	-	-	-	-
	Resistência à compressão axial - Fc controle (ABNT NBR 5739:2007)	10x20cm	28	6	6	6
	Absorção de água por imersão (ABNT NBR 9778:2009)	10x20cm	28	3	3	3
	Absorção de água por capilaridade (ABNT NBR 9779:2012)	10x20cm	28	3	3	3
	Ataque por sulfatos (COSTA, 2004)	10x20cm	28	6	6	6
	Análise Microestrutural	Fragmentos de um CP cilíndrico de 10x20cm	28	1	1	1
15% de RBRO	Índice de consistência (ABNT NBR NM 67:1998)	Amostras da preparação dos CP's	-	-	-	-
	Massas específica (ABNT NBR 9833:2009)	Amostras da preparação dos CP's	-	-	-	-
	Resistência à compressão axial - Fc controle (ABNT NBR 5739:2007)	10x20cm	28	6	6	6
	Absorção de água por imersão (ABNT NBR 9778:2009)	10x20cm	28	3	3	3
	Absorção de água por capilaridade (ABNT NBR 9779:2012)	10x20cm	28	3	3	3
	Ataque por sulfatos (COSTA, 2004)	10x20cm	28	6	6	6
	Análise Microestrutural	Fragmentos de um CP cilíndrico de 10x20cm	28	1	1	1
Total de CP's						228

Fonte: produção da autora

3.3 Materiais

Para a preparação dos corpos de prova foram utilizados os seguintes materiais: brita, água potável fornecida pela concessionária local (CESAN), cimento CPV ARI, areia quartzosa e o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) proveniente de uma empresa do município de Serra, ES. As características destes materiais estavam conforme o exigido pelas normas técnicas nacionais e/ou internacionais quando a eles aplicáveis, assim como as etapas de caracterização, armazenamento e utilização dos mesmos obedeceram ao disposto por essas normas.

3.3.1 Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado foi proveniente da britagem de rochas graníticas e gnáissicas da região da Grande Vitória e com as características exigidas pela norma

NBR 7211 (ABNT, 2009). A fim de remover impurezas que pudessem influenciar nas propriedades do concreto, o agregado foi lavado com auxílio de uma peneira de 5/8 polegadas (16 mm) e depois seco ao ar e acondicionado em tambores plásticos. A caracterização desse material foi executada no LEMAC/UFES e os resultados são apresentados na Tabela 6.

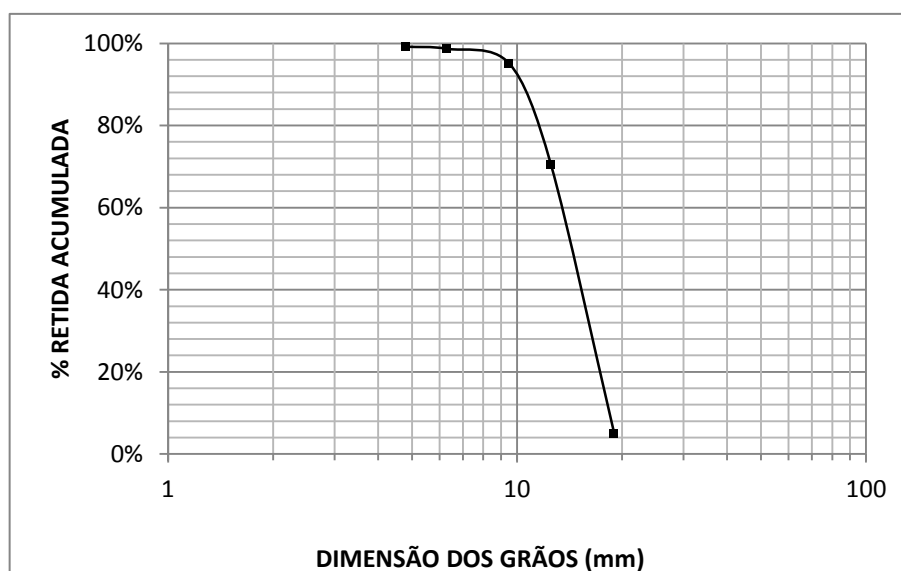
Tabela 6 - Caracterização do agregado graúdo

Propriedades	Método de Ensaio	Resultados
Análise Granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	Ver Figura 19
Dimensão Máx.Característica (mm)	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	19mm
Módulo de Finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	3,68
Massa Específica (g/cm ³)	NBR NM 53 (ABNT, 2009)	2,76
Massa Unitária no Estado Solto (g/cm ³)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1,49
Absorção de Água	NBR NM 53 (ABNT, 2009)	0,34

Fonte: produção da autora

Conforme a classificação dos limites da composição granulométrica apresentada na NBR 7211 (ABNT, 2005), a distribuição granulométrica do agregado graúdo utilizado atendeu à norma, tendo os seus limites próximo da zona granulométrica 9,5/25. A curva granulométrica do agregado em questão é apresentada na Figura 19.

Figura 19 - Curva granulométrica do agregado graúdo de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003)



Fonte: produção da autora

3.3.2 Cimento

O cimento utilizado na preparação dos concretos foi do tipo Portland de alta resistência inicial – CPV ARI de acordo com a norma NBR 5733 (ABNT, 1991). Foi

escolhido esse cimento por conter menor teor de adições, entre os disponíveis no mercado nacional, possibilitando uma melhor avaliação do efeito da incorporação do resíduo.

Os sacos de cimento foram colocados em sacos plásticos fechados e armazenados sobre *pallets* em câmara seca com temperatura e umidade controladas, para manter suas propriedades físicas e químicas.

A caracterização física do cimento foi determinada no LEMAC/UFES e caracterização química referente ao lote utilizado foi fornecida pelo fabricante. Os resultados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Caracterização do cimento CPV ARI

Propriedades		Resultados	Método de Ensaio	Limites
Massa específica (g/cm ³)		2,823	NBR NM 23 (ABNT, 2001)	N.E.
Finura	Área específica - Blaine (m ² /kg)	4459	NBR NM 76 (ABNT, 1998)	≥ 3000
	Material retido na peneira 200 (%)	0,1	NBR 9202 (ABNT, 1985)	N.E.
Tempos de Pega	Início de Pega (minutos)	128	NBR NM 65 (ABNT, 2002)	≥ 60
	Fim de Pega (minutos)	181	NBR NM 65 (ABNT, 2002)	≤ 600
Resistência à compressão	1 dia (MPa)	29,4	NBR 7215 (ABNT, 1997)	≥ 14
	3 dias (MPa)	42,2	NBR 7215 (ABNT, 1997)	≥ 24
	7 dias (MPa)	46,0	NBR 7215 (ABNT, 1997)	≥ 34
Composição Química	Perda ao fogo - PF (%)	3,84	NBR NM 18 (ABNT, 2004)	≤ 4,5
	SiO ₂ (%)	18,65	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	CaO (%)	63,72	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	MgO (%)	0,75	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	Al ₂ O ₃ (%)	4,91	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	Fe ₂ O ₃ (%)	2,97	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	K ₂ O (%)	0,80	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	SO ₃ (%)	2,87	NBR 14656 (ABNT, 2001)	≤ 4,5
	C ₃ A teórico	7,66	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	Resíduo Insolúvel - RI (%)	0,75	NBR NM 15 (ABNT, 2004)	≤ 1,0

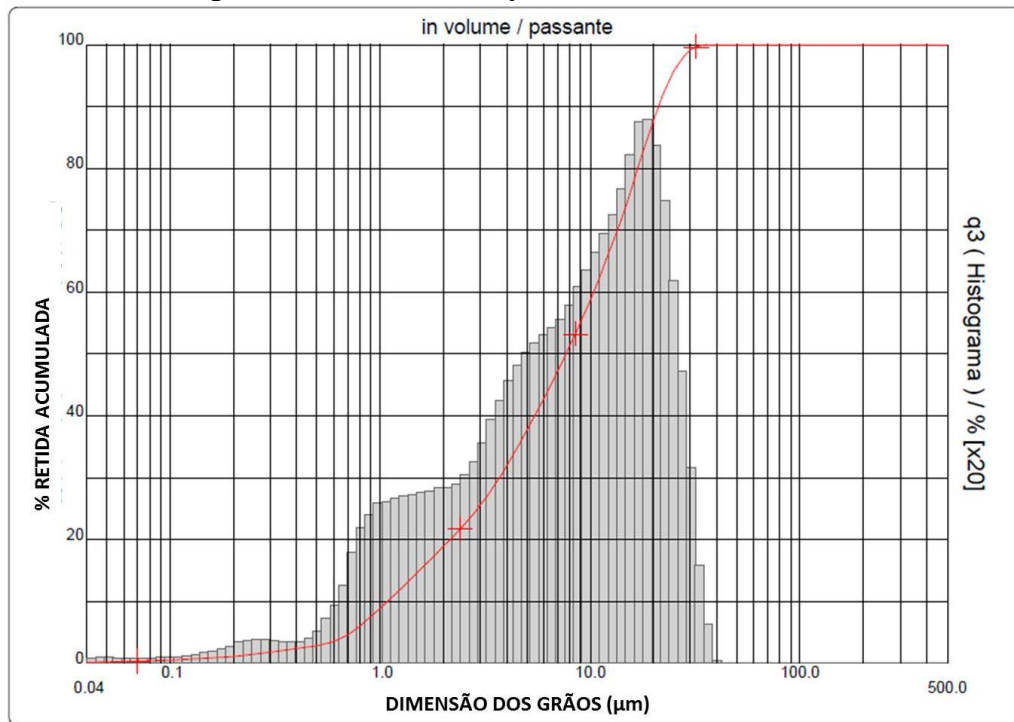
Obs.: Limites estabelecidos com base na NBR 5733 (ABNT, 1991)

N.E = Não Estabelecido

Fonte: produção da autora

A distribuição granulométrica foi realizada no Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (LDCM) localizado em Santa Catarina, através de granulômetro a laser modelo 1064 da marca CILAS, pelo método de dispersão líquida com a utilização de álcool isopropílico. A curva granulométrica é apresentada na Figura 20.

Figura 20 - Curva de Distribuição Granulométrica do CPV ARI

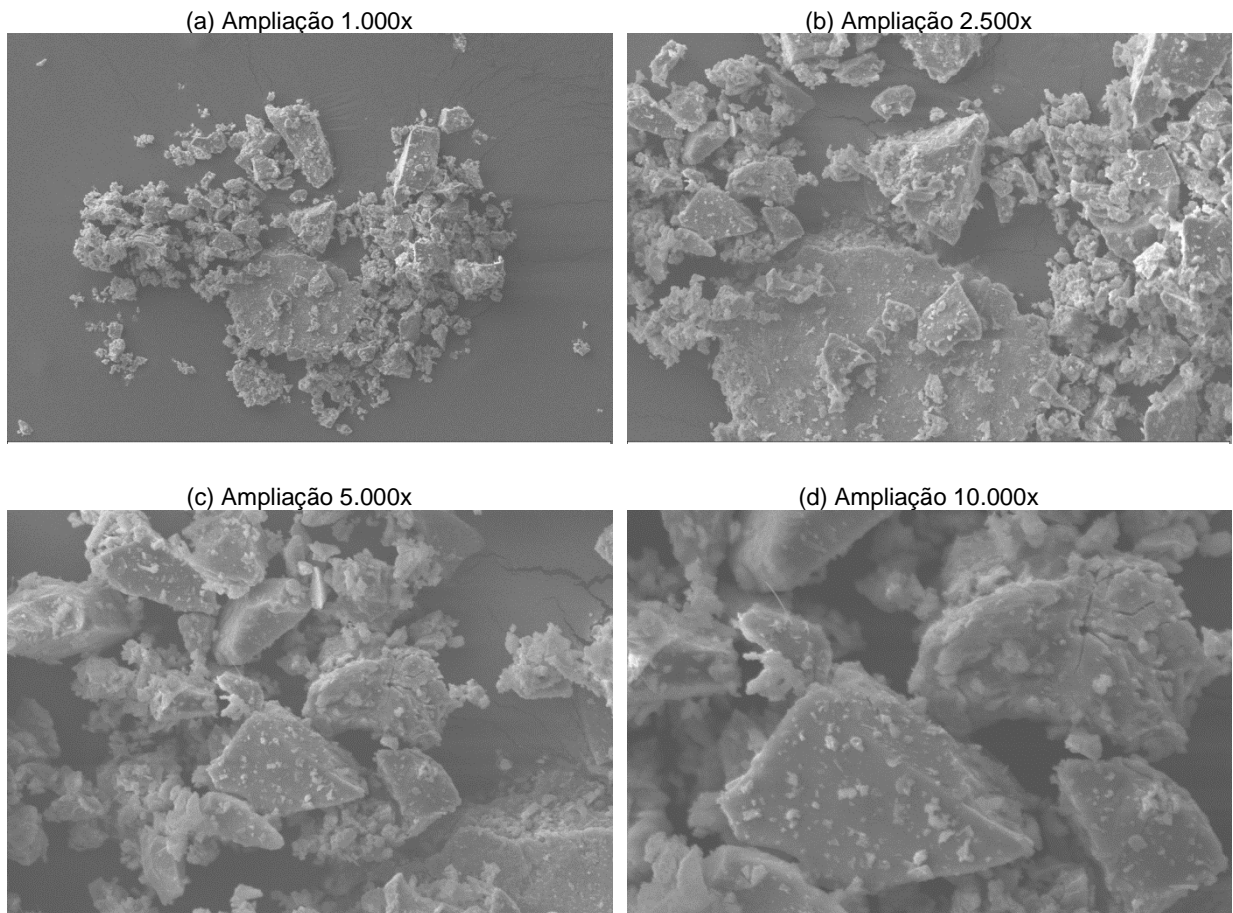


Fonte: produção da autora

Observa-se que os grãos do cimento apresentam valores D10 na ordem de $1,08\mu\text{m}$, D50 na faixa dos $7,68\mu\text{m}$ e D90 com $21,15\mu\text{m}$, sendo o valor médio para tamanho dos grãos na ordem de $9,64\mu\text{m}$.

Foi realizada uma análise microestrutural do cimento a partir de um microscópio eletrônico de varredura, modelo EVO 40 XVP da marca Zeiss, no Laboratório de Caracterização de Superfícies dos Materiais do Programa de Pós - Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo. As imagens geradas são apresentadas na Figura 21.

Figura 21 - Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura das partículas do CPV ARI



Fonte: produção da autora

3.3.3 Agregado Miúdo

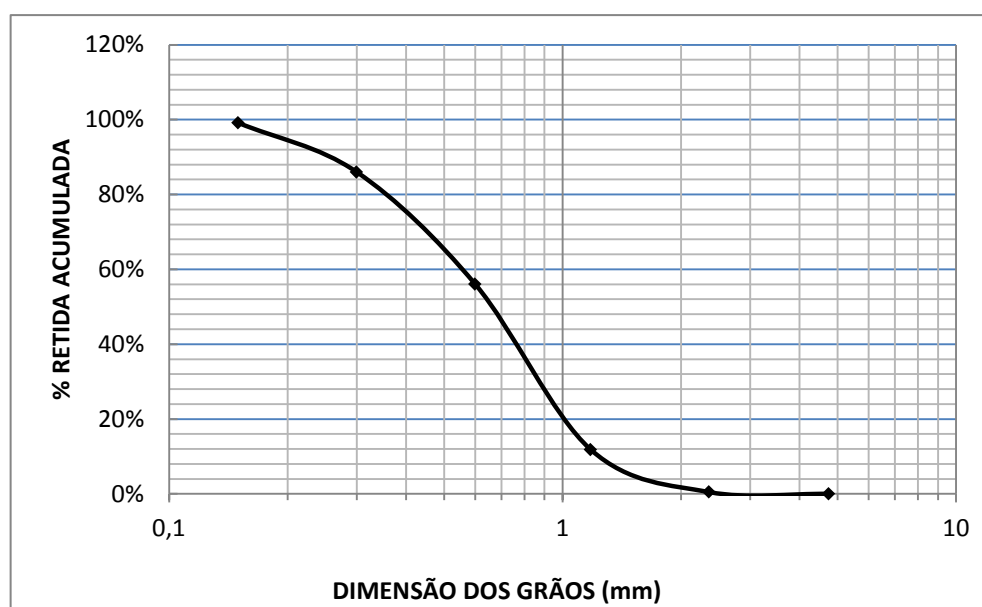
A areia utilizada foi natural, extraída de jazida, encontrada no mercado da região da Grande Vitória e suas características atenderam os limites utilizáveis ou ótimos estabelecidos pela norma NBR 7211 (ABNT, 2009). A areia foi lavada com auxílio de uma peneira nº 14 (1,41 mm) para remover impurezas, seca ao ar e armazenada em tambores plásticos fechados. Os ensaios de caracterização física desse material foram realizados no LEMAC/UFES, sendo os resultados descritos na Tabela 8 e a curva de distribuição granulométrica na Figura 22.

Tabela 8 - Propriedades físicas do agregado miúdo utilizado

Propriedades	Métodos de ensaio	Resultados
Dimensão Máxima Característica (mm)	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	2,36
Módulo de Finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	2,53
Massa Específica (g/cm ³)	NBR NM 52 (ABNT, 2009)	2,64
Massa Unitária (kg/dm ³)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1,42
Material Pulverulento (%)	NBR NM 46 (ABNT, 2003)	0,91%
Teor de Argila e Materiais Friáveis (%)	NBR 7218 (ABNT, 2010)	0,09%
Matéria Orgânica	NBR NM 49 (ABNT, 2001)	Mais clara

Fonte: produção da autora

Figura 22 - Curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo – NBR NM 248 (ABNT, 2003)



Fonte: produção da autora

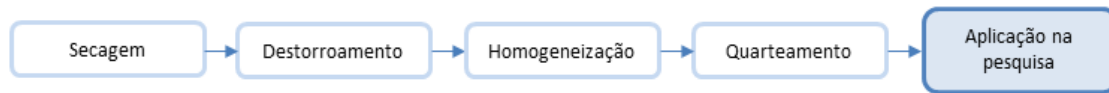
3.3.4 Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais

O resíduo utilizado nesse trabalho foi proveniente de uma empresa de beneficiamento de rochas ornamentais, localizada no município de Serra – ES. O resíduo contém tanto a lama do desdobramento dos blocos, produzida nos teares de fios diamantados quanto a lama do polimento das chapas de rochas.

A coleta do material seguiu o estabelecido pela norma NBR 10007 – Amostragem de resíduos sólidos (ABNT, 2004), sendo coletado de diferentes pontos de armazenagem da serraria e depois armazenado em tonéis plásticos de 20 litros. Ao ser entregue no LEMAC – UFES o material apresentava alta umidade (38,3%).

Sendo assim, foram realizados alguns procedimentos antes de sua caracterização e utilização nessa pesquisa, conforme mostrado na Figura 23.

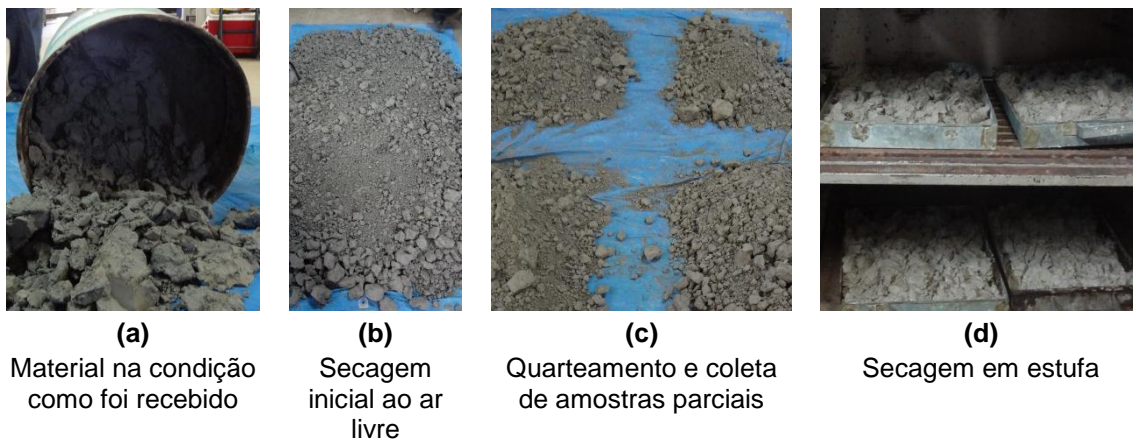
Figura 23 - Processo de preparação do resíduo para aplicação na pesquisa



Fonte: produção da autora

O processo de secagem foi realizado em duas etapas, conforme pode ser observado na Figura 24: primeiramente o material foi distribuído sobre uma lona e seco ao ar, por 48 horas. Seguidamente, o resíduo foi quarteado e coletadas amostras parciais conforme a norma NBR NM 26 (ABNT, 2009), que foram distribuídas em tabuleiros e secas por 24 horas em estufa a 100°C.

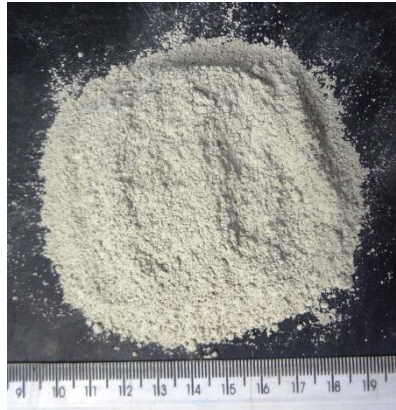
Figura 24 - Processo de secagem do resíduo



Fonte: produção da autora

Após o seu resfriamento o resíduo foi armazenado em sacos plásticos que foram lacrados e depositados sobre *pallets* em câmara seca cuja temperatura e umidade eram controladas. No momento de sua utilização o material era manualmente destorroado com grau e pistilo, homogeneizado e a amostra era reduzida a quantidade necessária, seguindo as orientações da norma NBR NM 27 (ABNT, 2001). Esta metodologia foi adotada com o objetivo de manter a distribuição granulométrica natural do resíduo. A aparência do resíduo ao final deste procedimento pode ser observada na Figura 25.

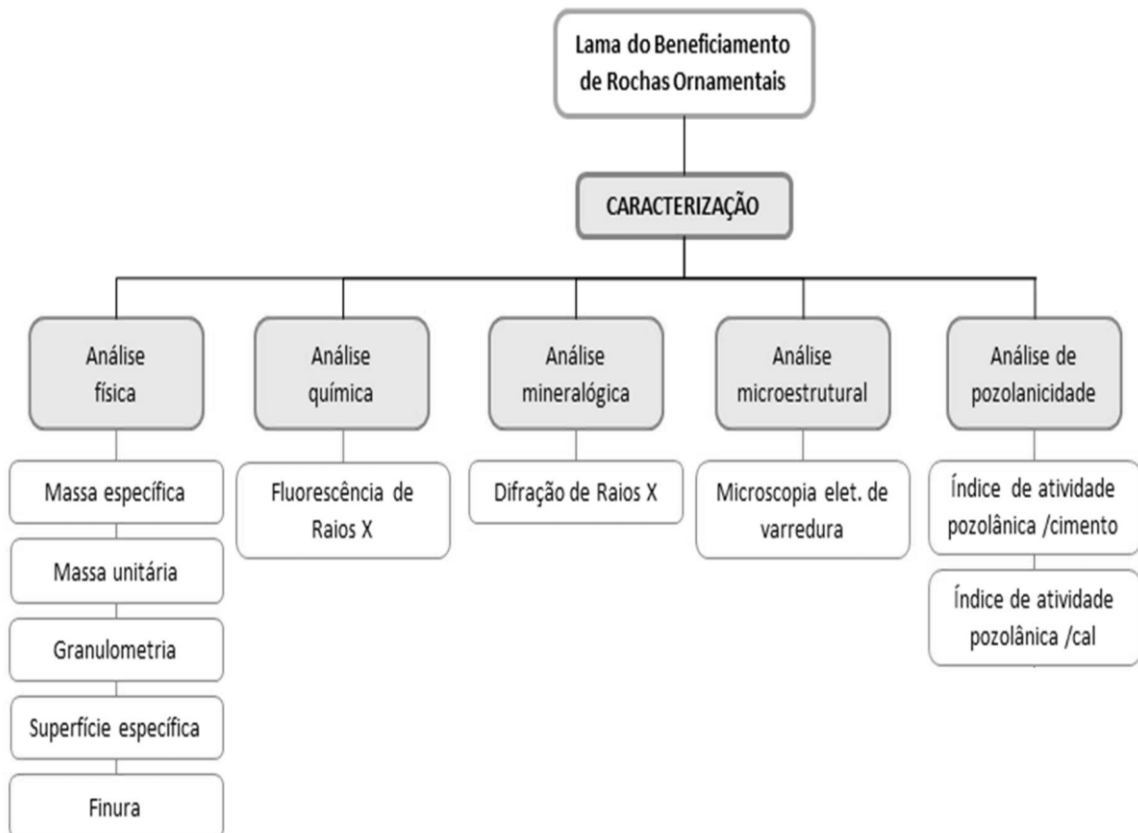
Figura 25 - Aparência final do resíduo utilizado na pesquisa



Fonte: produção da autora

Após essa etapa, o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) foi submetido a diferentes ensaios de caracterização para análise de suas características físicas, químicas, mineralógicas, além da análise microestrutural e do estudo do seu índice de atividade pozolânica. É apresentado na Figura 26 um fluxograma do processo de caracterização do RBRO.

Figura 26 - Programa Experimental – caracterização do resíduo



Fonte: produção da autora

Caracterização Física

Os ensaios de caracterização física foram realizados no LEMAC – UFES, conforme Tabela 9.

Tabela 9 - Métodos de ensaios para caracterização física do resíduo

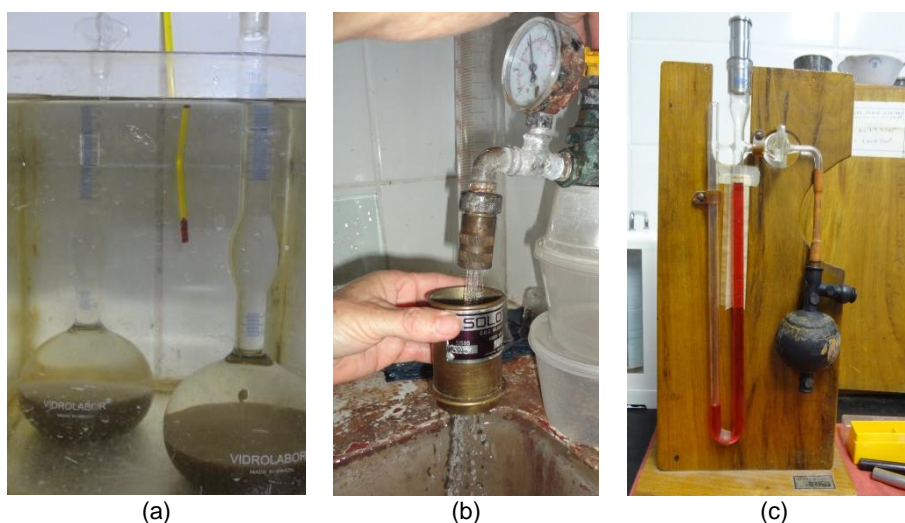
Propriedade	Método de ensaio
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 23 (ABNT, 2001)
Massa unitária	NBR 12127 (ABNT, 1991)
Teor de umidade	NBR NM 24 (ABNT, 2003)
Finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine)	NBR NM 76 (ABNT, 1998)
Finura por meio da peneira 0,075 mm (nº 200)	NBR 11579 (ABNT, 2013)
Finura por meio da peneira 0,044 mm (nº 325)	NBR 9202 (ABNT, 1985)

Fonte: produção da autora

A determinação da massa específica seguiu os procedimentos estabelecidos para o cimento Portland e outros materiais em pó por meio do frasco de Le Chatelier verificando o deslocamento do líquido no interior do recipiente após a inserção de material, conforme Figura 27 (a).

A finura pode ser analisada a partir da área superficial do material, o que impacta significativamente nas propriedades reativas. Essa análise foi executada por meio de percentual retido nas peneiras nº 200 e nº 325 e pelo método de Blaine conforme Figura 27 (b) e (c) respectivamente.

Figura 27 - Ensaios de massa específica (a), finura por meio da peneira nº 325 (b) e método da permeabilidade de Blaine (c).



Fonte: produção da autora

A análise granulométrica do resíduo foi realizada por granulometria a laser pelo método de dispersão líquida com a utilização de álcool isopropílico, através de um granulômetro a laser da marca Sympatech. Esse ensaio foi realizado pelo Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais do SENAI de Criciúma/SC.

Análise Química

A caracterização química quanto à composição foi realizada através da técnica de espectrometria de fluorescência de raios-x pelo Laboratório Químico e de Monitoramento Ambiental da empresa Vale.

Análise Mineralógica

Quanto à caracterização mineralógica esta foi realizada após o material ser moído o suficiente para passar pela peneira nº 200. A partir daí foi acondicionado em porta-amostras de alumínio para análise no equipamento XRD 6000 da Shimadzu, com a técnica de difração de raios-x.

Os parâmetros adotados para a análise das amostras foram a voltagem de 40 kV e corrente de 30 mA, sistema $\theta/2\theta$ com velocidade de varredura de 0,02°/seg e varredura 2θ de 10° a 80°. O equipamento adotado tem como fonte de energia um filamento de tungstênio (catodo) e o tubo de raios X é de cobre (ânodo), cujos comprimentos de onda são $K\alpha$ 1,5418 Å e $K\beta_1$ 1,3922 Å.

Os difratogramas foram gerados com a utilização do software do difratômetro a partir do computador conectado a ele conforme Figura 28 sendo possível interpretar os gráficos com a utilização do banco de dados do Joint Committee for Powder Diffraction Standards (JCPDS) do International Centre for Diffraction Data (ICDD).

Figura 28 - Ensaio de difração de raios X (a) difratômetro e (b) computador com software.

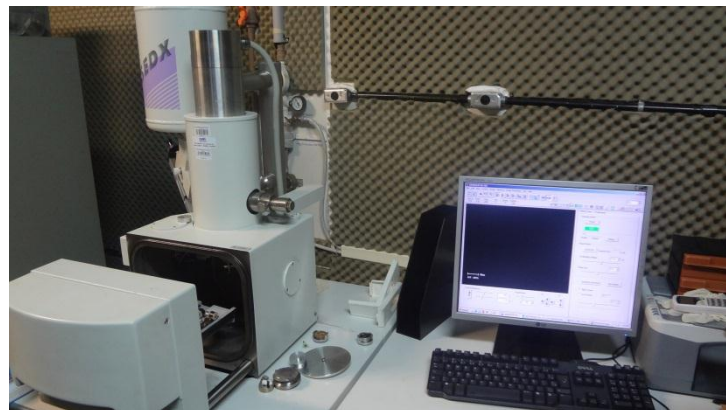


Fonte: produção da autora

Análise Microestrutural

A micrografia do resíduo foi obtida por microscópio eletrônico de varredura, modelo EVO 40 XVP da marca Zeiss (Figura 29), no Laboratório de Caracterização de Superfícies dos Materiais do Programa de Pós - Graduação em Engenharia Mecânica da UFES.

Figura 29 - Microscópio eletrônico de varredura



Fonte: produção da autora

Através das imagens geradas por microscopia eletrônica de varredora foi possível analisar a composição química das partículas do resíduo utilizando a espectroscopia de energia dispersiva (EDS) acoplado ao instrumento.

Análise de Pozolanicidade

A análise do índice de atividade pozolânica realizada no resíduo seguiu as normas NBR 5751: Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com a cal (ABNT, 1992) e NBR 5752: Materiais pozolânicos

– Determinação de atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com o cimento (ABNT, 1992).

Foram preparados três corpos de prova de referência e três de uma argamassa com 35% de substituição do aglomerante pelo material a ser analisado, com a devida compensação de volumes (conforme explicado no item 3.4.1.1). Foram utilizadas 234 g de cada uma das quatro frações de areia padrão (1,2; 0,6; 0,3 e 0,15 mm) beneficiada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e a água utilizada foi fornecida pela concessionária pública de abastecimento e usada em quantidade suficiente para obtenção de um índice de consistência da argamassa em 225 ± 5 mm, analisado de acordo com a NBR 7215 – Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão (ABNT, 1997).

O cimento utilizado para a realização do ensaio de índice de atividade pozolânica com cimento Portland foi o CPV ARI. Apesar da norma NBR 5752 (ABNT, 1992) determinar o uso do cimento CP I não foi possível adotá-lo, pois este não se encontra disponível no mercado. Por esse motivo, o CP I foi substituído pelo CPV ARI por ser o tipo de cimento com menor teor de adições.

A cal utilizada foi a CH I conforme determina a norma NBR 5751 (ABNT, 1992) com massa específica igual a $2,07 \text{ g/cm}^3$ verificada no LEMAC conforme a NBR NM 23 (ABNT, 2001).

3.4 Métodos

3.4.1 Estudo de dosagem e preparo dos concretos

A partir da revisão bibliográfica observou-se que os melhores resultados de desempenho mecânico do concreto foram com a utilização de até 5% de resíduo (GONÇALVES, 2000; ALMEIDA *et al.*, 2007, ALMEIDA, BRANCO e SANTOS, 2007, MÁRMOL *et al.*, 2010; ARUNTAS *et al.* 2010) e os melhores comportamentos quanto à durabilidade do concreto foram com valores de 10% de resíduo (ALMEIDA *et al.*, 2007; HAMAEEED e SEKAR, 2009; GENCEL *et al.*, 2012;). Portanto, com o intuito de confirmar esses desempenhos, os teores de incorporação do resíduo em relação à massa de cimento adotados para essa pesquisa serão de 5%, 10% e 15% além do concreto sem resíduo, que será o concreto de referência (0%).

Conforme os trabalhos de Kakali *et al.* (2003), Irassar *et al.* (2005) e Senhadji *et al.* (2010) que estudaram a ação do sulfato de magnésio em matrizes cimentícias com relações água/cimento variando entre 0,40 à 0,70, foi estabelecido para essa pesquisa três relações água/cimento, 0,45, 0,55 e 0,65, para observar a variação da agressão do sulfato de magnésio para diferentes relações a/c.

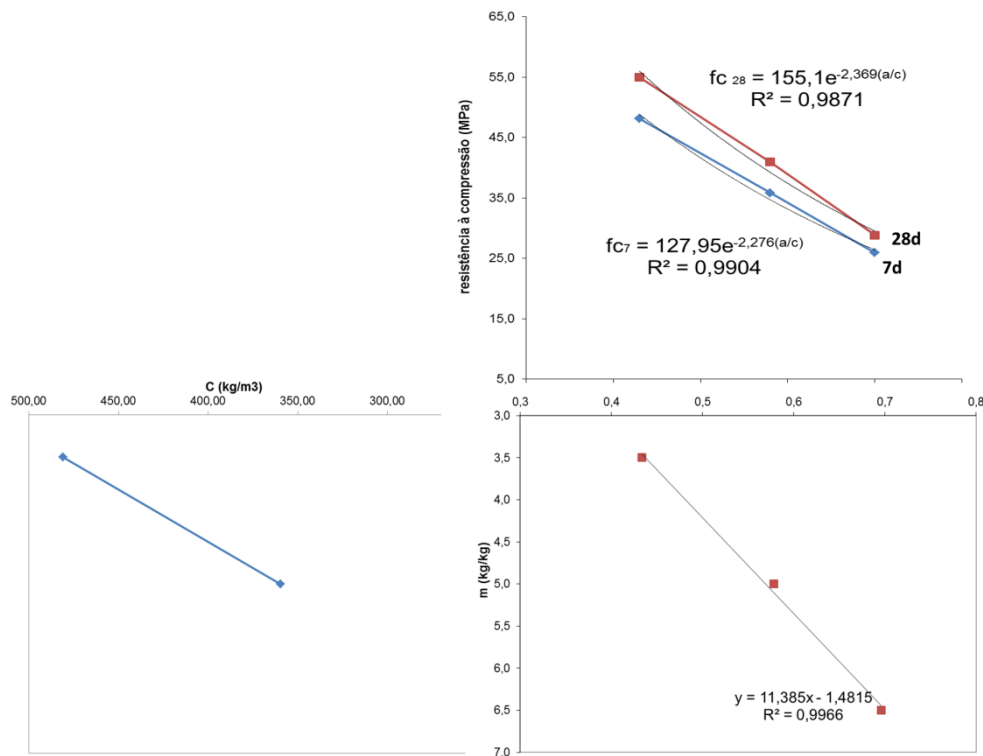
Para preparação dos concretos foi utilizado o método de dosagem do IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992), que estabelece que a melhor proporção entre os agregados é aquela que consome a menor quantidade de água para obtenção de uma trabalhabilidade previamente definida. Com isso é fixado um valor do abatimento e, a partir daí, busca-se um teor ideal de argamassa para um determinado traço, sendo esse o traço intermediário. Outros dois traços são feitos com menos e mais cimento, chamados de traço pobre e traço rico respectivamente.

3.4.1.1 Ajuste do teor ideal de argamassa

Baseado na NBR NM 67 (ABNT,1998) foi estabelecido para a produção dos concretos um abatimento de 70mm \pm 10mm e, a partir daí, buscou-se o teor ideal de argamassa. Para esse valor de abatimento o teor de argamassa foi de 52% para um traço de 1:5, sendo esse o traço intermediário. A partir daí o traço pobre e o rico foram feitos, com valores de 1:6,5 e 1:3,5 respectivamente. Com esses três traços foi possível abranger todos os níveis de relação água/cimento estabelecidos para essa pesquisa (0,45, 0,55, 0,65).

A partir dessas dosagens foram moldados doze corpos de prova para cada um dos três traços e a resistência à compressão foi realizada aos 7 e aos 28 dias para obtenção de um diagrama de dosagem (Figura 30).

Figura 30 – Diagrama de dosagem



Fonte: produção da autora

A partir dos diagramas foi possível estabelecer os traços para cada relação a/c proposta para essa pesquisa conforme mostrado na Tabela 10.

Tabela 10 - Nomenclatura dos traços unitários moldados de acordo com os percentuais de adição de resíduo e a relação a/c

Identificação	Cimento	Areia	Brita	RBRO	Relação a/c	Consumo de cimento (kg/m³)
Referência						
CREF 45	1	1,46	2,18	-	0,45	466
CREF 55	1	2,06	2,72	-	0,55	375
CREF 65	1	2,67	3,25	-	0,65	313
5% de RBRO						
CR5 45	1	1,46	2,18	0,044	0,45	462
CR5 55	1	2,06	2,72	0,044	0,55	372
CR5 65	1	2,67	3,25	0,044	0,65	312
10% de RBRO						
CR10 45	1	1,46	2,18	0,089	0,45	458
CR10 55	1	2,06	2,72	0,089	0,55	370
CR10 65	1	2,67	3,25	0,089	0,65	310
15% de RBRO						
CR15 45	1	1,46	2,18	0,133	0,45	454
CR15 55	1	2,06	2,72	0,133	0,55	367
CR15 65	1	2,67	3,25	0,133	0,65	308

Fonte: produção da autora

Para o cálculo da quantidade em massa de resíduo a ser utilizada, foi necessário fazer uma compensação de volumes, uma vez que a massa específica do cimento ($\gamma_{\text{cim}} = 2,823\text{g/cm}^3$) é diferente da massa específica do resíduo ($\gamma_{\text{RBRO}} = 2,525\text{g/cm}^3$). Essa compensação é necessária para manter proporção correta da quantidade de resíduo em função do cimento. Para isso utilizou-se a equação (5) abaixo.

$$M_{\text{resíduo}} = M_{\text{cimento}} \times \frac{\gamma_{\text{resíduo}}}{\gamma_{\text{cimento}}}; \quad (5)$$

Onde:

$$\begin{array}{l} M_{\text{resíduo}} = \text{massa do resíduo, em kg} \\ M_{\text{cimento}} = \text{massa do cimento, em kg} \end{array} \quad \left| \quad \begin{array}{l} \gamma_{\text{resíduo}} = \text{massa específica do resíduo, em kg/dm}^3 \\ \gamma_{\text{cimento}} = \text{massa específica do cimento, em kg/dm}^3 \end{array} \right.$$

3.4.1.2 Mistura dos materiais e moldagem dos corpos de prova

A partir dos traços apresentados os concretos foram produzidos em uma betoneira de eixo inclinado (*Mecânica Alfa S/A*), com capacidade nominal de 350 litros (Figura 31). A sequência de colocação dos materiais se manteve constante: primeiramente era feita a imprimação da betoneira, depois era colocada a brita e metade da quantidade de água, em seguida o cimento e o resíduo para que os mesmos envolvessem de forma homogênea os grãos de brita, depois era colocada a areia e, finalmente, o restante da água.

Figura 31 - Preparação do concreto na betoneira



Fonte: produção da autora

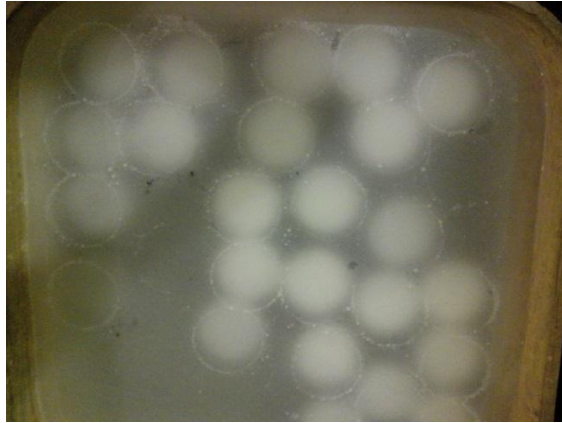
Foram moldados 20 corpos de prova por traço, todos no formato cilíndrico em formas de 10 x 20 cm (diâmetro x altura) seguindo a NBR 5738 (ABNT, 2003). O adensamento foi realizado sempre com o mesmo operador, de forma manual. As

formas eram cobertas (Figura 32) para evitar a evaporação e, após 24 horas os corpos de prova eram desmoldados, identificados e armazenados em câmara úmida. Para manter a umidade adequada para cura, os corpos de prova eram imersos em solução de água saturada de cal e mantidos assim até a idade de 28 dias para realização dos ensaios (Figura 33).

Figura 32 - Concretos moldados e cobertos nas formas cilíndricas



Figura 33 - Corpos de prova imersos em solução de água saturada com cal



Fonte: produção da autora

3.4.2 Ensaios no estado fresco

Após a mistura dos materiais na betoneira eram retiradas amostras do concreto para os ensaios de índice de consistência e massa específica.

O ensaio de índice de consistência foi realizado conforme a norma NBR NM 67 (ABNT,1998), a fim de verificar a influência do resíduo na consistência e trabalhabilidade do concreto (Figura 34).

Figura 34 - Ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone



Fonte: produção da autora

O ensaio de determinação da massa específica foi realizado de acordo com a NBR 9833 (ABNT, 2009).

3.4.3 Ensaio no estado endurecido

No estado endurecido foram realizados os ensaios mecânicos de resistência à compressão, absorção de água por imersão e absorção de água por capilaridade. Para apreciação morfológica foi realizada uma análise microestrutural de fragmentos dos concretos (microscopia eletrônica de varredura).

Os corpos de prova foram mantidos imersos em tanques com água saturada de cal até a data de cada ensaio, atendendo as prescrições estabelecidas pelas normas brasileiras.

3.4.3.1 Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado no LEMAC/UFES com o auxílio de uma prensa *Amsler* (Figura 35) seguindo a metodologia da NBR 5739 (ABNT, 2007). Antes da realização do ensaio, os corpos de prova eram retificados em uma retífica vertical (Figura 36), a fim de manter suas faces planas e regulares, garantindo uma melhor distribuição da carga durante o ensaio.

Figura 35 - Prensa utilizada para o ensaio de resistência à compressão axial



Fonte: produção da autora

Figura 36 - Retífica utilizada para regularização dos corpos de prova



Fonte: produção da autora

3.4.3.2 Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão foi realizado nos concretos aos 28 dias de idade, conforme a metodologia descrita na NBR 9778 (ABNT, 2009) (Figura 37). Para esse ensaio foram moldados 3 corpos de prova por traço, totalizando 36 corpos de prova. Todos eles foram moldados e curados conforme já descrito anteriormente.

Figura 37 - Ensaio de absorção de água por imersão

(a) Boiler utilizado para manter a água em ebulição



(b) Corpos de prova imersos em água em ebulição



Fonte: produção da autora

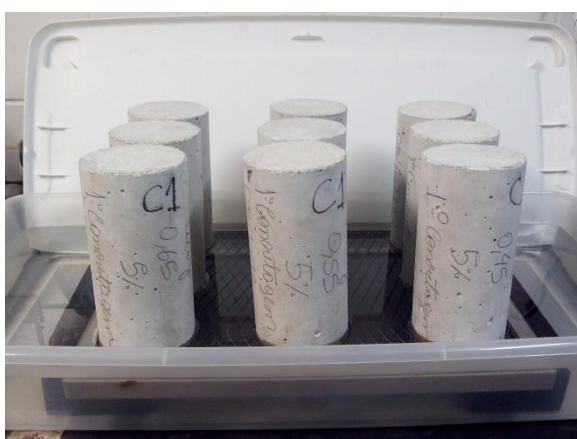
3.4.3.3 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado nos corpos de prova de concreto aos 28 dias conforme a metodologia descrita na NBR 9779 (ABNT, 2013) (Figura 38). Para esse ensaio foram moldados 3 corpos de prova por traço, de acordo com o estabelecido pela norma, totalizando 36 corpos de prova. Todos eles foram moldados e curados conforme já descrito anteriormente. Os cálculos dos índices de absorção foram realizados conforme a equação proposta pela referida norma.

Figura 38 - Ensaio de absorção de água por capilaridade

(a) Corpos de prova durante o ensaio

(b) Corpo de prova rompido para verificação da ascensão capilar



Fonte: produção da autora

3.4.4 Ensaio de agressão por sulfato de magnésio

Como não existem normas brasileiras que padronizem ensaios no que tange o estudo de ataque de sulfatos a concretos, optou-se para essa pesquisa adaptar a metodologia utilizada por Costa (2004) em sua tese de doutorado, cujos concretos das classes C20 e C50 foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial após ciclos de imersão e secagem em solução de sulfato de magnésio.

Neste trabalho o enfoque será o ataque químico externo e suas consequências no concreto. Sendo assim, será utilizado apenas o termo “ataque” e, quando necessário diferenciar, usar-se-á a terminologia “ataque físico” ou “ataque interno”, conforme apresentado no item 2.4.2.

Optou-se utilizar uma solução de sulfato de magnésio ($MgSO_4$) (Figura 39) à uma concentração de 50000 ppm, ou seja, 50g/L. O sulfato de magnésio foi escolhido por ser o mais agressivo para o concreto, dentre os demais (sulfato de cálcio, de sódio e de amônia), como observado na revisão bibliográfica (SILVEIRA, 1996; HARTSHORN, SWAMY e SHARP, 2002; COSTA, 2004; IRASSAR, 2009). A concentração da solução foi estabelecida com o objetivo de acelerar o ataque do sulfato devido ao tempo disponível para a pesquisa.

Figura 39 - Sulfato de magnésio utilizado no ensaio



Fonte: produção da autora

Os corpos de prova eram completamente imersos na solução e permaneciam por 72 horas (Figura 40). Após esse tempo eram retirados da solução e colocados em estufa ventilada à $40^{\circ}C \pm 2^{\circ}C$ por 96 horas (Figura 41), completando, dessa forma, o primeiro ciclo de imersão e secagem. Ao final de quatro ciclos era realizado o ensaio de resistência à compressão axial e análise microestrutural para avaliação do grau de agressão da solução de sulfato.

Figura 40 - Corpos de prova imersos em solução de sulfato de magnésio

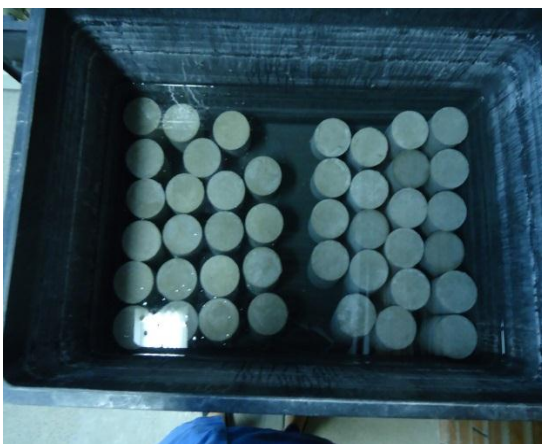


Figura 41 - Corpos de prova em estufa ventilada



Fonte: produção da autora

Para cada traço foram moldados sete corpos de prova, conforme metodologia explicada anteriormente, totalizando 84 CP's, que iniciavam o ciclo de imersão e secagem na idade de 28 dias. Após os quatro ciclos, seis corpos de prova de cada traço foram separados para o ensaio de resistência à compressão axial e um para análise microestrutural.

3.4.5 Análise microestrutural

Com a análise microestrutural é possível fazer uma análise qualitativa de sua durabilidade a partir da observação dos compostos formados em sua matriz. Esses compostos podem ser identificados a partir das imagens geradas no microscópio e também através dos seus elementos químicos, com o uso da Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), acoplada ao microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Segundo Magalhães (2007) as principais fases a serem identificadas através da análise microestrutural são:

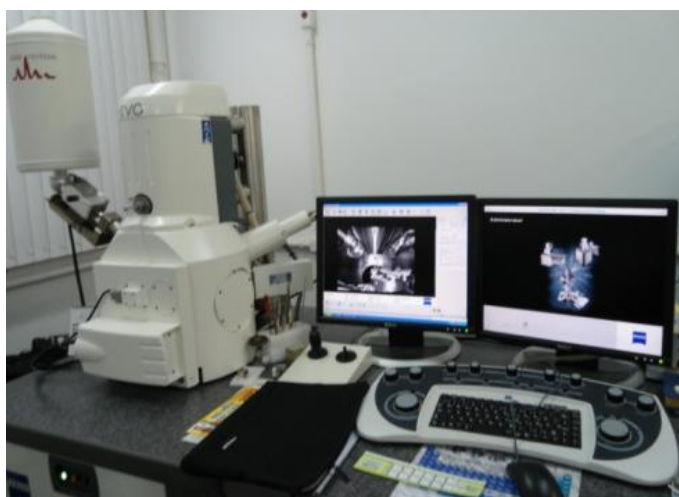
- Silicato de cálcio hidratado (C-S-H): é o principal produto da hidratação do C3S e do C2S, compostos esses que constituem quase 90% do cimento Portland. O C-S-H é responsável pelas características mecânicas e pela durabilidade do concreto.
- Hidróxido de cálcio ou Portlandita (CH ou Ca(OH)_2): é formado no quarto estágio da hidratação do C3S. Nas primeiras idades de hidratação o CH possui a forma de placas hexagonais finas, com o passar da hidratação essas placas perdem o contorno hexagonal e, com a pasta mais madura, sua morfologia se caracteriza por extensos depósitos.
- Sulfoaluminatos de Cálcio ou Etringita ($\text{C}_6\bar{\text{A}}\bar{\text{S}}_3\text{H}_{32}$ ou $6\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (\text{SO}_4)_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$): proveniente da hidratação do C₃A na presença de sulfatos. Responsável pela perda de consistência e início da solidificação da pasta de cimento. Sua morfologia, na forma primária, são bastões finos e longos como agulhas; na fase secundária suas partículas são mais curtas, grossas e com formato hexagonal.
- Monossulfato hidratado ($\text{C}_4\bar{\text{S}}\bar{\text{H}}_{12}$ ou $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$): composto proveniente da hidratação do C₃A na presença de sulfatos. Se após 30 a 40

minutos dessa reação ainda houver C_3A , ocorre uma elevação na concentração de aluminatos, a etringita se torna instável e se converte em monossulfato. Sua estrutura morfológica é de placas hexagonais, com comprimento bem maior que a espessura, que se mantém em torno de $0,1\mu\text{m}$ aproximadamente.

- Taumasita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$): formada quando argamassas ou concretos de cimento Portland contendo carbonato, como calcário ou dolomita, são atacados por íons sulfatos tanto de sódio, magnésio ou cálcio. É estruturalmente relacionada com a etringita (TORRES *et al.*, 2004; NEVILLE e BROOKS, 2013).

Nesta pesquisa as amostras foram analisadas com o auxílio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca Zeiss, modelo EVO 40 XVP (Figura 42).

Figura 42 - Microscópio eletrônico de varredura



Fonte: produção da autora

A análise foi realizada no Laboratório de Caracterização de Superfícies dos Materiais do Programa de Pós - Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo. As amostras inicialmente tinham suas superfícies metalizadas com platina ou com ouro, dependendo da disponibilidade do laboratório, e em seguida eram fixadas com fita metálica no porta amostras e inseridas no microscópio, a partir daí as imagens eram obtidas utilizando o detector de elétrons secundários.

Foi possível realizar também a Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), em que os elementos químicos foram identificados, possibilitando confirmações das fases típicas observadas nas micrografias.

3.4.6 Análise estatística

Para essa pesquisa os resultados serão analisados estatisticamente através da Análise de Variância (ANOVA), pois existem variáveis dependentes numéricas (variáveis respostas) que dependem de mais de uma variável independente (variáveis qualitativas). Com a ANOVA é possível verificar a influência desses fatores controláveis (teor de incorporação de resíduo e relação a/c) sobre as variáveis resposta.

A hipótese que um determinado fator influencia significativamente nos resultados foi analisada através do p -valor adotando um nível de significância nas análises de 5% (p -valor = 0,05), ou seja, estabelece-se que se o p -valor calculado for menor que o adotado, este determinado fator ou interação de fatores exerce influência significativa sobre a variável de resposta analisada.

Portanto, foi utilizado para esse trabalho um nível de confiança de 95% para a ANOVA. As análises foram feitas com o auxílio do *software Statistica 7.0* (STATSOFT, 2004). Essa metodologia foi adotada, pois com a análise de variância é possível comparar vários grupos ou distribuições de forma simultânea.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

4 Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios descritos no programa experimental. Inicialmente são avaliados os resultados dos ensaios realizados para caracterização do RBRO. Em seguida são analisados os resultados dos ensaios nos concretos no estado fresco, determinação do índice de consistência e massa específica, e no estado endurecido, absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão e resistência à compressão axial dos corpos de prova não agredidos e os agredidos por sulfato. Os resultados relativos aos ensaios no estado endurecido foram submetidos a uma análise estatística de variância – ANOVA.

Após a apresentação dos resultados dos ensaios nos concretos no estado endurecido, são apresentados os resultados obtidos pela caracterização da microestrutura destes, a fim de obter associações entre os resultados.

4.1 Caracterização do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO)

A amostra do RBRO foi submetida a ensaios a fim de caracterizá-la quanto às suas características físicas, químicas, mineralógicas além do seu índice de atividade pozolânica.

4.1.1 Caracterização física

A caracterização física do RBRO foi realizada através dos ensaios de determinação da massa específica, massa unitária, composição granulométrica, superfície específica e finura. Os resultados dos ensaios de massa específica, massa unitária e finura estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Caracterização Física do RBRO

Propriedades		RBRO	Limites
Massa específica (g/cm ³)		2,525	N.E.
Massa unitária no estado solto (kg/m ³)		766,3 (kg/m ³)	N.E.
Umidade para utilização na pesquisa – TT0 (%)		0,04	≤ 3,0
Finura	Área específica - Blaine (m ² /kg)	6179,3	N.E.
	Material retido na peneira 200 (%)	3,08	N.E.
	Material retido na peneira 325 (%)	7,00	≤ 34

Obs.: Limites estabelecidos com base nos dados da Classe E de pozolanas descritos NBR 12653: Materiais pozolânicos – Requisitos (ABNT, 2014)

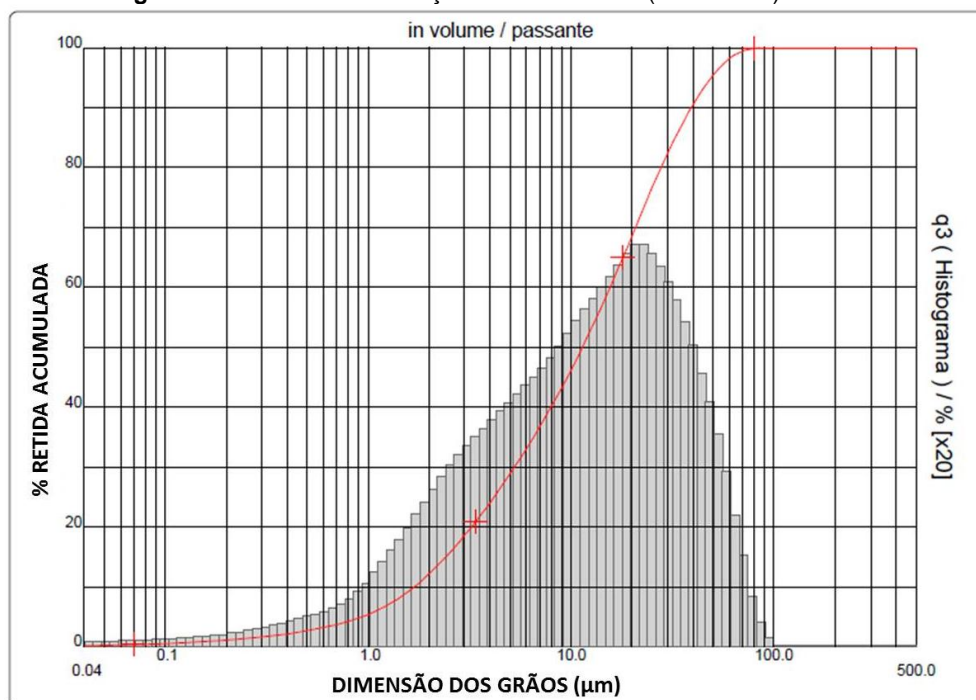
N.E = Não Estabelecido

Fonte: produção da autora

Observa-se que a massa específica do RBRO ($\gamma_{\text{RBRO}} = 2,525\text{g/cm}^3$) é menor que a do cimento ($\gamma_{\text{cim}} = 2,823\text{g/cm}^3$), indicando que tais materiais apresentam composição mineralógica diferentes, isto é, são formados por minerais com diferentes massas específicas. Portanto, foi necessário fazer uma compensação de volumes ao calcular as quantidades de materiais para a dosagem dos concretos. Além disso, através dos resultados de finura, conclui-se que o resíduo é um material mais fino que o cimento.

Quanto à granulometria, na Figura 43 é apresentada a análise dos tamanhos dos grãos do resíduo.

Figura 43 - Curva de Distribuição Granulométrica (acumulada) do RBRO



Fonte: produção da autora

Observa-se que estes apresentam valores D10 na ordem de $1,69\mu\text{m}$, D50 na faixa dos $11,37\mu\text{m}$ e D90 com $39,22\mu\text{m}$, sendo o valor médio para tamanho dos grãos na ordem de $16,38\mu\text{m}$.

4.1.2 Caracterização química

A caracterização química foi realizada por ensaios de perda ao fogo e composição química através da técnica de fluorescência de raios-X (FRX). Os resultados destes ensaios estão descritos na Tabela 12.

Tabela 12 - Caracterização Química do RBRO

		(continua)	
Propriedades		RBRO	Limites
Perda ao Fogo – PF (%)		3,5	$\leq 6,0$
Composição Química	SiO ₂ (%)	66,80	N.E.
	CaO (%)	3,44	N.E.
	MgO (%)	0,93	N.E.
	Al ₂ O ₃ (%)	13,50	N.E.
	Fe ₂ O ₃ (%)	3,79	N.E.
	K ₂ O (%)	3,83	N.E.

Propriedades	(conclusão)	
	RBRO	Limites
Na ₂ O (%)	3,50	N.E.
C (%)	1,11	N.E.
TiO ₂ (%)	0,16	N.E.
SO ₃ (%)	0,06	≤ 5,0
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (%)	85,08	≥ 50,0

Obs.: Limites estabelecidos com base nos dados da Classe E de pozolanas descritos NBR 12653: Materiais pozolânicos – Requisitos (ABNT, 2014)

N.E= Não Estabelecido

Fonte: produção da autora

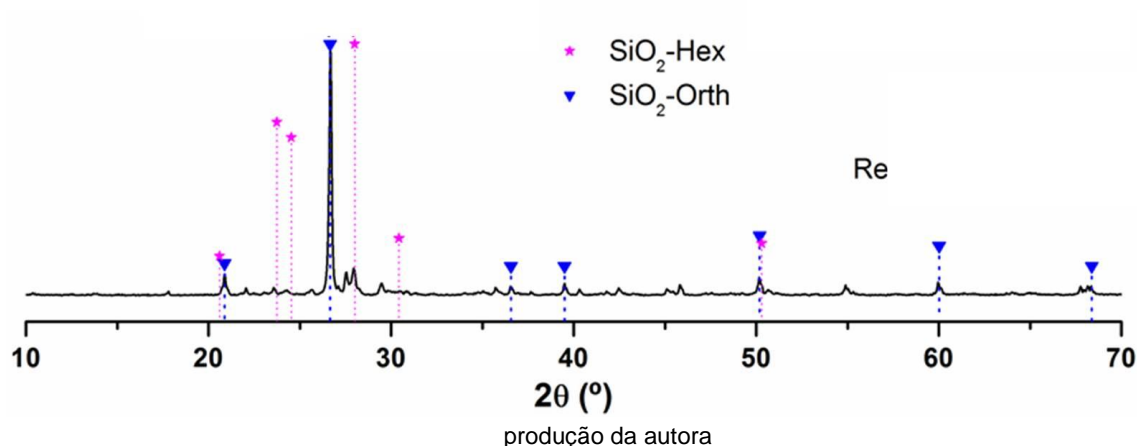
A partir dos resultados da fluorescência de raios-x constata-se a predominância do quartzo sílica (SiO₂) e, secundariamente, do feldspato alumina (Al₂O₃), o que evidencia ser o resíduo sílico-aluminoso. Em menores teores há presença de minerais do grupo das micas (Na₂O e K₂O), compostos estes presentes em rochas graníticas. A presença do óxido de magnésio (MgO), possivelmente, é proveniente do desgaste das sapatas de polimento que são fabricados com cimento sorel, formado por óxidos de magnésio e cloro tipicamente adotados na confecção das coroas abrasivas (DE AZEREDO *et al.*, 2008). Quanto à perda ao fogo, o valor encontrado pode ser referente aos materiais provenientes do polimento, como ceras e resinas, já que a amostra de resíduo estudada possui tanto a lama proveniente do corte dos blocos quanto a lama do polimento das chapas.

4.1.3 Caracterização mineralógica

Por meio do difratograma de raios-X, mostrado na Figura 44, foi possível identificar picos bem definidos de sílica (SiO₂) sob as formações cristalinas hexagonal e ortorrômbica², característica típica de compostos cristalinos quimicamente estáveis, ou seja, com baixa atividade reativa, confirmando a ausência de atividade pozolânica desse material.

² Na estrutura cristalina ortorrômbica, todos os arranjos de átomos (Célula Cristalina) encontram-se em um ângulo de 90°. Por outro lado, no sistema hexagonal um dos ângulos do arranjo atômico é de 120°(CARAM, s.d.).

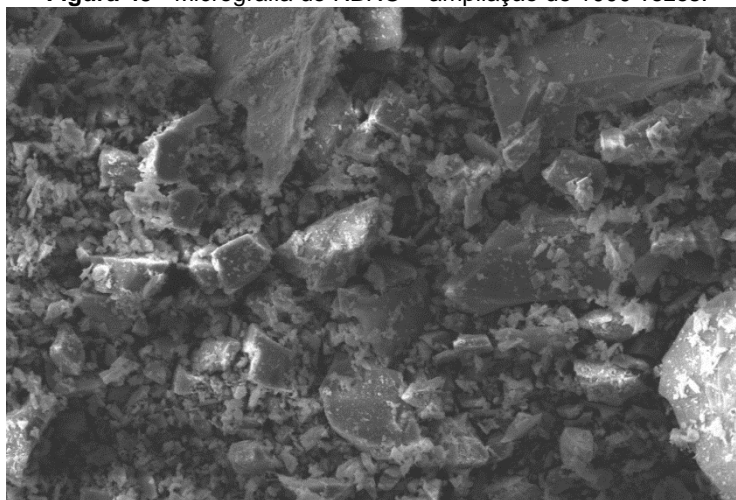
Figura 44 - Difratoograma de raios X do RBRO



4.1.4 Análise microestrutural

Na análise da morfologia de partículas do RBRO, apresentada na Figura 45, é possível observar que o material não apresenta uma forma definida, com grãos de formato anguloso e dimensão entre 0,8 a 25 μm , e alguns um pouco maiores na ordem dos 60 μm .

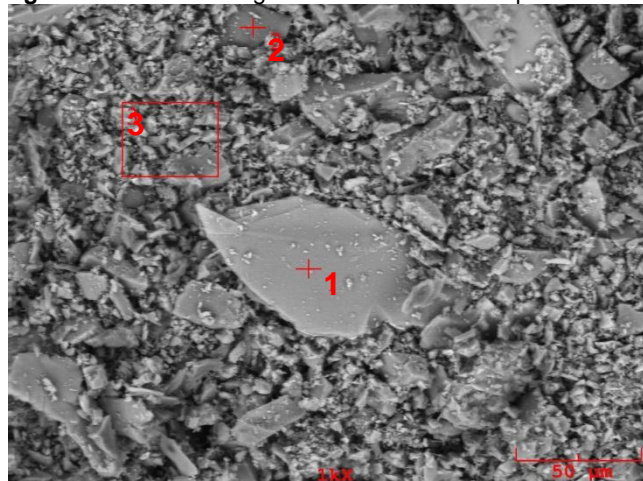
Figura 45 - Micrografia do RBRO – ampliação de 1000 vezes.



Fonte: produção da autora

Através das imagens geradas por microscopia eletrônica de varredora foi possível analisar a composição química das partículas do resíduo utilizando a espectroscopia de energia dispersiva (EDS). Os pontos e a região que foram analisadas estão identificados na Figura 46, e o percentual de elementos químicos presentes nessas áreas estão apresentados na Tabela 13.

Figura 46 - Pontos e região analisados no EDS para o RBRO



Fonte: produção da autora

Tabela 13 - Resultado da análise química do EDS para o RBRO

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

Fonte: produção da autora

Observa-se uma maior porcentagem de silício (Si), seguido por alumínio (Al) e potássio (K). Tais resultados corroboram com a análise química por espectrometria de fluorescência de raios-x, confirmando ser o resíduo sílico-aluminoso.

4.1.5 Índice de atividade pozolânica

Os resultados encontrados na caracterização química e mineralógica indicam que o resíduo é um material com ausência de atividade pozolânica. Para esta constatação compararam-se as propriedades químicas e físicas do RBRO (conforme apresentado na Tabela 11 e Tabela 12) com os limites estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 2014) para a Classe E de material pozolânico, uma vez que o resíduo não se enquadra na classe N (pozolanas naturais), nem na classe C (cinzas volantes).

Quanto aos requisitos químicos e à finura exigida, o RBRO atende as especificações da norma, diante de sua composição química e da baixa granulometria justificada pelo processo produtivo que o gera.

Nos aspectos da verificação da pozolanicidade em argamassas, tanto com cal como com cimento, conforme apresentado na Tabela 14, o resíduo não apresenta resultados dentro dos limites estabelecidos, não se enquadrando nos requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2014) para ser classificado como material pozolânico. Assim sendo, o resíduo na condição que se encontra pode ser considerado como fíler, exercendo um efeito físico em concretos ou argamassas.

Tabela 14 - Resultados do ensaio de Pozolanicidade com cal e com cimento para o RBRO

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

Obs.: Limites estabelecidos com base nos dados da Classe E de pozolanas descritos NBR 12653: Materiais pozolânicos – Requisitos (ABNT, 2014)

Fonte: produção da autora

4.2 Análise dos ensaios realizados no concreto

Aqui serão analisados os resultados dos ensaios realizados nos concretos produzidos conforme os traços apresentados na Tabela 10 (3.4.1.1).

4.2.1 Avaliação das propriedades do concreto no estado fresco

É importante conhecer as características do concreto em seu estado fresco por elas influenciarem em propriedades e características importantes do concreto no estado endurecido, como resistência, durabilidade, vida útil, entre outros. Além disso, torna-se essencial entender a influência da incorporação do resíduo e como esse influencia no comportamento do concreto. Sendo assim, os concretos no estado fresco foram caracterizados por meio das determinações do índice de consistência e massa específica.

4.2.1.1 Análise da consistência pelo abatimento de tronco de cone

Os resultados dos ensaios para determinação de consistência pelo abatimento de tronco de cone, realizados conforme NBR NM 67 (ABNT, 1998) e classificados conforme NBR 8953 (ABNT, 2009), estão expostos na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultados das consistências determinadas pelo método de abatimento de tronco de cone para os concretos frescos

Traço	Abatimento de tronco de cone – parâmetro determinado (mm)	Abatimento de tronco de cone obtido (mm)
CREF 45	70 ± 10	85
CR5 45	70 ± 10	70
CR10 45	70 ± 10	60
CR15 45	70 ± 10	35
CREF 55	70 ± 10	80
CR5 55	70 ± 10	70
CR10 55	70 ± 10	45
CR15 55	70 ± 10	40
CREF 65	70 ± 10	70
CR5 65	70 ± 10	100
CR10 65	70 ± 10	90
CR15 65	70 ± 10	55

Fonte: produção da autora

Apesar dos resultados dos ensaios de abatimento de tronco de cone dos traços CR15 45, CR10 55, CR15 55 e CR15 65 estarem distantes do parâmetro determinado, os concretos apresentaram aspecto coeso, mostrando-se trabalháveis no momento da moldagem dos corpos de prova, não se fazendo necessário o uso de aditivos químicos.

Observa-se uma redução do índice de consistência na medida em que se aumenta a quantidade de resíduo nas misturas, em todas as relações a/c. A queda no valor do abatimento era esperada uma vez que ocorreu um acréscimo de finos e manteve-se a mesma proporção de água na mistura, além disso, um material com maior superfície específica, como é o caso do resíduo utilizado, tende a demandar um maior consumo de água.

4.2.1.2 Determinação da massa específica

Os resultados do ensaio de determinação de massa específica no estado fresco, conforme NBR 9833 (ABNT, 2009), estão registrados na Tabela 16.

Tabela 16 - Valores médios da massa específica para os concretos frescos

Traço	Massa específica obtida (Kg/m³)
CREF 45	2543
CR5 45	2456
CR10 45	2513
CR15 45	2493
CREF 55	2500
CR5 55	2493
CR10 55	2456
CR15 55	2463
CREF 65	2446
CR5 65	2473
CR10 65	2436
CR15 65	2473

Fonte: produção da autora

Com a incorporação do resíduo, esperava-se um aumento da massa específica. No entanto, a partir dos dados apresentados acima, observou-se uma tendência de queda no valor com o aumento da incorporação do resíduo na mistura. Esse comportamento pode estar associado à dificuldade de adensamento, gerando assim mais ar incorporado e, conseqüentemente, diminuindo os valores de massa específica. Todavia, o concreto continua sendo classificado como normal (2000 a 2800 kg/m³) (HELENE e ANDRADE, 2007).

4.2.2 Avaliação das propriedades do concreto no estado endurecido

O estudo do comportamento do concreto no estado endurecido foi realizado em dois grupos: aquele que passou pelo ciclo de imersão e secagem em solução agressiva de sulfato de magnésio e aquele que não sofreu esse tipo de agressão. Os concretos agredidos, ao final do ciclo eram submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial. Nos concretos não agredidos, além do ensaio de resistência à compressão, foram realizados os ensaios de absorção de água por capilaridade e absorção de água por imersão.

4.2.2.1 Grupo de controle (sem ataque de sulfato)

4.2.2.1.1 Absorção de água por capilaridade

Como já abordado anteriormente, a permeabilidade do concreto está diretamente ligada à sua durabilidade e vida útil, pois a água, juntamente com íons agressivos, é responsável por alguns processos de deterioração.

Uma das formas de determinar a permeabilidade do concreto é através do ensaio de absorção de água por capilaridade conforme a NBR 9779 (ABNT, 2012). Foram ensaiados 3 corpos de prova para cada traço, conforme exigido pela norma, e os valores médios obtidos na última medição (após 72 horas), é apresentado na Tabela 17.

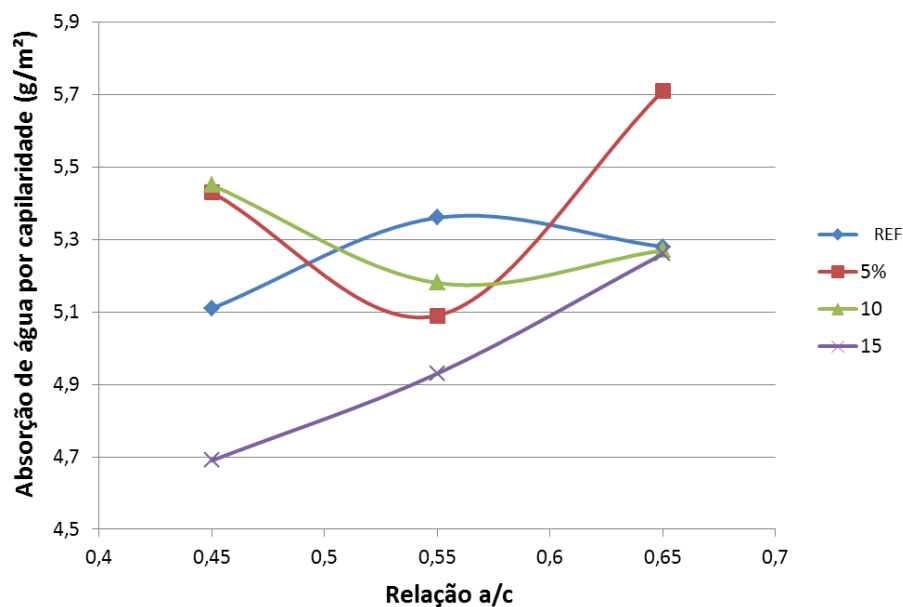
Tabela 17 - Valores médios de absorção de água por capilaridade dos concretos às 72 horas

Traço	Absorção capilar às 72 h (g/m ²)
CREF 45	5,11
CR5 45	5,43
CR10 45	5,45
CR15 45	4,69
CREF 55	5,36
CR5 55	5,09
CR10 55	5,18
CR15 55	4,93
CREF 65	5,28
CR5 65	5,71
CR10 65	5,27
CR15 65	5,26

Fonte: produção da autora

Para melhor visualização dos resultados apresentados na Tabela 17, a Figura 47 representa o gráfico dos valores médios da absorção de água por capilaridade às 72 horas.

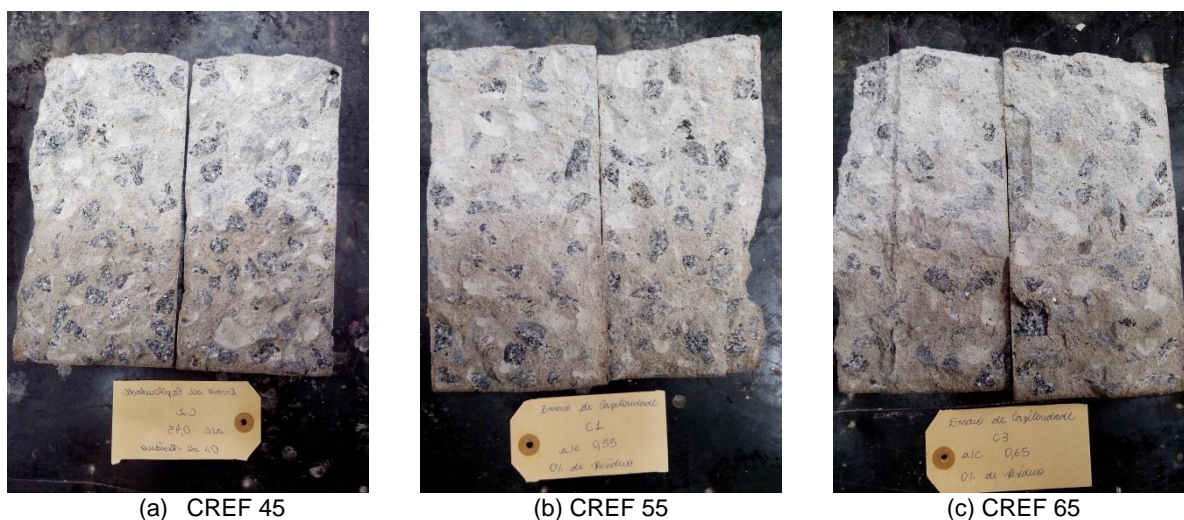
Figura 47 – Gráfico dos valores médios da absorção de água por capilaridade às 72 horas



Fonte: produção da autora

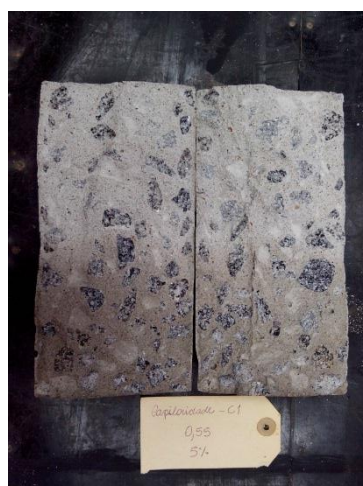
Após as 72 horas todos os corpos de prova foram rompidos por compressão diametral de modo a permitir a observação da distribuição de água no seu interior, conforme Figura 48.

Figura 48 - Ascensão capilar nos corpos de prova após 72 horas





(d) CR5 45



(e) CR5 55



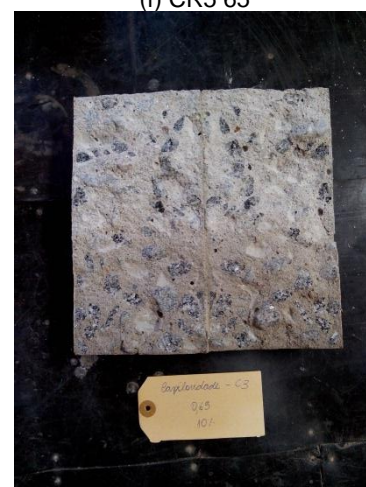
(f) CR5 65



(g) CR10 45



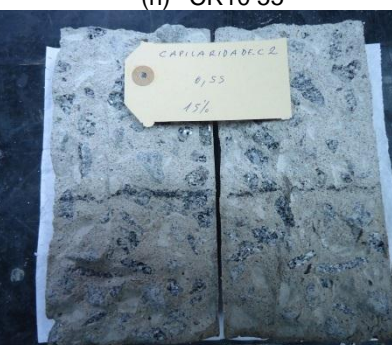
(h) CR10 55



(i) CR10 65



(j) CR15 45



(k) CR15 55



(l) CR15 65

Fonte: produção da autora

Os resultados obtidos às 72 horas no ensaio de absorção de água por capilaridade foram submetidos a uma análise de variância conforme apresentado na Tabela 18. A ANOVA indicou que nenhuma das variáveis influenciam significativamente os resultados obtidos.

Tabela 18 - Análise de variância do efeito da adição do RBRO e da relação a/c sobre a absorção de água por capilaridade às 72 horas

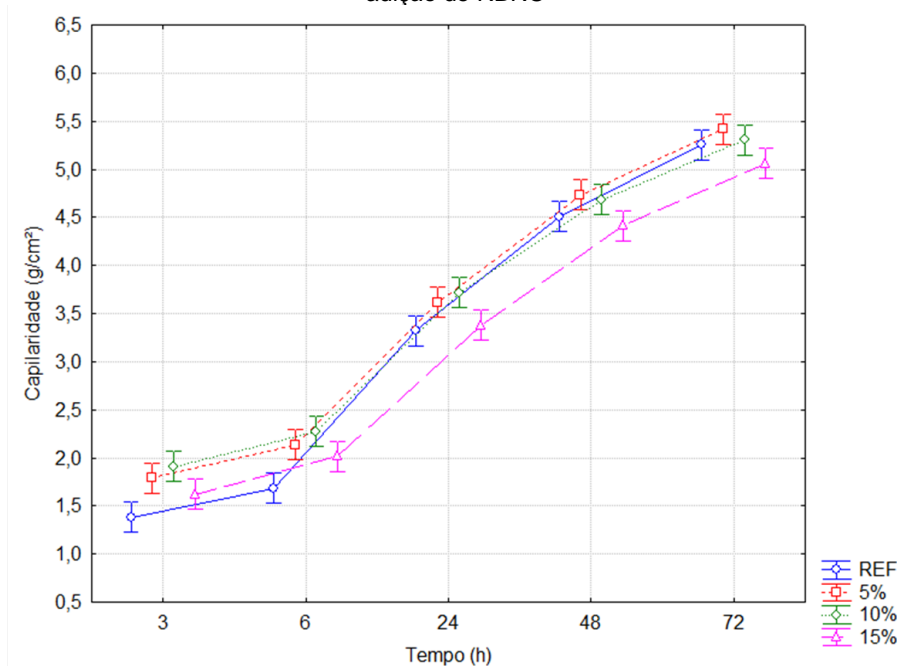
Fonte de variação	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
Adição (%)	0,6115	3	0,2038	2,005	0,140075	Não Significativo
Relação a/c	0,2976	2	0,1488	1,464	0,251227	Não Significativo
Adição (%) X Relação a/c	1,0904	6	0,1817	1,788	0,144203	Não Significativo
Erro	2,4394	24	0,1016	-	-	

Notas: SQ - Soma dos quadrados; GL – Grau de liberdade; MQ – Média quadrada; F – Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos.

Fonte: produção da autora

Na Figura 49 observa-se a distribuição estatística da absorção de água por capilaridade ao longo de todo o ensaio (3, 6, 24, 48 e 72 horas) em função da variável adição de resíduo.

Figura 49 – Evolução da absorção de água por capilaridade ao longo do tempo em função do percentual de adição de RBRO



Fonte: produção da autora

Esperava-se uma queda da absorção de água por capilaridade com o aumento da incorporação do resíduo, o que pode ser observado nos concretos com teores de 15% de RBRO. No entanto, os concretos com 5 e 10% de resíduo, obtiveram valores ligeiramente acima do concreto de referência. Resultados semelhantes foram encontrados nos trabalhos de Colangelo, Marroccoli e Cioffi (2010) e Topçu, Bilir e Uygunoglu (2009).

4.2.2.1.2 Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão é importante para avaliar o desempenho do concreto em termos de durabilidade, uma vez que caracteriza a porosidade total do concreto. Este ensaio foi realizado de acordo com a norma NBR 9778 (ABNT, 2009) que nos permite, através dos resultados, obter valores não apenas da absorção de água como também dos índices de vazios, da massa específica seca e saturada além da massa específica real.

Foram ensaiados três corpos de prova para cada traço e a média dos valores está apresentada na Tabela 19.

Tabela 19 - Valores médios da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica

Traço	Absorção por imersão (%)	Índice de Vazios (%)	Massa específica da amostra seca (ρ_s) (g/cm ³)	Massa específica da amostra saturada (ρ_{sat}) (g/cm ³)	Massa específica real (ρ_r) (g/cm ³)
CREF 45	5,91	13,47	2,28	2,41	2,64
CR5 45	6,04	13,74	2,28	2,41	2,64
CR10 45	6,12	13,90	2,27	2,41	2,64
CR15 45	6,49	14,54	2,24	2,39	2,62
CREF 55	6,26	13,75	2,24	2,38	2,60
CR5 55	5,91	13,36	2,26	2,40	2,61
CR10 55	5,72	12,93	2,26	2,39	2,60
CR15 55	6,15	13,82	2,25	2,38	2,61
CREF 65	6,32	13,93	2,20	2,34	1,70
CR5 65	6,36	14,05	2,21	2,35	2,57
CR10 65	6,29	12,79	2,19	2,33	2,54
CR15 65	6,06	13,45	2,22	2,36	2,57

Fonte: produção da autora

A partir dos dados apresentados acima, observa-se uma tendência no aumento do índice de vazios e na absorção nos concretos do grupo com relação a/c de 0,45, além do CR15 45 apresentar o maior valor entre os demais traços, sendo este o traço em que houve maior dificuldade de adensamento devido à quantidade de finos presentes na mistura.

Os valores ao serem submetidos a uma análise de variância, conforme a Tabela 20, indicaram que a adição do resíduo, a relação a/c e a interação entre essas duas

variáveis influenciam significativamente os resultados obtidos para o ensaio de absorção por imersão. Sendo que a interação entre a adição de RBRO e a relação a/c é o que mais influencia os resultados.

Tabela 20 - Análise de variância do efeito do teor de adição do RBRO e da relação água cimento sobre a absorção de água por imersão

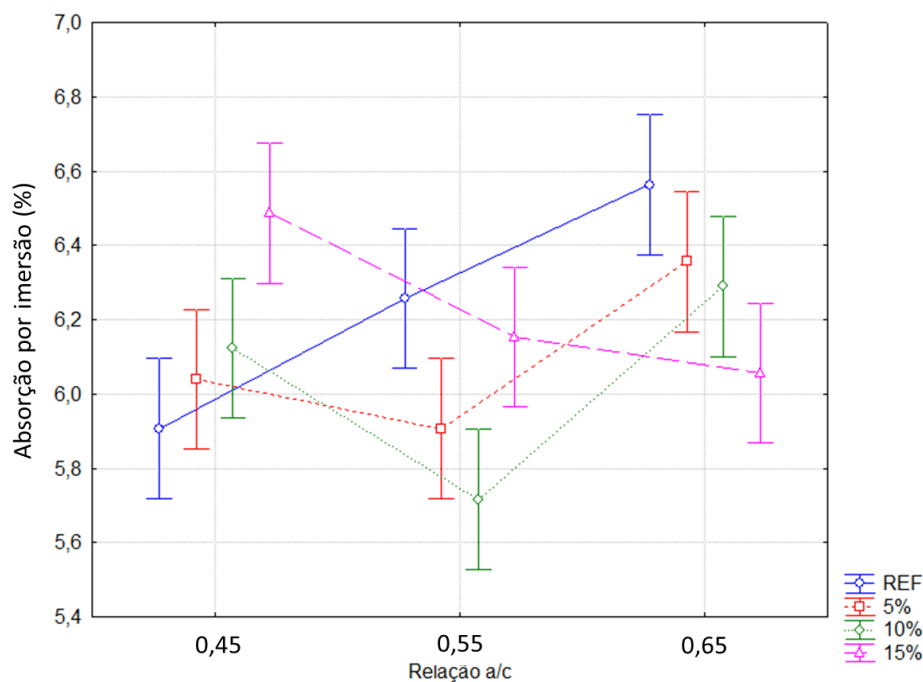
Fonte de variação	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
Adição (%)	0,260	3	0,087	3,47	0,031782	Significativo
Relação a/c	0,575	2	0,287	11,49	0,000316	Significativo
Adição (%) X Relação a/c	1,221	6	0,203	8,13	0,000073	Significativo
Erro	0,600	24	0,025	-	-	-

Notas: SQ - Soma dos quadrados; GL – Grau de liberdade; MQ – Média quadrada; F – Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos.

Fonte: produção da autora

A distribuição estatística da absorção de água por imersão em função da interação das variáveis relação a/c e adição de RBRO é a apresentada na Figura 50.

Figura 50 – Efeito da interação entre os fatores teor de adição de RBRO e relação a/c sobre a absorção de água por imersão



Fonte: produção da autora

Para a absorção de água por imersão esperava-se uma queda em seu índice com a adição do resíduo, no entanto observa-se nos concretos com relação a/c de 0,45 um aumento desse índice com o aumento do resíduo. Possivelmente devido à dificuldade de adensamento e consequente incorporação de ar, principalmente nos concretos com 15% de RBRO.

Essa tendência no aumento da absorção mesmo com a utilização do resíduo foi encontrada nos trabalhos de Topçu, Bilir e Uygunoglu (2009), Hameed e Sekar (2009) e Gencil *et al.* (2012), sendo que Topçu, Bilir e Uygunoglu (2009) destacam que até 30% de resíduo, essa diferença não é significativa.

4.2.2.1.3 Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão axial é uma das formas de controlar a qualidade do concreto, além de ser um ensaio relativamente fácil e possível de se deduzir, a partir dos seus resultados, outras propriedades referentes ao concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Para tanto, foi seguida a norma NBR 5739 (ABNT, 2007), no concreto com 28 dias de idade. Foram testados seis corpos de prova para cada traço e os valores médios obtidos são apresentados na Tabela 21.

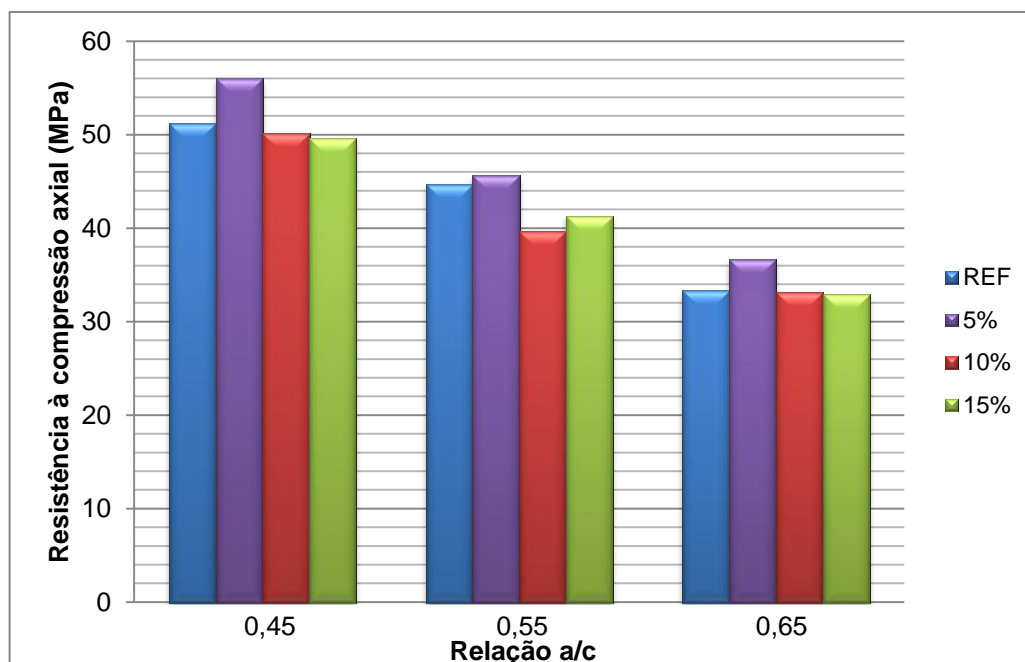
Tabela 21 - Resultados dos valores médios de resistência à compressão axial

Traço	Resistência média à compressão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
CREf 45	51,27	1,88
CR5 45	56,09	2,17
CR10 45	50,18	1,46
CR15 45	49,57	1,53
CREf 55	44,76	3,56
CR5 55	45,70	2,18
CR10 55	39,70	1,27
CR15 55	41,32	2,65
CREf 65	33,37	2,34
CR5 65	36,66	1,57
CR10 65	33,18	3,75
CR15 65	32,98	1,40

Fonte: produção da autora

Observa-se que os concretos com adição de 5% de resíduos obtiveram valores superiores ao seu respectivo concreto de referência, sendo o CR5 45 o que alcançou o maior valor. Com o aumento da adição de resíduo acima de 5%, há uma tendência de queda na resistência à compressão axial em comparação aos concretos de referência.

A Figura 51 representa o gráfico dos resultados médios de resistência à compressão axial dos concretos estudados, para melhor visualização.

Figura 51 - Resistência à compressão axial


Fonte: produção da autora

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão axial foram submetidos a uma análise de variâncias (ANOVA) a fim de comparar a influência de cada um dos fatores controláveis sobre a resistência à compressão. Os resultados da análise de variância podem ser visualizados na Tabela 22.

Tabela 22 - Análise de variância do efeito do teor de adição de resíduo e a relação a/c sobre a resistência à compressão axial

Fonte de variação	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
Adição (%)	301,0	3	100,3	107,4	0,000000	Significativo
Relação a/c	3772,1	2	1886,0	2018,2	0,000000	Significativo
Adição (%) X Relação a/c	55,7	6	9,3	9,9	0,000000	Significativo
Erro	56,1	60	0,9	-	-	-

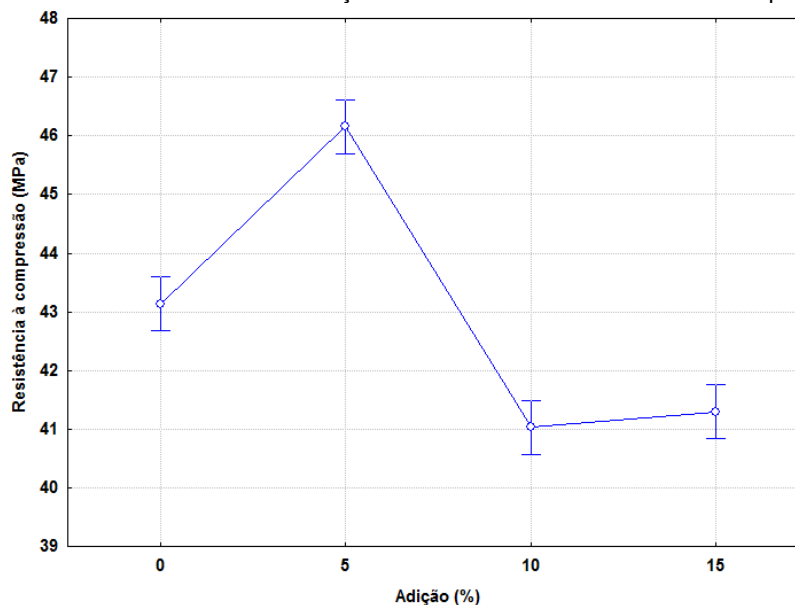
Notas: SQ - Soma dos quadrados; GL – Grau de liberdade; MQ – Média quadrada; F – Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos.

Fonte: produção da autora

A análise de variância mostrou que os efeitos individuais dos fatores analisados – percentual de adição de RBRO e a relação a/c – são estatisticamente significativos a um nível de confiança de 95%, já que o p-valor é menor que 0,05. Isto significa que cada uma dessas variáveis independentes, tomadas isoladamente, exerce influência na resistência à compressão, assim como a interação entre elas.

O gráfico da distribuição estatística da resistência à compressão axial em função da variável isolada teor de adição de RBRO está expresso na Figura 52.

Figura 52 - Efeito isolado do teor de adição de RBRO sobre a resistência à compressão axial



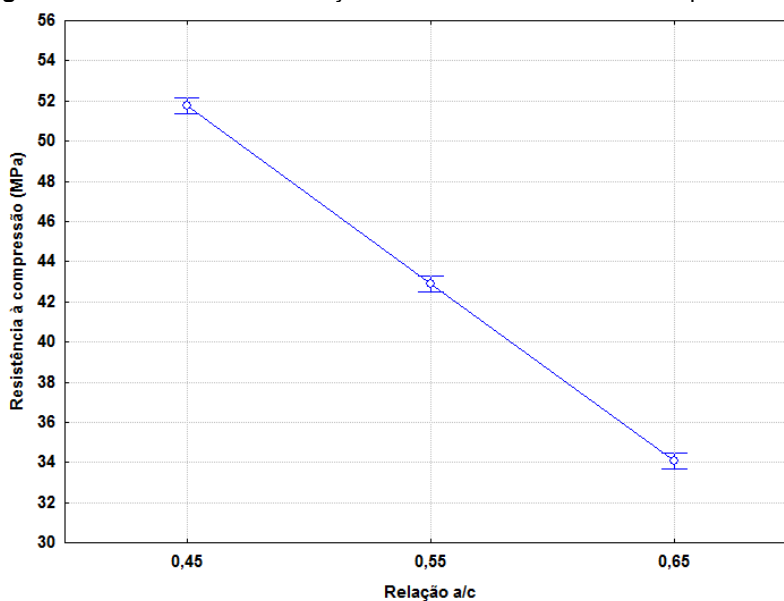
Fonte: produção da autora

É possível verificar na Figura 52 o crescimento da resistência à compressão com a incorporação de 5% do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais em relação à massa de cimento, além da tendência de queda com o aumento da porcentagem de resíduo. Provavelmente o teor de resíduo a 5% permitiu que partículas muito finas atuassem como pontos de nucleação, garantindo uma maior dispersão das partículas de cimento e, assim, melhorando as condições de hidratação. Além disso, as finas partículas do resíduo podem ter preenchido espaços da zona de transição reduzindo o espaço livre para a água nessa região. A combinação desses fatores resultou numa melhor ligação entre os elementos da matriz cimentícia, gerando um concreto com resistências maiores que o de referência (ALMEIDA *et al.*, 2007).

Para os demais teores de incorporação do resíduo, ocorreu uma queda na resistência à compressão, em relação ao concreto de referência. Possivelmente uma maior quantidade de partículas de RBRO na mistura provoca uma maior dispersão dos produtos hidratados, conduzindo a uma queda da ligação entre esses produtos e, conseqüentemente, diminuindo a resistência (GONÇALVES, 2000).

Com relação à variação da resistência à compressão axial em função o efeito isolado da relação a/c, conforme apresentado na Figura 53, os concretos apresentam menores valores com o aumento da relação, conforme esperado.

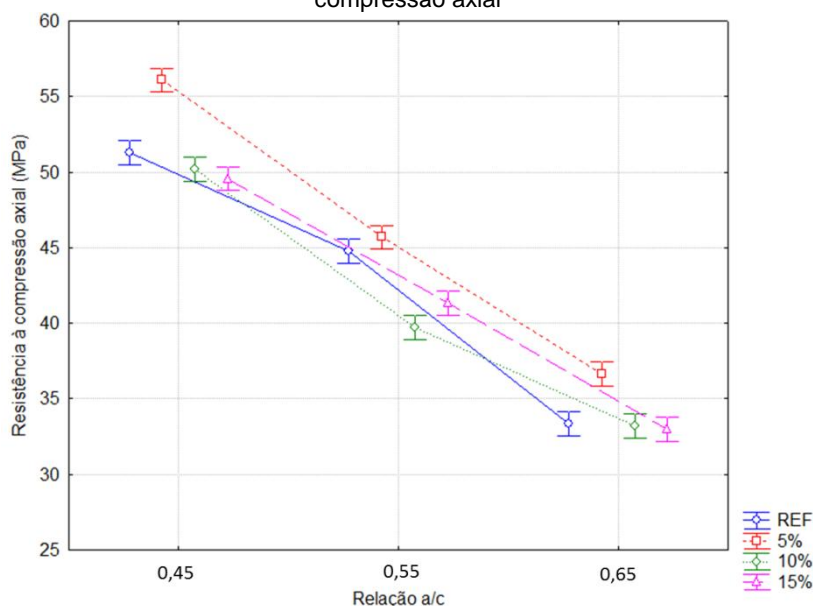
Figura 53 - Efeito isolado da relação a/c sobre a resistência á compressão axial



Fonte: produção da autora

Analisando a interação das duas variáveis independentes – relação a/c e percentual de adição de resíduo – observa-se a partir da Figura 54 a influência do resíduo na resistência à compressão. Nota-se um aumento da resistência quando se aumenta os teores de RBRO, principalmente para 5% de adição, ficando clara a contribuição deste material no incremento da resistência do concreto, conforme já comentado anteriormente.

Figura 54 - Efeito da interação entre os fatores teor de adição de RBRO e relação a/c sobre a resistência à compressão axial



Fonte: produção da autora

Estes resultados corroboram com os encontrados nos trabalhos de Gonçalves (2000), Almeida, Branco e Santos (2007), Almeida *et al.* (2007), Binici, Kaplan e Yilmaz (2007), Hameed e Sekar (2009), Alyamaç e Ince (2009), e Colangelo, Marroccoli e Cioffi (2010) em que os concretos com incorporação de até 5% de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais apresentaram valores superiores aos do concreto de referência sendo que a resistência tende a diminuir a partir de valores maiores de incorporação do resíduo.

4.2.2.2 Análise dos concretos com ataque de sulfatos

Como o objetivo principal dessa pesquisa era analisar o comportamento de concretos com adição do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais frente à ação de íons sulfatos, um grupo de concretos passou por ciclos de imersão em solução agressiva de sulfato de magnésio e secagem, conforme explicado no capítulo de metodologia.

Como visto anteriormente, o sulfato de magnésio tem um efeito nocivo sobre várias propriedades do concreto, mais especificamente sobre a resistência à compressão (NEVILLE, 2004). Portanto, após os ciclos de imersão e secagem, os concretos

foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial e os resultados foram comparados ao grupo que não sofreu agressão.

4.2.2.2.1 Resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial dos concretos agredidos com sulfatos foi determinada de acordo com a norma NBR 5739 (ABNT, 2007), após o ciclo de imersão e secagem. Foram testados seis corpos de prova de cada traço e seus valores médios estão apresentados na Tabela 23.

Observando apenas os resultados da resistência à compressão dos concretos que passaram pelo processo de agressão com sulfato de magnésio (Tabela 23), percebe-se um comportamento parecido com os do concreto que não sofreram agressão, ou seja, um aumento na resistência nos traços com 5% de adição de resíduo em relação ao concreto de referência, e uma tendência de queda com o aumento da porcentagem de adição de resíduo.

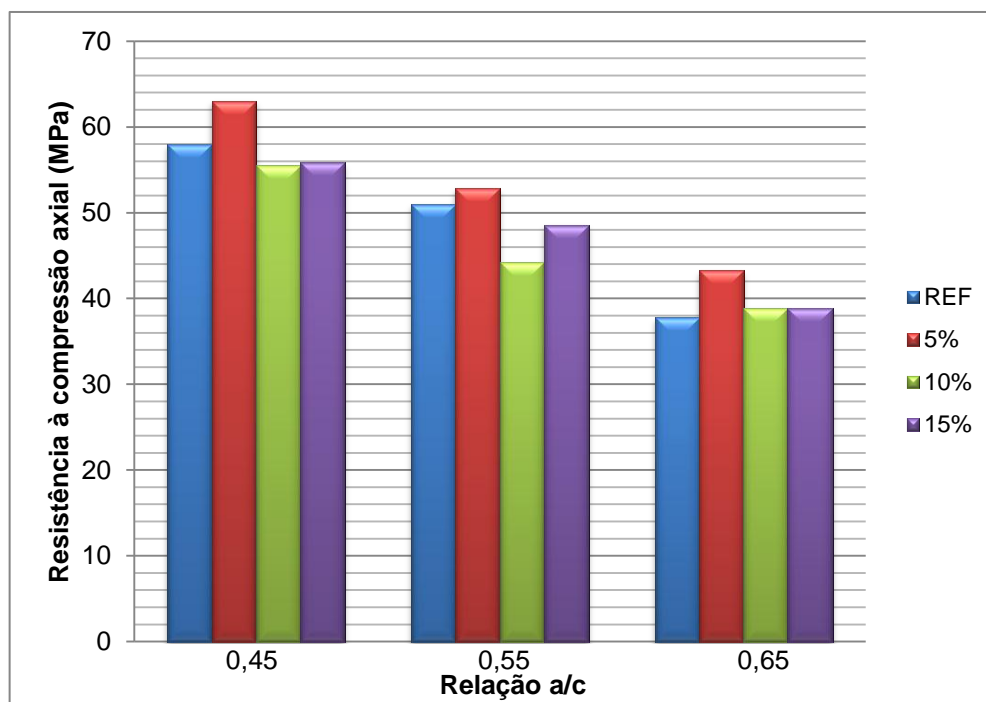
Tabela 23 - Resultados dos valores médios de resistência à compressão após agressão

Traço	Resistência média à compressão (MPa) após agressão	Coefficiente de variação (%)
CREF 45	58,02	1,51
CR5 45	63,01	2,78
CR10 45	55,58	2,71
CR15 45	55,83	8,13
CREF 55	51,04	1,18
CR5 55	52,90	3,02
CR10 55	44,25	2,43
CR15 55	48,58	2,74
CREF 65	37,81	5,64
CR5 65	43,29	2,62
CR10 65	38,90	4,19
CR15 65	38,89	2,00

Fonte: produção da autora

A Figura 55 representa o gráfico dos resultados médios de resistência à compressão axial dos concretos agredidos, para melhor visualização.

Figura 55 - Resistência à compressão axial após agressão



Fonte: produção da autora

No entanto, quando se compara os resultados entre os concretos agredidos e os sem agressão observa-se um ganho de resistência para todos os traços dos concretos que estiveram em solução de sulfato de magnésio, tendo o traço CR5 45 o maior valor de resistência. Para Silveira (1996) a resistência de concretos expostos a íons sulfatos pode crescer ligeiramente durante os estágios iniciais do ataque como um reflexo da densificação da estrutura. Possivelmente, este não seja um ganho real de resistência e sim um resultado temporário de uma compactidade maior provocada pela formação de produtos expansivos oriundos de reações entre o sulfato da solução e a matriz da pasta de cimento, conforme apontado por Costa (2004), que em seu trabalho observou esse ganho de resistência nos concretos que foram submetidos a ciclos de imersão e secagem em soluções de sulfato de magnésio.

Tabela 24 - Resultados dos valores médios de resistência à compressão axial

Traço	Resistência média à compressão (MPa) após agressão	Coefficiente de variação (%)	Resistência média à compressão (MPa) sem agressão	Coefficiente de variação (%)
CREF 45	58,02	1,51	51,27	1,88
CR5 45	63,01	2,78	56,09	2,17
CR10 45	55,58	2,71	50,18	1,46
CR15 45	55,83	8,13	49,57	1,53
CREF 55	51,04	1,18	44,76	3,56
CR5 55	52,90	3,02	45,70	2,18
CR10 55	44,25	2,43	39,70	1,27
CR15 55	48,58	2,74	41,32	2,65
CREF 65	37,81	5,64	33,37	2,34
CR5 65	43,29	2,62	36,66	1,57
CR10 65	38,90	4,19	33,18	3,75
CR15 65	38,89	2,00	32,98	1,40

Fonte: produção da autora

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão axial dos concretos após agressão foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA), com o auxílio do programa computacional *Statística 7.0* (STATSOFT, 2004). Os resultados da análise de variância podem ser visualizados na Tabela 25.

Observa-se que com a adição do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais a relação *a/c* e a interação entre essas duas variáveis são estatisticamente significativas, e apresentam o *p*-valor menor que 0,05, ou seja, são estatisticamente significativas a um nível de confiança de 95%. Isto quer dizer que cada uma dessas variáveis independentes, tomadas isoladamente, exerce influência na resistência à compressão axial, o que já havia sido constatado anteriormente nos concretos sem agressão.

Tabela 25 - Análise de variância do efeito da adição do RBRO e da relação a/c sobre a resistência à compressão axial

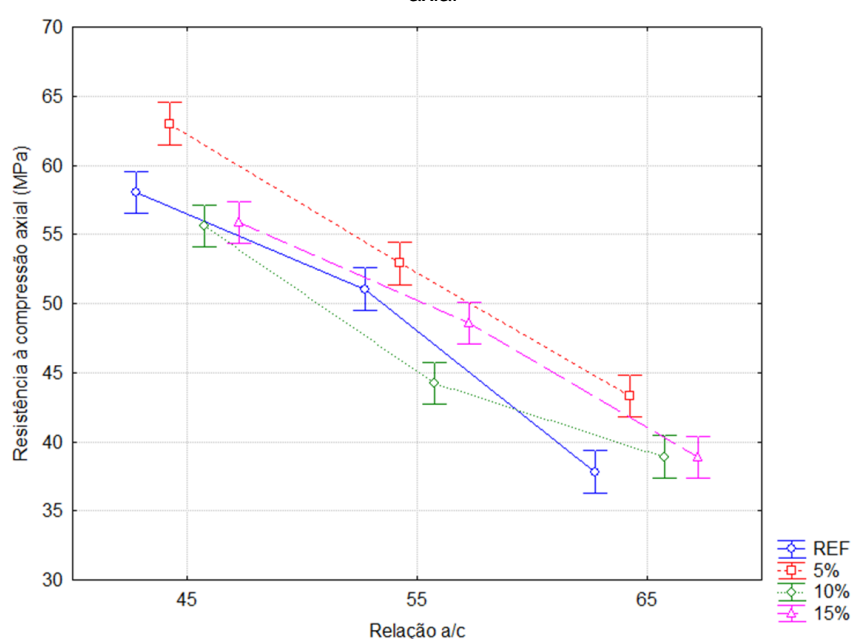
Fonte de variação	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
Adição (%)	461,6	3	153,9	44,31	0,000000	Significativo
Relação a/c	4058,2	2	2029,1	584,36	0,000000	Significativo
Adição (%) X Relação a/c	110,3	6	18,4	5,29	0,000196	Significativo
Erro	208,3	60	3,5	-	-	-

Notas: SQ - Soma dos quadrados; GL – Grau de liberdade; MQ – Média quadrada; F – Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos.

Fonte: produção da autora

Além disso, como apresentado na Figura 56, que os melhores valores de resistência à compressão encontram-se no grupo de concretos com relação a/c de 0,45, o que já era esperado. Nota-se também um aumento da resistência quando se aumenta os teores de adição de RBRO até 5%. Esse mesmo comportamento foi observado no grupo de concretos que não sofreram agressão.

Figura 56 - Efeito da interação entre os fatores adição de RBRO e relação a/c sobre a resistência à compressão axial



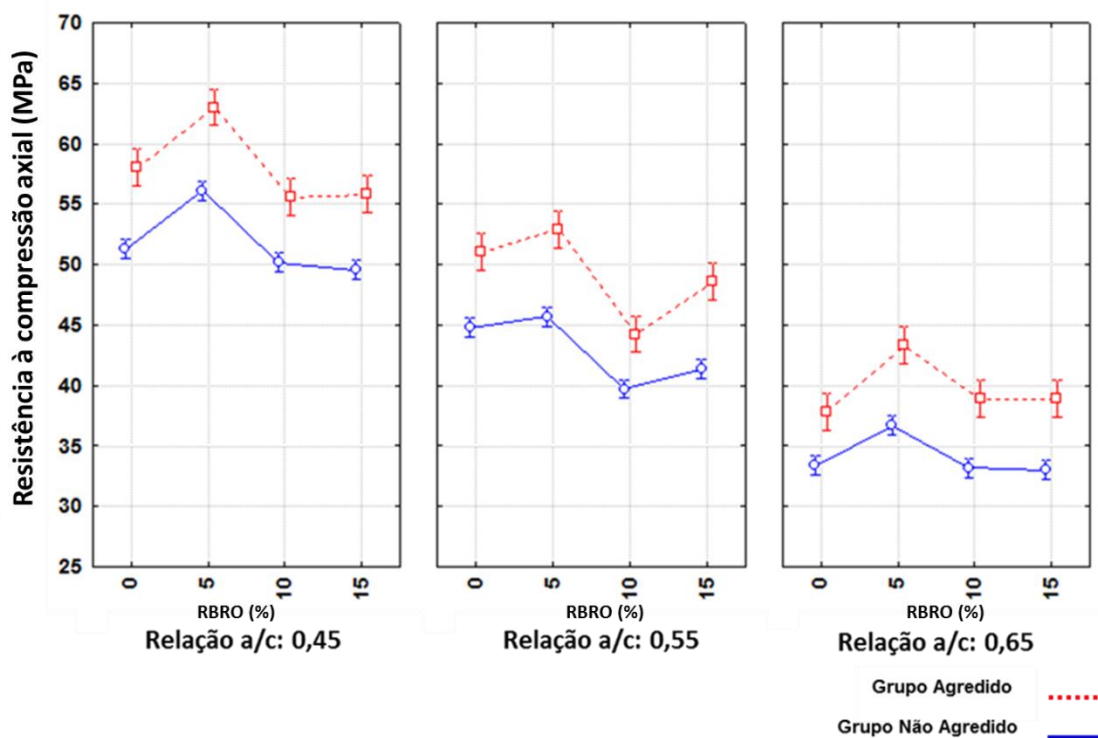
Fonte: produção da autora

Na Figura 57 é possível avaliar o comportamento dos dois grupos de concretos – o grupo agredido (vermelho) e o não agredido (azul) – paralelamente. Para ambos os grupos ocorre uma queda na resistência à compressão com o aumento da relação a/c, além de ganho de resistência nos traços com adição de 5% de RBRO e os menores valores são nos concretos com 10% de resíduo. No entanto, como já

mencionado anteriormente, o grupo agredido obteve um ganho de resistência que variou de 11% a 16%, sendo os concretos com relação a/c de 0,65 agredidos os que obtiveram os maiores ganhos em relação ao seu grupo correspondente não agredido.

Esse comportamento também foi verificado no trabalho de Kakali *et al.* (2003) cujas argamassas contendo 15% e 30% de fíler calcário, armazenadas em solução de $MgSO_4$ a 1,8% durante 3 meses a 25°C, obtiveram um ganho na resistência à compressão axial. Para os autores, um período maior de permanência na solução agressiva, proporcionaria maiores danos às amostras e, conseqüentemente, a perda da resistência.

Figura 57 - Efeito da interação entre os fatores teor de adição de RBRO e relação a/c sobre a resistência à compressão axial do grupo agredido e do não agredido

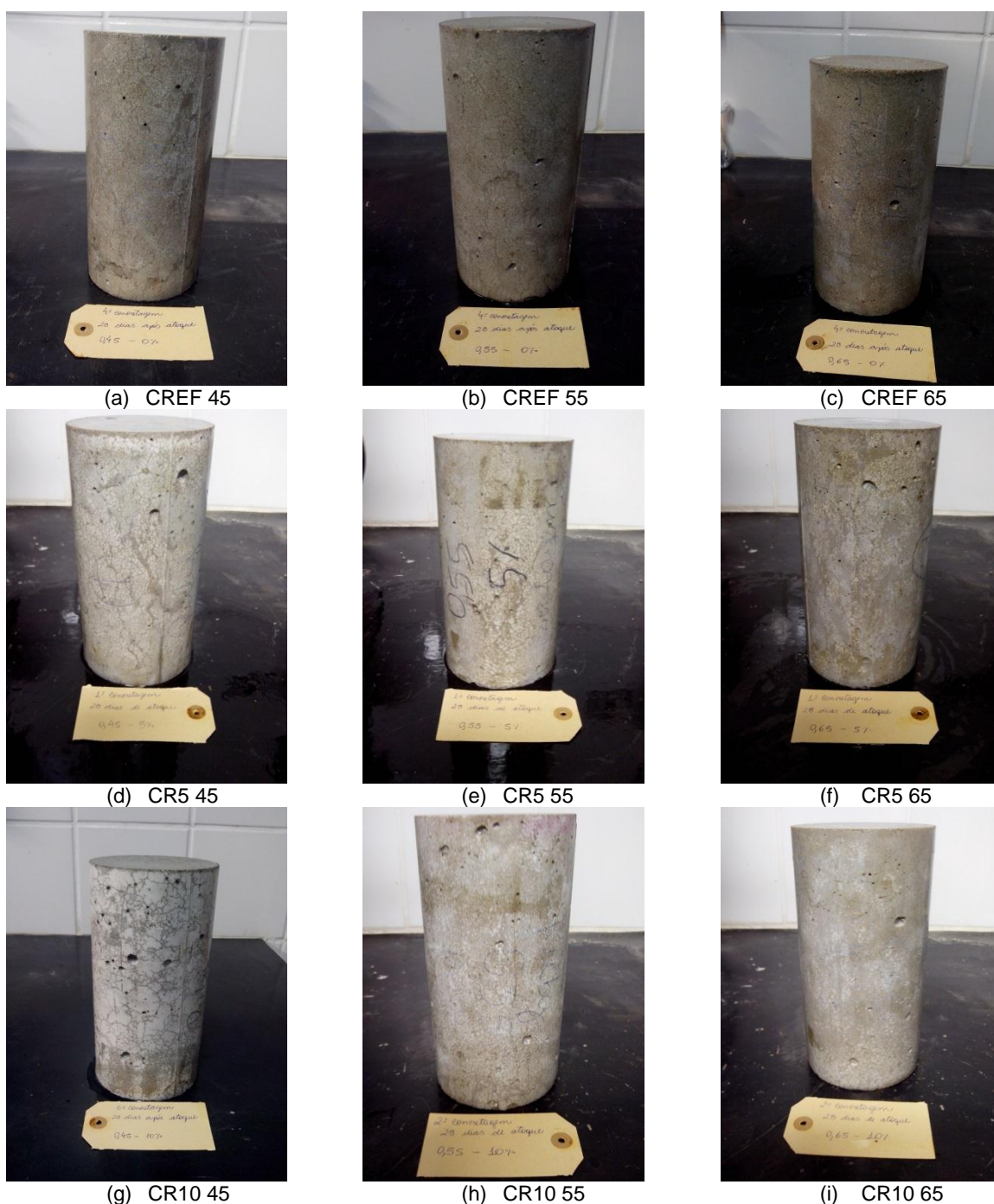


Fonte: produção da autora

Uma maior porcentagem no ganho de resistência dos concretos com relação a/c de 0,65, que foi de 16% em média, possivelmente ocorreu devido ao fato dos concretos com maiores relações a/c possuírem volume de espaço total disponível maior. Com isso, a acomodação dos produtos expansivos nos poros provoca uma tensão mais acentuada, tornando temporário o ganho de resistência nesses concretos (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A integridade dos corpos-de-prova submetidos à ação do sulfato foi verificada através de uma avaliação visual conforme mostrado na Figura 58. Verificou-se uma microfissuração superficial, típica do ataque em questão, em todos os diferentes traços, sendo que nos corpos de prova com 15% de adição de resíduo as microfissuras eram mais alongadas e evidentes. Não foi encontrado degradação das arestas e também nenhum tipo de lascamento superficial.

Figura 58 - Aspecto dos corpos de prova de concreto após os ciclos de imersão e secagem





Fonte: produção da autora

4.2.3 Análise Microestrutural dos concretos

Como já levantado anteriormente, as principais fases sólidas que serão observadas nas micrografias são os silicatos de cálcio hidratado (C-S-H), o hidróxido de cálcio (CH), a etringita, o monossulfato hidratado e possíveis formações resultantes da ação dos íons sulfatos na matriz cimentícia do concreto, como a taumasita por exemplo.

A análise microestrutural é necessária, pois as propriedades mecânicas e de durabilidade podem ser prejudicadas caso a microestrutura do concreto seja muito heterogênea. (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Além disso, as adições minerais podem produzir alterações na quantidade e na ordem da formação dessas fases sólidas (DAL MOLIN, 2011).

Para a análise microestrutural foi moldado um corpo de prova de cada traço, que aos 28 dias de idade foram extraídos fragmentos, de aproximadamente 1cm, que abrangessem a zona de transição entre o agregado e a pasta para que essa região pudesse ser analisada. No caso dos concretos que passaram pelo processo de agressão, os fragmentos de amostras analisados foram retirados a partir da superfície para o interior dos corpos de prova.

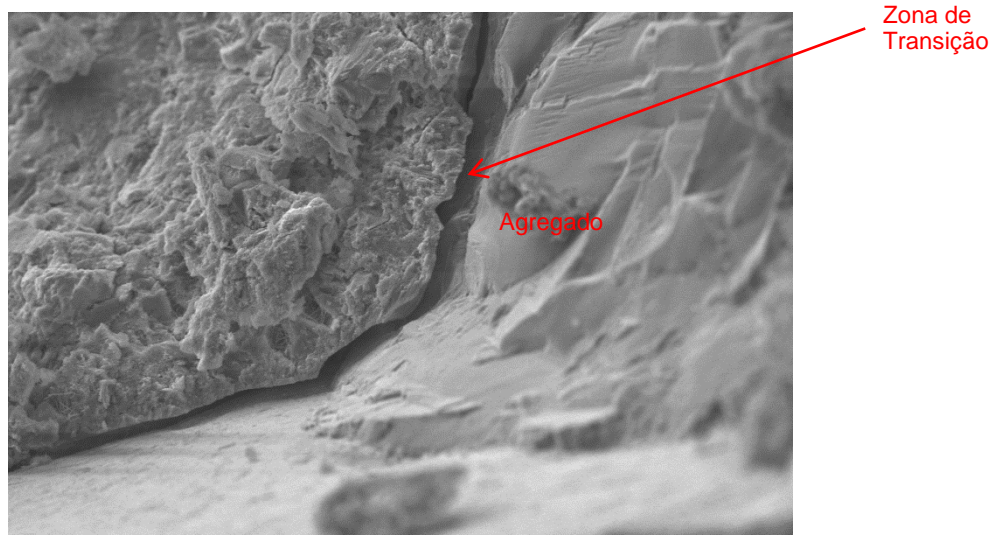
Para analisar a relação entre as propriedades estudadas e a microestrutura, obtiveram-se micrografias dos concretos cujo comportamento indicou a necessidade de observação, comparando as amostras agredidas com as não agredidas. Além das imagens, os principais elementos químicos presentes foram constatados através

da espectroscopia de energia dispersiva (EDS), cujos resultados corroboraram com as formações típicas indicadas nas micrografias.

Ressalta-se aqui que nos espectros apresentados nessa pesquisa aparece a indicação da presença de platina (Pt), proveniente da metalização das amostras, devendo ser, portanto, desconsiderados das análises.

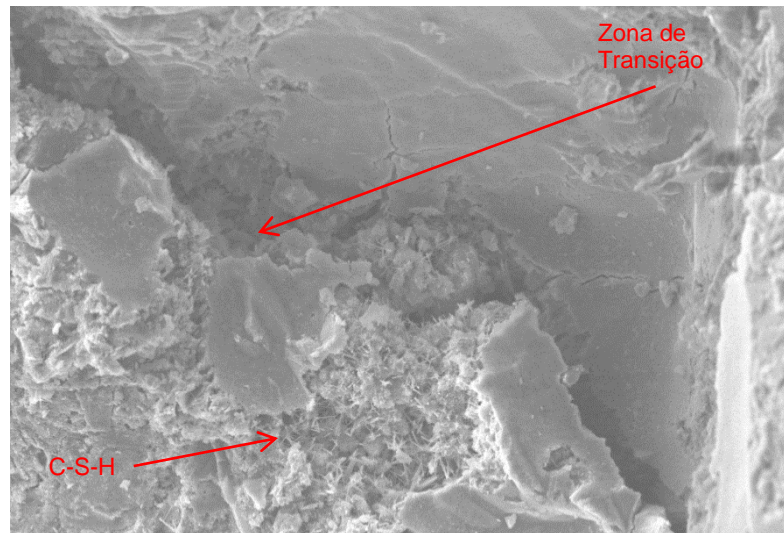
Nas Figuras 59 e 60 observam-se imagens dos concretos CREF 45 e CR5 45 respectivamente. Comparando as duas imagens, nota-se uma zona de transição mais densa no concreto CR5 45, preenchida com possíveis cristais aciculares de C-S-H rodeados por prováveis pontos maciços, densos e esponjosos de hidróxido de cálcio (CH). Esse melhor preenchimento da zona de transição com formações que colaboram para um melhor desempenho do concreto, pode ter sido estimulado pela presença do resíduo que, além do seu efeito físico, pode ter interagido com o cimento, acelerando sua hidratação e contribuindo para formação de aluminatos e garantindo um melhor desempenho mecânico, uma vez que os melhores resultados de resistência à compressão axial foram obtidos pelo CR5 45.

Figura 59 - Imagem obtida por MEV do CREF 45



Fonte: produção da autora

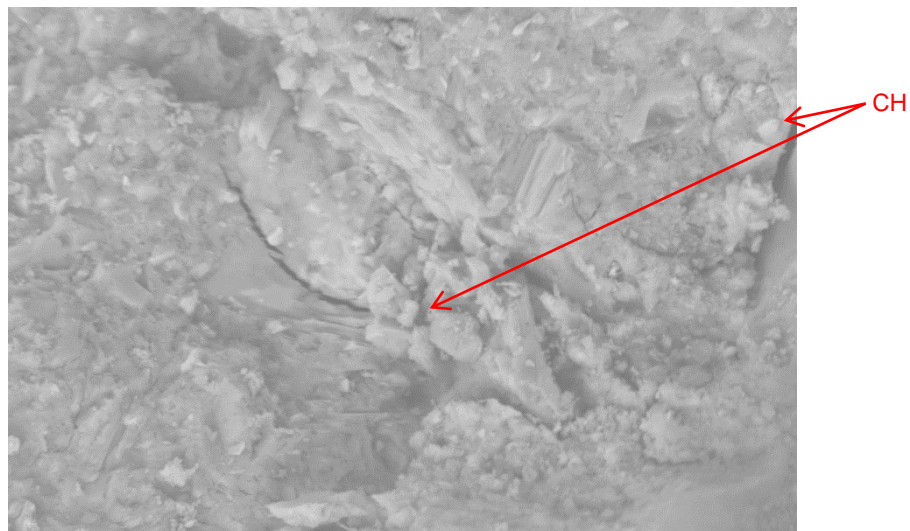
Figura 60 - Imagem obtida por MEV do CR5 45



Fonte: produção da autora

Na Figura 61 observa-se o concreto CR5 45 após a agressão. Mesmo com o ataque por sulfatos a estrutura ainda se apresenta densa, com a formação de prováveis pontos de hidróxido de cálcio, ou seja, o CH não foi consumido para formar taumasita.

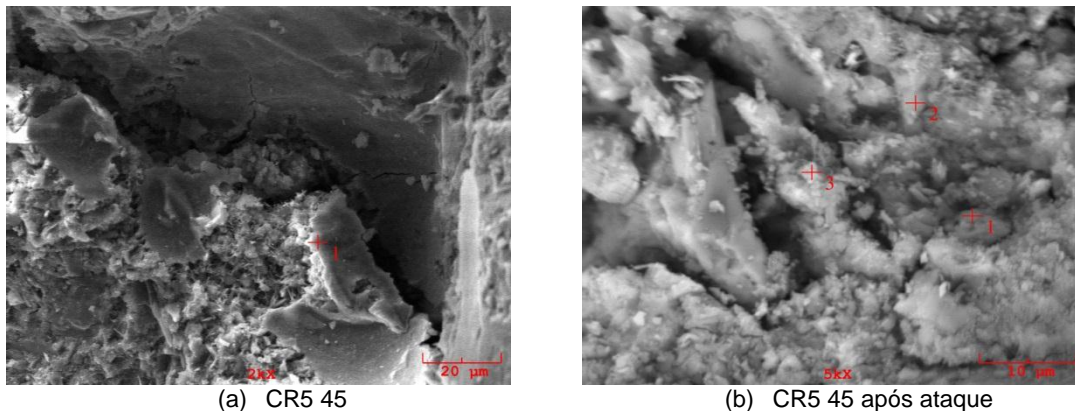
Figura 61 - Imagem obtida por MEV do CR5 45 após agressão



Fonte: produção da autora

Na Figura 62 são apresentados os pontos de análise do EDS para o traço CR5 45 antes (a) e depois (b) do ataque por sulfato.

Figura 62 - Pontos de análise do EDS

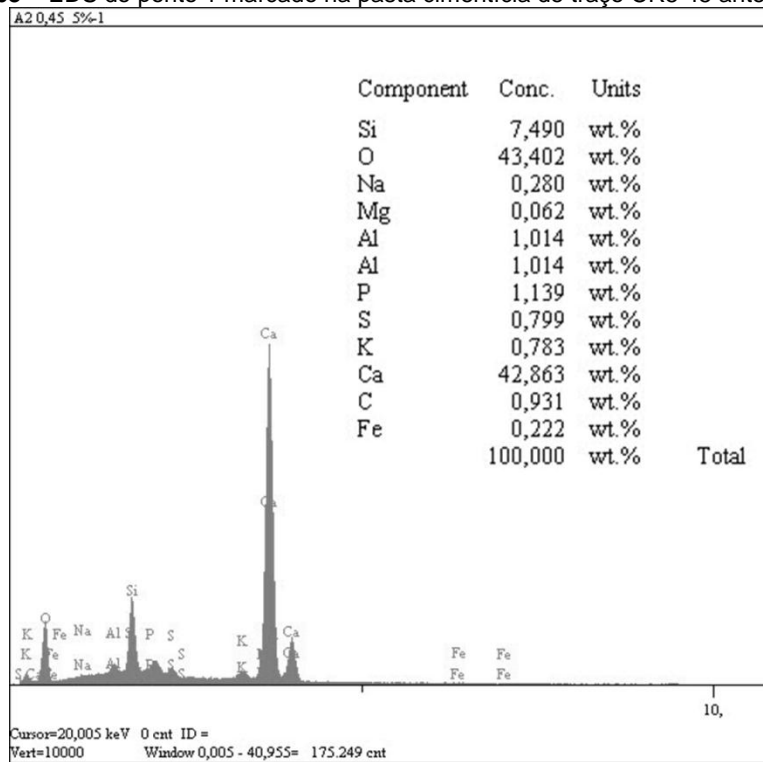


(a) CR5 45

(b) CR5 45 após ataque

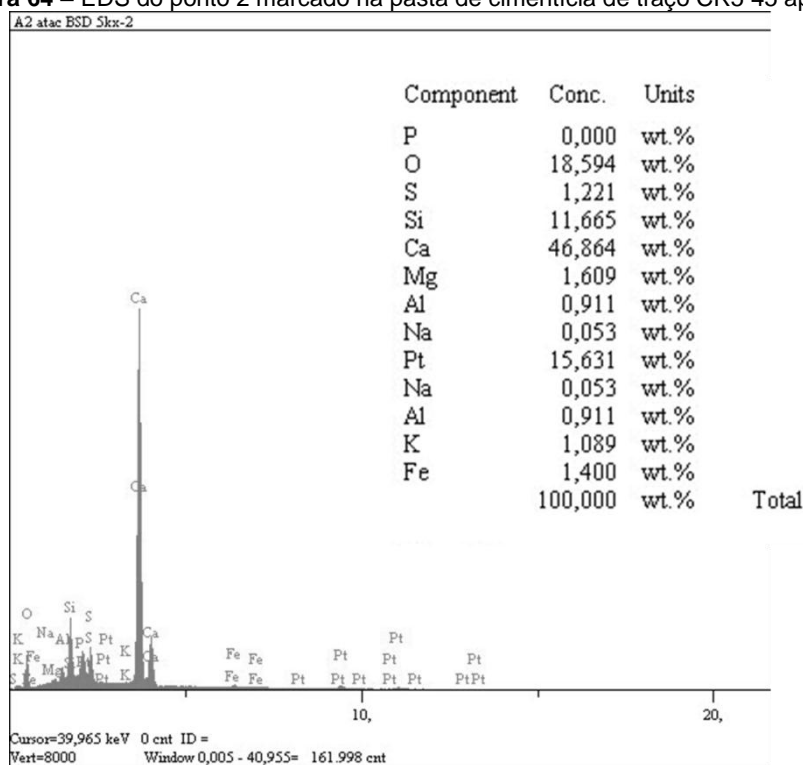
Fonte: produção da autora

Figura 63 – EDS do ponto 1 marcado na pasta cimentícia de traço CR5 45 antes do ataque (a)



Fonte: produção da autora

Figura 64 – EDS do ponto 2 marcado na pasta de cimentícia de traço CR5 45 após ataque (b)

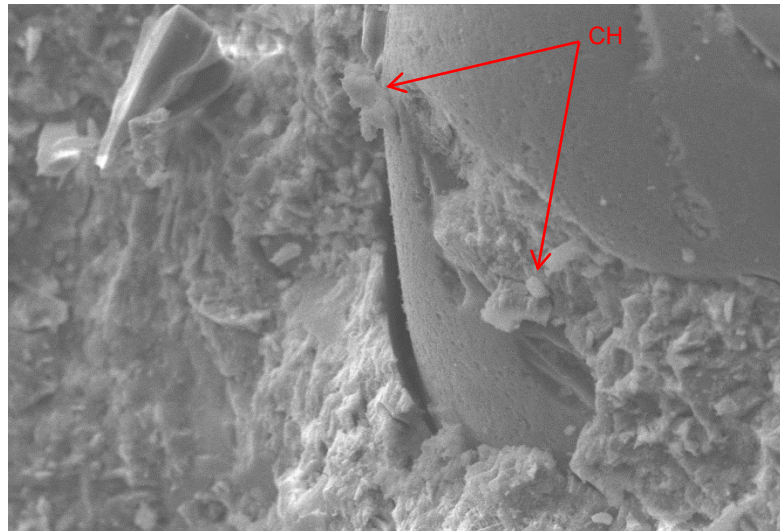


Fonte: produção da autora

A partir dos EDS apresentados nas Figuras 63 e 64, constata-se a presença de alumínio, sílica, cálcio e oxigênio em maiores percentuais, em ambos os concretos, o que pode estar associado à sulfoaluminatos de cálcio. Mesmo após ser submetido ao ataque de sulfato de magnésio, constata-se a partir da Figura 64 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, que não houve a remoção do cálcio e, conseqüentemente, quebra do C-S-H. Possivelmente, a incorporação do resíduo, em uma porcentagem adequada, favoreceu a resistência da matriz cimentícia ao ataque.

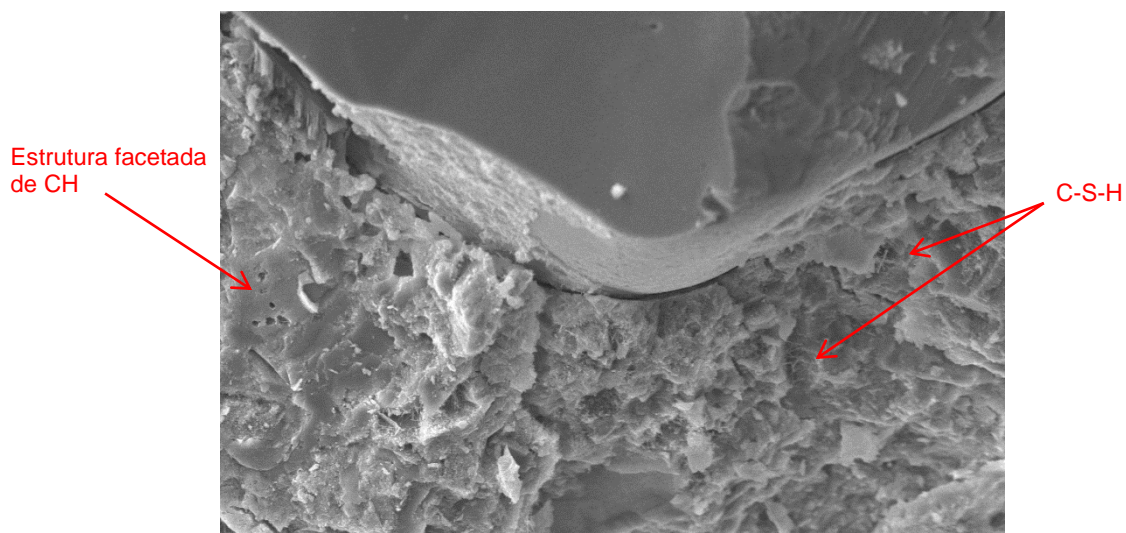
Os concretos CR5 55 E CR10 55 obtiveram a maior perda média de resistência entre os concretos com mesma relação a/c, chegando a um decréscimo de 13%. Observando as Figuras 65 e 66 referentes às micrografias do CR5 55 E CR10 55, respectivamente, encontra-se, em ambos os concretos, prováveis formações CH, além de possíveis cristais fibrosos de C-S-H.

Figura 65 - Imagem obtida por MEV do CR5 55



Fonte: produção da autora

Figura 66 - Imagem obtida por MEV do CR10 55

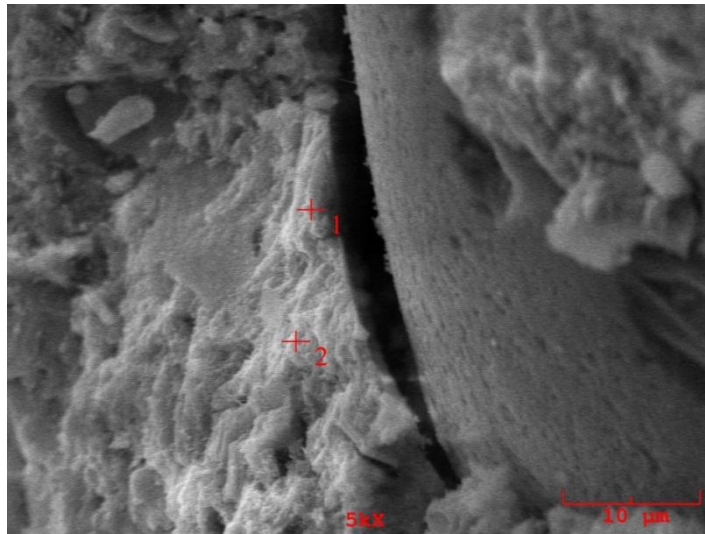


Fonte: produção da autora

A pesar da formação dos produtos provenientes do processo de hidratação, a queda da resistência pode estar associada a uma maior dispersão desses produtos que, devido há uma maior quantidade de partículas de RBRO, tem suas ligações diminuídas, causando uma deficiência na estrutura da matriz e, por conseguinte, a queda na resistência.

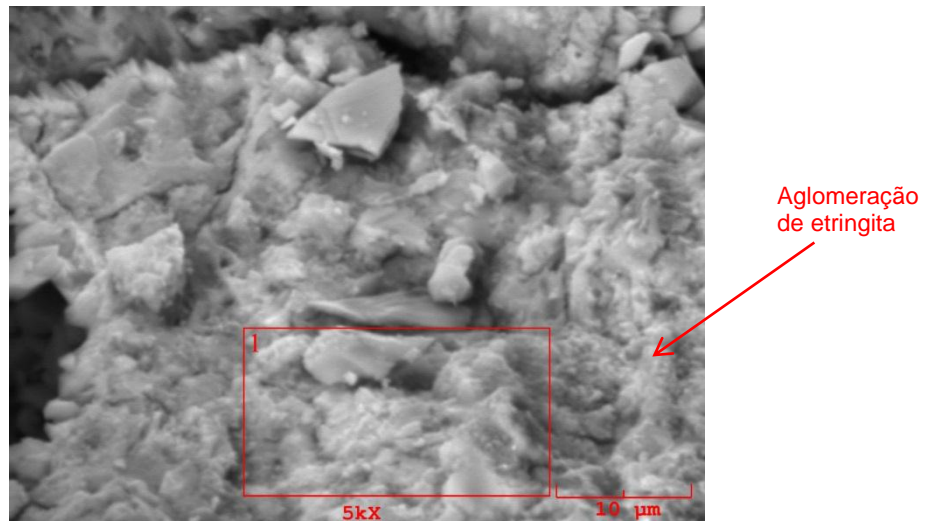
Os mesmos concretos em questão também tiveram sua microestrutura analisada após o processo de agressão por sulfatos. Nas Figuras 67 e 68 é possível comparar o CR5 55 com o seu correspondente após ataque, além dos pontos e região de análise do EDS.

Figura 67 - Pontos de análise do EDS no CR5 55



Fonte: produção da autora

Figura 68 - Região de análise do EDS no CR5 55 após ataque

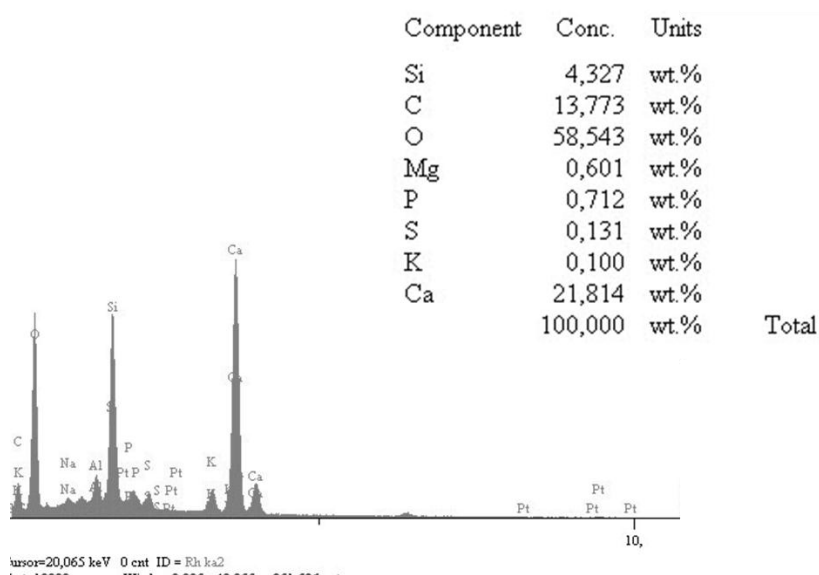


Fonte: produção da autora

Na Figura 68 observa-se matéria solta correspondente à detritos de fratura e massas sólidas formadas pela aglomeração de pequenas agulhas cruzando-se, o que pode corresponder a formação de etringita, um dos produtos esperados pela hidratação do cimento junto ao ataque de sulfato de magnésio (SENHADJI *et al.*, 2010).

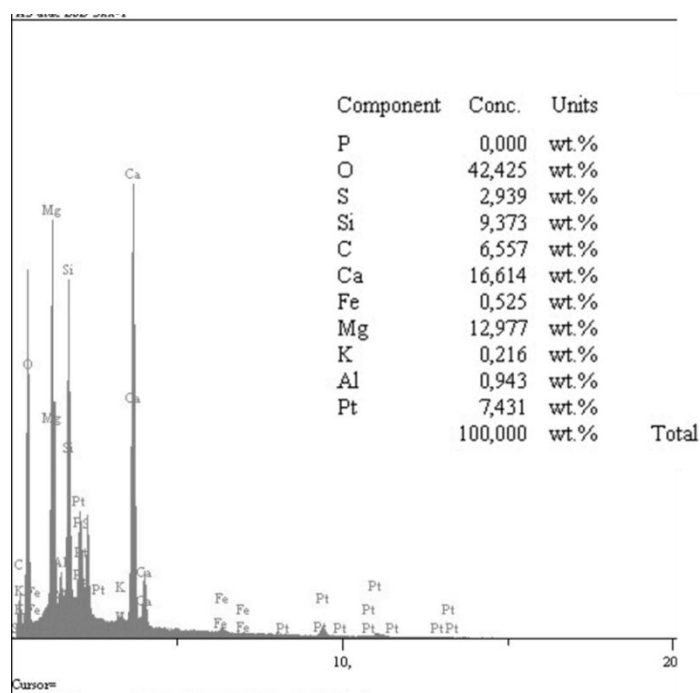
Nas Figuras 69 e 70 são apresentados as análises de EDS do ponto 2 marcado na Figura 67 e da região 1 da Figura 68, respectivamente.

Figura 69 - EDS do ponto 2 marcado na pasta cimentícia CR5 55 antes do ataque



Fonte: produção da autora

Figura 70 - EDS da região 1 marcada na pasta cimentícia CR5 55 após ataque



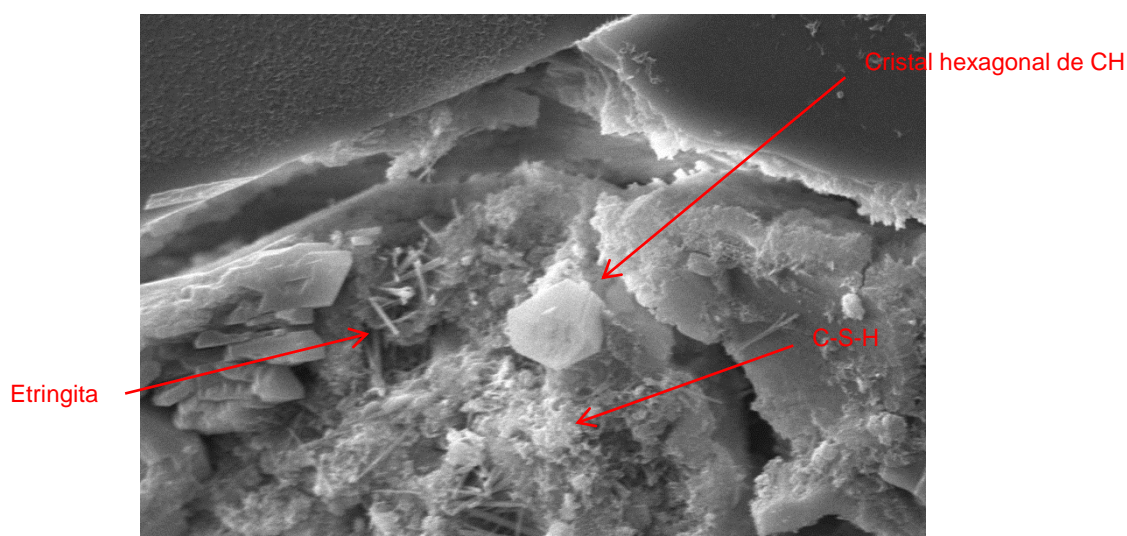
Fonte: produção da autora

Através da Figura 69 é possível constatar a presença de C-S-H no estado amorfo, pois a relação C/S apresentou-se elevada para pastas cimentícias ($C/S=21,814/4,327 = 5,04$), o que indica a formação de C-S-H.

Constata-se na Figura 70 altos picos de magnésio devido à solução agressiva. Além disso, os picos de cálcio e o aumento do teor de enxofre, associado a pequenos picos de silício e alumínio, indicam a presença de etringita e gesso, produtos esses formados pela hidratação do cimento junto ao ataque de sulfato de magnésio.

O concreto CR15 65 obteve a maior perda de resistência à compressão axial, a imagem microestrutural da sua pasta é apresentada na Figura 71. Observa-se a formação de um grande cristal de morfologia hexagonal típica de um hidróxido de cálcio, além de aglomerações de possíveis formações de C-S-H e cristais aciculares de etringita. A presença desses cristais na zona de transição, formados pela mistura de soluções de aluminato de cálcio e de sulfato de cálcio pode ter ocasionado a queda da resistência, já que na idade de 28 dias a etringita já deveria ter evoluído para a fase de silicato de cálcio hidratado.

Figura 71 - Imagem obtida por MEV do CR15 65 (ampliação 10000x) antes da agressão

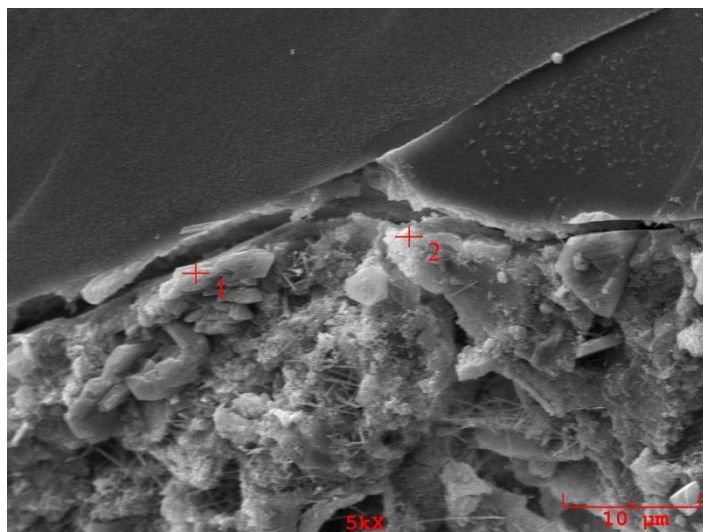


Fonte: produção da autora

Além disso, a incorporação do resíduo, conforme já mencionado, pode ter causado uma maior dispersão dos produtos hidratados, diminuindo a ligação entre eles e causando uma deficiência na estrutura da matriz.

Nas Figuras 72 e 73 são apresentadas as micrografias do CR15 65 antes e depois do ataque por sulfato de magnésio, respectivamente, além das regiões em que foram realizadas as análises de EDS.

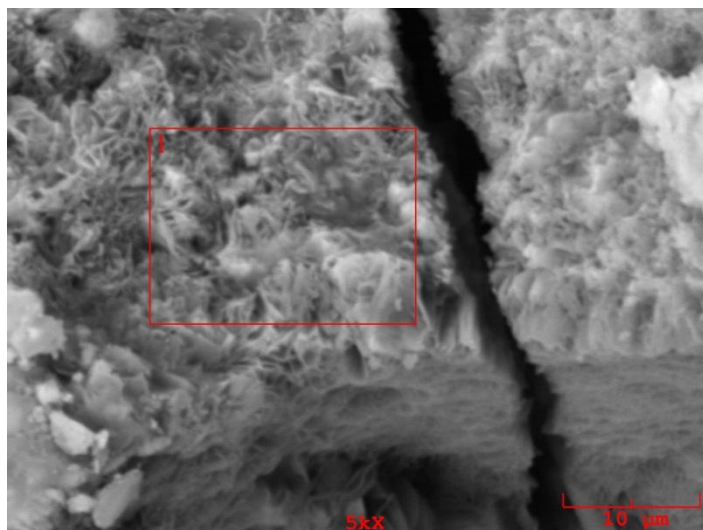
Figura 72 - Imagem obtida por MEV do CR15 65 com marcações de pontos para análise de EDS antes da agressão



Fonte: produção da autora

Na Figura 73 observam-se formações como rosetas lamelares cujas extremidades parecem ter se fundido. Tal morfologia associa-se à formação de etringita (HARSTSHORN, SHARP, SWAMY, 2002).

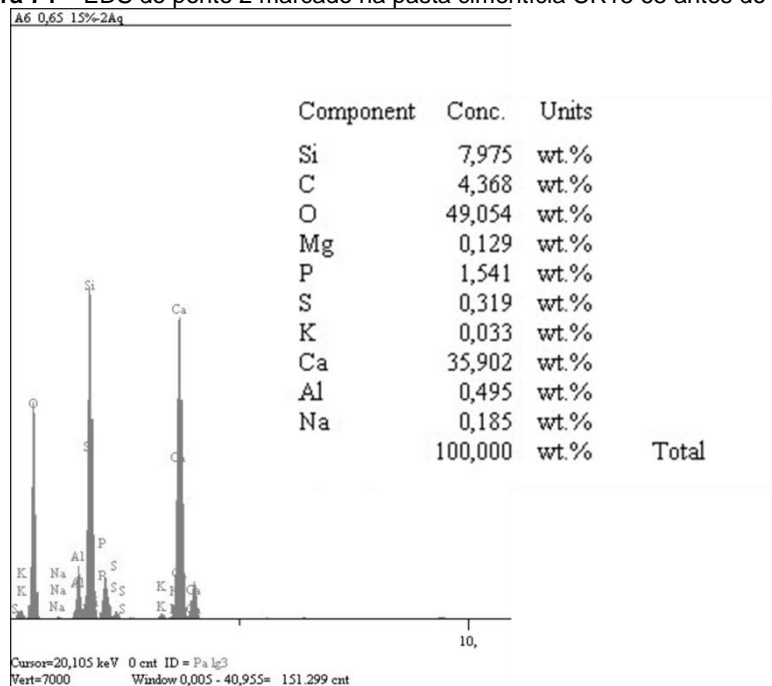
Figura 73 - Imagem obtida por MEV do CR15 65 após ataque com marcação da área de análise de EDS



Fonte: produção da autora

As Figuras 74 e 75 correspondem aos EDS do CR15 65 antes e após o ataque por sulfato.

Figura 74 – EDS do ponto 2 marcado na pasta cimentícia CR15 65 antes do ataque

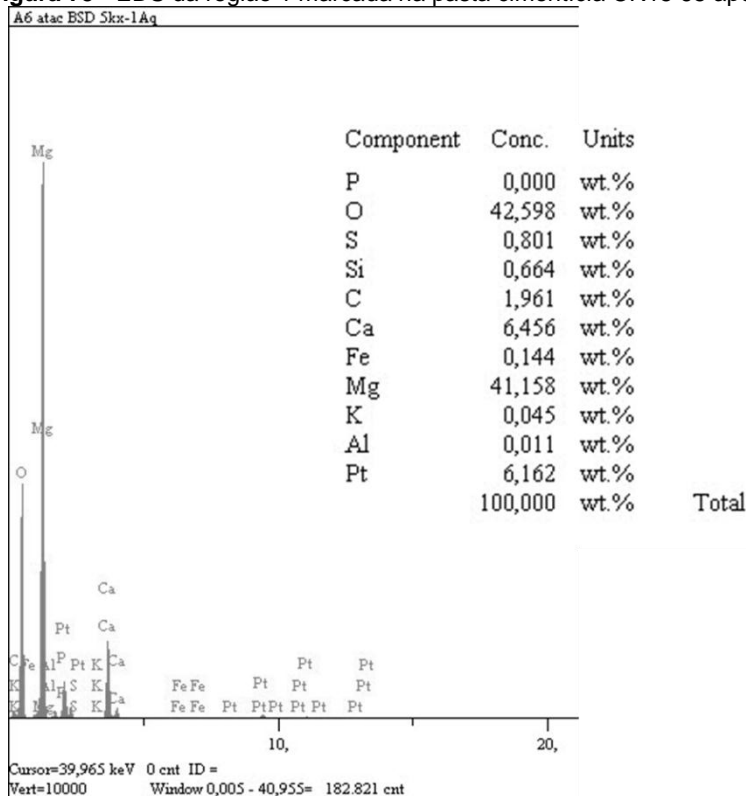


Fonte: produção da autora

A partir da Figura 74 é possível constatar a presença do C-S-H em seu estado amorfo ($C/S=35,902/7,975 = 4,501$) além da presença de compostos como alumínio, sílica, cálcio e ferro e que podem estar associados à sulfoaluminatos de cálcio.

Na Figura 75, constata-se um queda no pico de Ca, possivelmente devido ao consumo de hidróxido de cálcio pela brucita ($Mg(OH)_2$), um dos produtos formados pelo ataque de sulfato de magnésio (SENHADJI *et al.*, 2010). Além disso, os picos de cálcio e enxofre, juntamente com uma presença de picos de silício e alumínio, indicam presença de etringita.

Figura 75 - EDS da região 1 marcada na pasta cimentícia CR15 65 após ataque



Fonte: produção da autora

Capítulo 5

Conclusões e Considerações Finais

5 Conclusões e Considerações Finais

Este trabalho apresenta uma contribuição ao estudo do material concreto, ao determinar importantes propriedades mecânicas de misturas produzidas com três diferentes relações a/c e quatro tipos de adição do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais submetidas a uma solução agressiva de sulfato de magnésio.

Para realização desse trabalho foram moldados aproximadamente 400 corpos de prova entre os usados efetivamente nos ensaios e aqueles que foram produzidos para obtenção dos traços (Método IPT). Foram realizados ensaios destrutivos como a resistência à compressão axial, a microscopia eletrônica de varredura e EDS, além dos ensaios não destrutivos como absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade, índice de consistência e massa específica.

No capítulo 4 foram apresentados, discutidos e analisados estatisticamente os resultados desses ensaios e da caracterização do resíduo do beneficiamento de

rochas ornamentais. Além disso, foi apresentada e discutida a análise microestrutural com o intuito de aprofundar a compreensão do comportamento do RBRO na microestrutura dos concretos, observando sua contribuição e influencia nas propriedades anteriormente analisadas.

O objetivo dessas discussões é avaliar o potencial de aplicação do RBRO, em sua condição natural, em matrizes cimentícias e sua colaboração quando exposto a ambientes agressivos com a presença de íons sulfatos de magnésio.

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões geral e específicas dessa pesquisa e sugestões de trabalhos futuros dentro deste tema.

5.1 Conclusão geral

A partir do objetivo proposto foi traçado o programa experimental, no qual os ensaios foram realizados e os resultados obtidos. Após a análise e discussão destes resultados observou-se que os concretos com adição de 5% do resíduo em relação à massa de cimento tiveram desempenho satisfatório quanto às propriedades estudadas.

Portanto, pode-se concluir de forma geral que o uso do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais é viável tecnicamente para ser incorporado no concreto, melhorando não apenas as propriedades mecânicas de ganho de resistência, mas também colaborando para resistência de ataques externos agressivos como os de íons sulfato de magnésio, sendo 5% de incorporação o teor ótimo para as propriedades mecânicas e parâmetros de durabilidade avaliados, até a idade estudada.

5.2 Conclusões específicas

5.2.1 Quanto à caracterização do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais

A caracterização física do resíduo permitiu concluir que este é um material pulverulento, com superfície específica maior que a do cimento, o que indica que seus grãos são menores.

O RBRO é um material sílico-aluminoso com predominância de compostos cristalinos em sua formação, indicando estabilidade química, sendo formado,

principalmente pelo quartzo sílica (SiO_2), além da presença de outros óxidos provenientes do polimento.

Com as micrografias foi possível observar que os grãos são angulosos e não possuem uma forma definida, além de possuir uma distribuição granulométrica variada.

Quanto à atividade pozolânica, o resíduo não alcançou os requisitos físicos de IAP-cim e IAP-cal estabelecidos na NBR 12653 (ABNT, 2014), sendo classificado como Classe E.

De forma geral, o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais, no estado em que se apresenta, pode ser considerado como um material de enchimento (fíler) por não possuir atividade química e ter uma alta superfície específica.

5.2.2 Conclusões relativas ao concreto no estado fresco

As misturas de concreto com a incorporação de RBRO apresentaram uma redução da trabalhabilidade e consistência na medida em que se aumenta a porcentagem de resíduo, em todas as relações a/c.

As misturas com teores de resíduo apresentaram uma queda no valor da massa específica em relação ao concreto de referência.

A preparação dos traços com adição do resíduo pôde seguir o mesmo procedimento que utilizado para a execução do traço de referência, não sendo necessário o uso de aditivos mesmo em relações a/c baixas e com a incorporação de quantidades maiores de resíduo, apesar das variações das propriedades no estado fresco apresentadas.

5.2.3 Conclusões relativas ao concreto no estado endurecido

Quanto à resistência à compressão axial, a incorporação de 5% do RBRO proporciona ao concreto desempenho melhor que o do concreto de referência, em todas as relações a/c estudadas. Estes concretos obtiveram um ganho médio de 7%, enquanto que para os concretos com incorporação de 15% de RBRO houve redução do índice em 4% em relação ao concreto de referência.

A permeabilidade dos concretos tende a diminuir com o aumento do teor de resíduo. Apesar de que, nos concretos com 5% de incorporação de resíduo ocorreu um incremento na permeabilidade em todas as relações a/c e uma tendência no aumento desses valores até 10% de incorporação de RBRO. A partir daí ocorre uma queda na permeabilidade. O CR15 45 obteve o melhor resultado, com uma queda de 8% em relação ao concreto de referência.

A absorção de água por imersão está relacionada com a quantidade de água absorvida pelos poros acessíveis do concreto endurecido. Nos concretos com relação a/c de 0,55 a incorporação do resíduo promoveu uma diminuição na absorção de até 8,6%. Já nos concretos com relação a/c de 0,45 ocorreu um incremento de até 9,8% em relação ao concreto de referência.

O índice de vazios aumentou com a incorporação do resíduo nos concretos com relação a/c de 0,45. O CR10 55 apresentou melhor comportamento tanto em relação aos concretos com resíduo quanto ao concreto de referência.

Em relação à avaliação da resistência a sulfatos, de forma geral a incorporação do RBRO apresentou influência significativa na resistência à compressão axial após 28 dias de ciclos de imersão e secagem em solução de sulfatos. O ganho de resistência observado em todos os concretos agredidos, apesar de ser temporário, indica que o melhor comportamento apresentou-se nos traços com 5% de teor de resíduo, sendo que essa influência foi estatisticamente significativa, o que leva a concluir sobre o efeito positivo do uso do RBRO na resistência ao ataque de sulfatos.

5.3 Sugestões para futuros estudos

No desenvolvimento do trabalho surgiram aspectos que necessitam ser estudados e que, devido às limitações do programa experimental e do tempo disponível, não puderam ser abrangidos. Portanto, são apresentadas sugestões para a ampliação e prosseguimento do estudo da utilização do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais, visando aspectos de durabilidade:

- Avaliação das propriedades estudadas neste trabalho em idades avançadas;
- Avaliação da resistência a sulfatos em concretos com a incorporação de RBRO por períodos maiores de exposição;

- Avaliação da resistência a sulfatos em concretos com a incorporação de RBRO e com maiores relações a/c, superiores a 0,65, para melhor avaliar o efeito fíler o RBRO.
- Estudo do comportamento de concretos com a incorporação do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais visando outros aspectos da durabilidade, como a penetração de cloretos e a carbonatação;
- Determinação da relação custo/benefício para utilização do RBRO como adição em matrizes cimentícias.
- Estudo da dispersão e empacotamento de partículas muito finas de RBRO (< 1 μ m) na matriz cimentícia.

Referências

Referências Normativas e Bibliográficas

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5737**: Cimento Portland resistentes a sulfatos. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751**: Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica - Índice de atividade pozolânica com cal. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7218**: Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9202**: Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da finura por meio da peneira 0,044 mm (n° 325) - Método de ensaio. São Paulo, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833**: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9917**: Agregados para concreto – Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (nº 200) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12127**: Gesso para construção – Determinação das propriedades físicas do pó – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos - Especificação. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14656**: Cimento Portland e matérias-primas - Análise química por espectrometria de raios X - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Coletânea de Normas Técnicas – Edificações Habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 15**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento Portland - Determinação e massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 24**: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 26**: Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 27**: Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios em laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46**: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 49**: Agregado miúdo – Determinação das impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 65**: Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 76**: Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIROCHAS (Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais). **O setor de rochas ornamentais e de revestimento**. Informe 005/2009. São Paulo. 2009. Disponível em site: <<http://www.abirochas.com.br>>. Acesso em: 27 set. 2012.

ABIROCHAS (Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais.). **Cenário Mundial do Setor de Rochas Ornamentais**. São Paulo, SP. 2013. Disponível em: <http://www.abirochas.com.br/noticia.php?eve_id=1235>. Acesso em 13 set. 2013.

ACCHAR, W.; VIEIRA, F. A.; HOTZA, D. Effect of marble and granite sludge in clay materials. **Materials Science Engineering**. v. 319, p. 306-309, 2006.

AKBULUT, H.; GÜRER, C.; CETIN, S.; ELMACI, A. Investigation of using sludge as filler in bituminous hot mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 430-436, 2012.

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

AL-AMOUDI, O.S.B. Attack on plain and blended cements exposed to aggressive sulfate environments. In: **Cement Concrete Composites**, v.24, p. 305– 316, 2002.

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

ALMEIDA, Nuno; BRANCO, Fernando; SANTOS, Jose Roberto. Recycling Of Stone Slurry In Industrial Activities: Application To Concrete Mixtures. In: **Building And Environment**. V. 42, Issue 2, P. 810-819. Lisboa: Feb. 2007.

ALVES, Moisés Silva. **Estudo das Características e da Viabilidade do Uso de Resíduos Gerados no Polimento de Rochas Graníticas como Adição em Concretos**. Dissertação (Mestrado) Em Construção Civil Da Universidade Federal De Minas Gerais. Belo Horizonte: 2008.

ALYAMAÇ, K. E.; INCE, R. A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders. In: **Construction and Building Materials**. v. 23, p. 1201–1210, 2009.

ALZBOON, Kamel K.; MAHASNEH, Khalid N. Effect of Using Stone Cutting Waste on the Compression Strength and Slump Characteristics of Concrete. In: **International Journal of Civil and Environmental Engineering**. V. 1, Issue 4, P. 168-173. Jordan: 2009.

AMBARISH, K.; MANJUNATH, S.; RENUKADEVI, M.V.; JAGADISH, K.S. Effect of granite fines on strength of hollow concrete blocks. In: **International Journal of Advanced Engineering Techonology**. V.II, issue IV, p. 475-479. 2011.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Committee 116**. Cement and Concrete Terminology. Detroit, 2000.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Committee 201**. Guide to durable concrete. Detroit, 2008.

ARRIVABENE, L. F. **Adição de Resíduo da Indústria de Granito em Escória de Aciaria BOF visando sua utilização na Produção de Cimento**. Tese (Doutorado em Metalurgia e Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Metalurgia, Universidade de São Paulo, 2012.

ARUNTAS, Hüseyin Yılmaz; GÜRÜ, Metin; DAYI, Mustafa; TEKIN, İlker; Utilization of waste marble dust as an additive in cement production. In: **Materials & Design**. V. 31, issue 8, p. 4039–4042. Turkey: sep. 2010.

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

BARROS, Pedro Gustavo dos Santos. **Avaliação das propriedades de durabilidade do concreto auto-adensável obtido com resíduo de corte de mármore e granito**. 2008. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação de Engenharia Civil, Unidade Acadêmica Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2008.

BAUER, Elton. **Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. 1995. 236p.

BDOUR, A. N.; AL-JUHANI, M. S. Utilization of Waste Marble Powder in Cement Industry. In: **International Journal of Environment and Waste Management**. v. 11, p. 399-409, 2013.

BILGIN, N.; YEPREM, H. A.; ARSLAN, S.; BILGIN, A.; GÜNAY, E.; MARSBOGLU. M. Use of waste marble powder in brick industry. **Construction and Building Materials**. v. 29, p. 449-457, 2013.

BINICI, Hanifi; KAPLAN, Hasan; YILMAZ, Salih. Influence of marble and limestone dusts as additives on some mechanical properties of concrete. In: **Scientific Research and Essay**. V. 2, n. 9, p. 372-379. Turquia, 2007.

BONAVETTI, V.L.; RAHHAL, V.F.; IRASSAR, E.F. Studies on the formation carboalumination limestone blended cements in-filling. In: **Cement and Concrete Research**. V. 31, issue 6, p. 853-859, 2001.

BRAGA, Florindo dos Santos; BUZZI, Daniella Cardoso; COUTO, Maria Cláudia Lima; LANGE, Liséte Celina. Caracterização ambiental de lamas de beneficiamento de rochas ornamentais. In: **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 15, n. 3, p.237-244, 2010.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia e Banco Mundial. **Relatório Técnico 33: Rochas Ornamentais e de Revestimento**. Brasília: SGM/BIRD. 2009

BUTTON, Sérgio Tonini. **Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados**. Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, 2012.

CALMON, J. L., MORATTI, M., MORAES S., CENCI D., Self-compacting concrete using marble and granite sawing wastes as filler. **World Sustainable Building Conference**, Tokyo, 2005.

CALMON, J.L. **Resíduos industriais e agrícolas**. Capítulo 51. Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. Ed. G.C. Isaia. 2.ed. São Paulo, IBRACON, 2010. 2v.

CALMON, J.L.; TRISTÃO, F.A.; LORDÉLLO, F.S.S.; DA SILVA, S.A.C.; MATTOS, F.V. Reciclagem do resíduo de corte de granito para a produção de argamassas. In: Encontro nacional sobre edificações e comunidades sustentáveis, 1., 1997, Canela. **Anais...**Rio Grande do Sul: ANTAC, 1997.

CALMON, João Luiz; TRISTÃO, Fernando A.; LORDÉLLO, Fernando. S. S. ; DA SILVA, Sérgio A. C. ; MATTOS, Flávio. V. Aproveitamento do resíduo de corte de granito para a produção de tijolos de solo cimento. In: VII ENTAC – VII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – Qualidade no processo construtivo. Florianópolis. **Anais...**Santa Catarina. ANTAC. 1998.

CAMPBELL, Lance. **Factors affecting durability of concrete**. Aggregate Reserch. Estados Unidos da América: 2010. Disponível em: <<http://www.aggregateresearch.com/articles/18278/Factors-affecting-durability-of-concrete.aspx>>. Acesso em: 8 abr. 2013.

CAMPITELI, Vicente C. **Porosidade do Concreto**. Boletim Técnico do Departamento de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 1987.

CARAM, Rubens. Estrutura e propriedades dos materiais: **Estrutura cristalina**. [s.d.]. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~caram/estrutura.pdf>>. Acesso em: 2 nov. 2013.

CASCUDO, Oswaldo. **O controle da corrosão de armaduras em concreto.** Inspeção e técnicas eletroquímicas. Livro. Editora Pini, São Paulo, 1997.

CAVALCANTI, Diogo Jatobá de Holanda. **Contribuição ao estudo de propriedades do concreto auto-adensável visando sua aplicação em elementosestruturais.** 2006. 141f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Alagoas, 2006.

CERQUEIRA, Aladim Fernando; PREZOTTI, Júlio César Simões. **Depósitos Coletivos de Resíduos do Setor de Rochas Ornamentais: Explicação de fatos no Brasil e na Europa.** Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEAMA). Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA). Governo do Estado do Espírito Santo. Vitória, ES. 2006. Disponível em: <http://www.sindirochas.com.br/arquivos/palestras_Palestra_Europa.pdf> Acesso em 13 set. 2013.

CHIODI FILHO, C. O Setor de Rochas Ornamentais e de Revestimento. In: FENAFEG – Feira Nacional de Fornecedores e Empresas de Geologia, 4, 2009, São Paulo. **Palestra...**, São Paulo, Instituto de Geociências. USP, 2009.

COELHO, A. A. de M. e VIDAL, F. W. H. **Métodos e Tecnologias de Lavra Para a Melhoria da Qualidade e Produtividade dos Blocos de Granito no Ceará.** Centro de Tecnologia Mineral (CETEM). Rio de Janeiro. 2006.

COLANGELO, F.; MARROCCOLI, M.; CIOFFI, R. Properties of self-levelling concrete made with industrial wastes. In: **RILEM proceedings pro**, v. 40, p. 580-589, 2010.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **Durable concrete structures: Design Guide**, ed. 2, London, 1992.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. 1992-2. **Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 2: Concrete bridges.** European Committee for Standardization, 1996

CONCEIÇÃO, M.N.; CARANASSIOS, A.; RIBEIRO, R.C.C. Avaliação mecânica e acústica do pavimento asfáltico formado com resíduos oriundos do beneficiamento de rochas ornamentais. In: Jornada de Iniciação Científica, 18., 2010, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CETEM, 2010.

CORINALDESI, V.; MORICONI, G.; NAIK, T. R. Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete. In: **Construction and Building Materials**. v. 24, p. 113–117, 2010.

COSTA, Alexandre Sylvio Vieira da; HORN, Adolf H.; DONAGEMMA, Guilherme Kangussú; SILVA, Marcelo Barreto da. Uso do resíduo de granito oriundo da serraria e polimento como corretivo e fertilizante de solos agrícolas.

Revista do Centro de Pesquisa Professor Manoel Teixeira da Costa – **GEONOMOS**. Instituto de Geociência. Universidade Federal de Minas Gerais. V. 18, p. 23-27. 2010.

COSTA, Rodrigo Moysés. **Análise de propriedades mecânicas do concreto deteriorado pela ação de sulfato mediante utilização do UPV**. 2004. Tese (Doutor em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

DAL MOLIN, Denise Carpena Coutinho. **Adições Minerais**. Capítulo 08. Seção II Materiais. Concreto: Ciência e Tecnologia. G.C. Isaia. 1. Ed. São Paulo, IBRACON, 2011. 1v.

DANTAS, A.P.A. **Utilização de resíduos de rochas ornamentais na produção de cerâmica branca**. 2008. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

DE AZEREDO, S.R.; BOBROVNITCHII, G.S.; GUIMARÃES, R.S.; FILGUEIRA, M. Desenvolvimento de um novo compósito abrasivo de desbaste de rochas ornamentais. In: **Revista Matéria**. v. 13, n. 1, p. 203-208, 2008.

DEPUY, G.W. Chemical resistance of concrete: Concrete and Concrete - Making Materials. **ASTM STP 169C**, Philadelphia, PA, 1994, pg. 263– 281.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 1045-2**: Concrete – Specification, properties, production and conformity. Berlin, 2001.

DHANYA, B.S. **Transport mechanisms in concrete and durability test methods**. Trabalho apresentado no National Workshop on Achieving Durable Concrete Construction Through Performance Testing, Índia. [s.d.]. Disponível em: < <http://www.theconcreteportal.com/dhanya.pdf>>. Acesso em: 14 abr. 2014.

ELICHE-QUESADA, D.; CORPAS-IGLESIAS, F. A.; PÉREZ-VILLAREJO, L.; IGLESIAS-GODINO, F. J. Recycling of sawdust, spent earth from oil filtration, compost and marble residues for brick manufacturing. **Construction and Building Materials**. v. 34, p. 275-284, 2012.

FALCÃO Pontes, Ivan; STELLIN JÚNIOR, Antônio. Utilização de Finos de Serrarias do Espírito Santo nas Indústrias de Construção Civil. In: **Jornadas IBERMAC Materiais de Construção**. Madri, Espanha: 2001.

FURTADO, W.S. **Estudo de Caso da Pedra Rio Mármore e Granitos LTDA: Uma Análise de Custos através do método ABC – Custeio Baseado em Atividade como Estratégia 10 Competitiva**. Dissertação. (Mestrado em Economia Empresarial) - Universidade Cândido Mendes, Rio de Janeiro. 2009.

GALLERY of Rotatable Structures. University of Liverpool, [s.d.]. Disponível em:

< <http://www.chemtube3d.com/gallery/structurepages/so42-.html>>. Acesso em: 2 abr. 2014.

GENCEL, O.; OZEL, C.; KOKSAL, F.; ERDOGMUS, E.; MARTÍNEZ-BARRERA, G.; BROSTOW, W. Properties of concrete paving blocks made with waste marble. **Journal of Cleaner Production**. v. 21, p. 62-70, 2012.

GHRICI, M; KENAI, S.; SAID-MANSOUR, M. Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements. In: **Cement and Concrete Composites**. V. 29, issue 7, p. 542–549. 2007.

GOBBO, L. A.; MELLO, I. S. C. Reciclagem dos resíduos finos da serragem de mármore e granitos pela indústria de cimento. **Anais**. 1st International Congress of Dimension Stones. 6p, 2005.

GOMES, Abdias Magalhães; COSTA, Juliana Oliveira; ALBERTINI, Horácio; AGUIAR, José Eduardo. Permeability of Concrete: A Study Intended for the "in situ" Valuation Using Portable Instruments and Traditional Techniques. In: BAM, Berlin, Germany, 16 a 19 de setembro de 2003. **Anais...Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung**, 2003.

GONÇALVES, J.; MOURA, W.; DAL MOLIN, D. Avaliação da influência da adição do resíduo de corte de granito (RCG), como adição, em propriedades mecânicas do concreto. **Ambiente Construído**. v. 2, nº 1, p. 53-68, 2002.

GONÇALVES, Jardel Pereira. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos**. Dissertação (Mestrado) de Pós-graduação de Engenharia Civil. Porto Alegre, RS: 2000.

GUIDONI. **Fio Diamantado – Tear de Multifio**. São Gabriel da Palha, ES. 2010. Disponível em: <http://www.comercialguidoni.com.br/pages/produtos_FD_TearMultiFio.aspx>. Acesso em 13 set. 2013. Ilustração.

HAMEED, M. S.; SEKAR, A. S. S. Properties of green concrete containing quarry rock dust and marble aludge powder as fine aggregate. In: **ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences**. v. 4, n. 4, p. 83-89, 2009.

HARSTSHORN, S.A.; SHARP, J.H.; SWAMY, R.N. The thaumasite form of sulfate attack in Portland-limestone cement mortars stores in magnesium sulfate solution. In: **Cement and Concrete Composites**, v. 24, p. 351-359, 2002.

HARTSHORN, S.A., SWAMY, R.N., SHARP, J.H. Engineering properties and structural implications of Portland limestone cement mortar exposed to magnesium sulphate attack. In: **Advances in Cement Research**, v.13, p.31-46, 2001.

HELENE, P.; ANDRADE T. Concreto de cimento Portland. In: ISAIA, G. C.(Ed.) **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2 v., v.2, p. 905-944. 2007.

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

INSTITUTO METAS. **Identificação, Caracterização e Classificação de Arranjos Produtivos de Base Mineral e de Demanda Mineral Significativa no Brasil**. Belo Horizonte: MCT/CGEE/CNPq/FIEMG, 2002.

IRASSAR, E.F. Sulfate attack on cementitious materials containing limestone filler – A review. In: **Cement and Concrete Research.**, v39, p. 241-254, 2009.

IRASSAR, E.F.; BONAVETTI, V.L.; TREZZA, M.A.; GONZALEZ, M.A. Thaumaside formation in limestone filler cements exposed to sodium sulphate solution at 20°C. In: **Cement and Concrete Composites**, v.27, p.77-84, 2005.

JAIN N. Effect of nonpozzolanic and pozzolanic mineral admixtures on the hydration behavior of ordinary Portland cement. **Construction and Building Materials**. v. 27, p. 39-44, 2012.

JOHN, Vanderlei Moacyr; AGOPYAN, Vahan. Reciclagem de Resíduos da Construção. In: **Seminário de Reciclagem de Resíduos Sólidos Domésticos**. São Paulo: SP. 2000.

KACEJKO, Malcorzata. **Air Permeable Concrete**. Student's Report. Aalborg University. School of Engineering and Science. 2011.

KAKALI, G.; TSIVILIS, S.; SKAROPOULOU, A.; SHARP, J.H.; SWAMY, R.N. Parameters affecting thaumasite formation in limestone cement mortar. In: **Cement and Concrete Composites**, v. 25, p.977–981, 2003.

KALLA, P.; MISRA, A.; GUPTA, R.C.; CSETENVI, L.; GAHLOT, V.; ARORA, A. Mechanical and durability studies on concrete containing wollastonite – fly ash combination. In: **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 1142-1150, 2013.

KARASBAHIN, M.; TERZI, S. Evaluation of marble waste dust in the mixture of asphaltic concrete. **Construction and Building Materials**. v. 21, p. 616-620, 2007.

KHATRI, R.P.; SIRIVIVATNANON, V.; YANG, J.L. Role of permeability in sulphate attack. In: **Cement and Concrete Research**, v. 27, p. 1179–1189, 1997.

LAU, Wanda. Findings from the world of concrete. In: **Architect**. Washington, 6 fev. 2014.Disponível em: <<http://www.architectmagazine.com/concrete/seven->

technologies-from-the-world-of-concrete-for-the-world-of-architecture.aspx.
Acesso em: 10 jul. 2014.

LEE, S. T.; HOOTON, R. D.; JUNG, H. S.; PARK, D. H.; CHOI, C. S. Effect of limestone filler on the deterioration of mortars and pastes exposed to sulfate solutions at ambient temperature. In: **Cement Concrete Research**, v. 38, p. 68–76, 2008.

LI, Ying; YU, Hongfa; ZHENG, Lina; WEN, Jing; WU, Chengyou; TAN, Yongshan. Compressive strength of fly ash magnesium oxychloride cement containing granite wastes. In: **Construction and Building Materials**. V. 38, p. 1-7. China: jan. 2013.

LIMA, Maryangela Geimba de. **Ações do meio ambiente sobre as estruturas de concreto**. Capítulo 21. Seção V Durabilidade do Concreto. Concreto: Ciência e Tecnologia. G.C. Isaia. 1. Ed. São Paulo, IBRACON, 2011. 1v.

LIMA, R.C.O. **Estudo da durabilidade de paredes monolíticas e tijolos de solo-cimento incorporados com resíduo de granito**. 2010. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

LISBOA, Edvaldo Monteiro. **Obtenção do Concreto Auto-Adensável Utilizando Resíduo do Beneficiamento do Mármore e Granito e Estudo de Propriedades Mecânicas**. Dissertação (Mestrado) de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas. Maceió: 2004.

LOPES, João Luís Macedo Prudêncio; BACARJI, Edgar; PAZINI Alexandre, Ênio Jose; RÊGO, João Henrique da Silva; PEREIRA, Alexandre Castro. Estudo do potencial de utilização do resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG), como fíler, para a produção de concretos. In: Congresso de Pesquisa, Ensino e Extensão da UFG – COMPEEX. **Anais eletrônicos do III Seminário de Pós-Graduação da UFG**. Goiânia: 2006. 5p.

LU, Xinying. CHEN, Meixia; YUAN, Fang. Evaluations of concrete permeability by critical voltage. In: **Cement and Concrete Research**, v.30, n°6, p. 973-975, 2000.

MAGALHÃES, Aldo Giuntini de. **Caracterização e análise macro e microestrutural de concretos fabricados com cimentos contendo escórias de alto-forno**. 2007. 268 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Curso de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

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. In: **Química Nova**, São Paulo, v. 31, n. 6, p. 1301-1304, 2008.

MANHÃES, J.P.V.T.; MOREIRA, J.M.S.; HOLANDA, J.N.F. Variação microestrutural de cerâmica vermelha incorporada com resíduo de rocha ornamental. In: **Cerâmica**, v. 55, p. 371-378, 2009.

MARÇAL, R. L. S. B.. **Fabricação de vidros especiais a partir de resíduos da indústria de rochas ornamentais**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Ciência dos Materiais. Instituto Militar de Engenharia, 2011.

MÁRMOL, I.; BALLESTER, P.; CERRO, S.; MONRÓS, G.; MORALES, J.; SÁNCHEZ, L. Use of granite sludge wastes for the production of coloured cement-based mortars. In: **Cement & Concrete Composites**. v. 32, p. 617-622, 2010.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto. Microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

MEHTA, P.K. Sulfate attack on concrete: separating myths from reality. In: **Concrete International**, v.22, p. 57-61, 2000.

MENEZES, R. R.; FARIAS FILHO, J.; FERREIRA, H. S.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. Reciclagem de resíduos da construção civil para a produção de argamasas. **Cerâmica**. v. 55, p. 263-270, 2009.

MENEZES, Ricardo Gallart de. **Tecnologias de lavra em maciços rochosos**. Curso de especialização em Tecnologia e Valorização em Rochas Ornamentais. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Centro de Ciências Matemática e da Natureza. Rio de Janeiro, 2005.

MONTANI, C. **Stone – Repertorio Economico Mondiale**. Milano: FaenzaEditrice, edições de 1998 a 2008.

MOOSBERG-BUSTNES, H.; LAGERBLAD, B.; FORSSBERG, E. The function of fillers in concrete. In: **Materials and Structures/ Matériaux et Constructions**, v.37, p. 74-81, março 2004.

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. In: **Cerâmica**, 49, p. 262-267, 2003.

MOREIRA, J.M.S.; MANHÃES, J.P.V.T.; HOLANDA, J.N.F. Reaproveitamento de resíduo de rocha ornamental proveniente do Noroeste Fluminense em cerâmica vermelha. In: **Cerâmica**, 51, p. 180-186, 2005.

MORENO, F.; RUBIO, C.; ECHEVARRIA, M. J. M. Reuse of sludge from the decorative quartz industry in hot bituminous mixes. **Constructions and Building Materials**. v. 25, p. 2465-2471, 2011.

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. UFES. UEFS. 2007.

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. In: **Sitientibus**, 2.26, p. 49-61. Feira de Santana: 2002.

MOURA, W.A.; LIMA, M.B.L.; CALMON, J.L.; MORATTI, M.; SOUZA, F.L.S. Utilização de resíduo de serragem de rochas ornamentais (RSRO) como substituição parcial do cimento na produção de blocos pré-moldados de argamassa. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ENTAC, 11, 2006, Florianópolis. **Anais...**Porto Alegre: ANTAC, 2006.

MOURA, Washington Almeida; LEITE, Mônica Batista. Estudo da viabilidade da produção de blocos com utilização de resíduo de serragem de rochas ornamentais para alvenaria de vedação. In: **Revista Escola de Minas**, vol.64, ním.2, abril-jun, p. 147-154. Escola de Minas, Brasil: 2011.

MUNN, Robert L.; KAO, Gary; CHANG, Z. Tian. **Durability Performance of Australian Commercial Concrete Modified with Permeability Reducing Admixture.** Xypex Concrete Solutions. Australia. 2003

NEVILLE, A.M.; BROOKS, J.J. **Tecnologia do concreto.** São Paulo: Bookman. 2º edição, 2013.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do Concreto.** Tradução: Salvador E. Giammusso. 2ª edição. São Paulo: PINI, 828 p., 1997.

NEVILLE, Adam. The confused world of sulfate attack on concrete. In: **Cement and Concrete Research**, v.34, p. 1275-1296, 2004.

OBLA, Karthik; LOBO, Colin; LEMAY, Lionel. **Specifying Concrete for Durability.** Performance-Based criteria offer best solutions. Concrete In Focus. 2005. p 42-50.

OLIVEIRA, C.N.; QUEIRÓZ, J.P.C. ;RIBEIRO, R.C.C.; Efeito da Fertilização do Solo com Resíduos de Rochas Ornamentais na Qualidade do Biodiesel Extraído. In: **XVII Jornada de Iniciação Científica – CETEM**, 2009, Rio de Janeiro, Brasil.

REGADAS, Isaura Clotilde Martins da Costa. **Aspectos relacionados às lavras de granitos ornamentais com fio diamantado no norte do estado do Espírito Santo, Brasil.** Dissertação (Mestrado em geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

REIS, A.S., **Estudo do aproveitamento do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais na fabricação de ladrilho hidráulico piso tátil.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em

engenharia civil, Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008.

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. T. **Projetos de Experimentos**. Porto Alegre: UFRGS, 2010.

RIBEIRO, R. C. C.; ARRUDA, C. M. R.; VIDAL, F. W. H.; OLIVEIRA, M. G. Geração de compósitos poliméricos utilizando resíduo de rochas ornamentais como carga. In: Congresso Brasileiro de Química – Meio Ambiente e Energia, 51, 2011, São Luís. **Anais...Maranhão**: CBQ, 2011.

RIBEIRO, Roberto Carlos da Conceição; ARRUDA, Camila Maria Rosa. **Alternativas de aplicações para resíduos de rochas ornamentais**. Centro de Tecnologia Mineral (CETEM). Ministério da Ciência e Tecnologia. 2003

ROCHA, Rodrigo Penha Andrade. **Permeabilidade e permeabilidade aparente de meios porosos com microestruturas tridimensionais**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto Alberto Luiz Coimbra. Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. 2007. 138p.

RODRIGUES, G. F.; ALVES, J. O.; TENÓRIO, J. A. S.; ESPINOSA, D. C. R. Estudo de resíduos de rochas ornamentais para a produção de materiais vítreos. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, São Paulo, v. 8, n. 3, p. 203-207, 2011.

RODRIGUES, Girley Ferreira. **Reciclagem de resíduos visando à produção de lâ mineral**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

RUBIO, C.; MORENO, F.; BELMONTE, A.; MENÉNDEZ A. Reuse of waste material from decorative quartz solid surfacing in the manufacture of hot bituminous mixes. **Construction and Building Materials**. v. 25, p. 2465-2471, 2010.

SANTOS, Jaqueline Guimarães; SILVA, Sandra Sereide Ferreira da; NASCIMENTO, Naudienne Maria da Silva; TRAJANO, Marinalva Ferreira; MELLO, Valdicleide Silva e. 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., 2010, São Carlos. **Anais...São Carlos**: ENEGEP, 2010.

SANTOS, Silvia. **Produção e avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SATO, Neide M. N.; JOHN, Vanderley M.; AGOPYAN, Vahan. Mecanismos de transporte de água em concreto e argamassas. In: 37º Reunião anual do IBRACON, Goiânia, 3 a 7 de julho de 1995. **Anais...**São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 1995. V.1. p.47-61.

SCHUTTER, G. de. Effect of limestone filler as mineral addition in self-compacting concrete. In: Our world in concrete & structures, 36.,2011, Singapura. **Anais...**Singapura: Singapura Concrete Institute, 2011.

SEGADÃES, A. M.; CARVALHO, M. A.; ACCHAR, W. Using marble and granite rejects to enhance the processing of clay products. **Applied Clay Science**. v. 30, p. 42-52, 2005.

SENHADJI, Yassine; MOULI, Mohamed; KHELAFI, Hamid; BENOSMAN, Ahmed Soufiane. Sulfate attack of Algerian cement-based material with crushed limestone filler cured at different temperatures. In: **Turkish Journal Engineering Environmental Sciences**, v.34, p.131 – 143, 2010.

SILVA, A.A.A. Gestão de resíduos na indústria de rochas ornamentais, com enfoque para a lama abrasiva. In: Congresso Nacional de Excelência em Gestão, 7., 2011, Rio de Janeiro. **Anais...**Rio de Janeiro: CNEG, 2011.

SILVA, J.B; HOTZA, D.; SEGADÃES, A.M.; ACCHAR, W. Incorporação de lama de mármore e granito em massas argilosas. **Cerâmica**, 51, p. 325-330, 2005.

SILVEIRA, Adriana Augustin. **A utilização de cinza de casca de arroz com vistas a durabilidade de concretos: estudo do ataque por sulfatos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

SKALNY, J. Materials Science of Concrete: Sulfate Attack Mechanisms, **The American Ceramic Society**, Westerville, USA, pp. 189–205, 1999.

SOUZA, A.J.; PINHEIRO, B.C.A.; HOLANDA, J.N.F. Efeito da adição de resíduo de rocha ornamental nas propriedades tecnológicas e microestrutura de piso cerâmico vitrificado. In: **Cerâmica**, 57, p. 212-218, 2011.

SOUZA, J.N.; RODRIGUES, J.K.G.; NETO, P.N.S. **Utilização do resíduo proveniente da serragem de rochas graníticas como material de enchimento em concretos asfálticos usinados a quente**. Associação Técnico Científica Ernesto Luiz de Oliveira Júnior. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2005.

SOUZA, Vicente Custódio Moreira de; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 2009.

STATSOFT, INC. Programa computacional **Statistica 7.0**. E.A.U, 2004.

THOMAS, Jeff. JENNINGS, Hamlin. **The Science of concrete**. Evanston, 2014. Disponível em: < <http://iti.northwestern.edu/cement/index.html>>. Acesso em: 20 jan. 2014.

TOPÇU, I. B.; BILIR, T.; UYGUNOGLU, T. Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete. In: **Construction and Building Materials**. v. 23, p. 1947–1953, 2009.

TORRES, P.; FERNANDES, H. R.; OLHERO, S.; FERREIRA, J. M. F. Incorporation of wastes from granite rock cutting and polishing industries to produce roof tiles. In: **Journal of the European Ceramic Society**. v. 29, p. 23-30, 2008.

TORRES, S.M.; SHARP, J.H.; SWAMY, R.N.; LYNSDALE, C.J.; HUNTLEY, S.A. Long term durability of Portland-limestone cement mortars exposed to magnesium sulfate attack. In: **Cement and Concrete Composites**, v. 25, p. 8947-8954, 2003.

TORRES, S.M; KIRK, C.A.; LYNSDALE, C.J.; SWAMY, R.N.; SHARP, J.H. Thaumasite-ettringite solid solutions in degraded mortars. In: **Cement and Concrete Research**, v.34, p. 1297-1305, 2004.

TSIVILIS, S.; KAKALI, G.; SKAROPOULOU, A.; SHARP, J.H.; SWAMY, R.N. Use of mineral admixtures to prevent thaumasite formation in limestone cement mortar. In: **Cement and Concrete Composites**, v.25, p.969-976, 2003.

ULIANA, Juliana Gavini. **Estudo de tratamento térmico para aplicação da lama do beneficiamento de rochas ornamentais como substituição parcial de cimento**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Vitória, 2014.

WINTER, Nicholas. **Undertanding Cement**. Suffolk: WHD Microanalysis Consultants Ltd, 2012.