



Denisson Braun do Rosário

Influência do Resíduo Proveniente do Corte de Rochas Ornamentais Mármore e Granito (RCMG) como substituição parcial ao cimento Portland nas Propriedades de Concretos Convencionais.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

Orientador: Professor Dr. Marcelo de Souza Picanço

Belém – Pará – Brasil

2018



Denisson Braun do Rosário

Influência do Resíduo Proveniente do Corte de Rochas Ornamentais Mármore e Granitos (RCMG) como substituição parcial ao cimento portland nas Propriedades de Concretos Convencionais.

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Marcelo de Souza Picanço

Belém 29 de julho de 2018

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Denisson Braun do Rosário

TÍTULO: Influência do Resíduo Proveniente do Corte de Rochas Ornamentais Mármore e Granito (RCMG) como substituição parcial ao cimento portland nas Propriedades de Concretos Convencionais.

GRAU: Mestre

ANO: 2018

É concedida à Universidade Federal do Pará permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Denisson Braun do Rosário

Av. Augusto Correa, nº1, Campus Universitário do Guamá, Laboratório de Engenharia Civil, Belém, Pará. CEP 66075-970

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará

Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

do Rosário, Denisson Braun.

D631i do Rosário, Denisson Braun.

Influência do Resíduo Proveniente do Corte de Rochas Ornamentais Mármore e Granitos (RCMG) como substituição parcial ao cimento portland nas Propriedades de Concretos Convencionais. / Denisson Braun do Rosário. — 2018.

98 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço

Coorientador(a): Prof. Dr. Bernardo Borges Pompeu Neto

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2018.

1. Aproveitamento de Resíduos. 2. Concretos Especiais. 3. Mármore e Granito. 4. Rochas Ornamentais. I. Título.

CDD 691.9



RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL: CONTROLE POR MEIO DO MÉTODO LEAN CONSTRUCTION

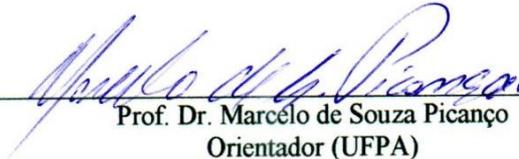
AUTOR:

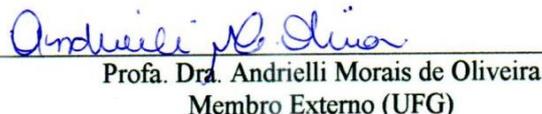
DENISSON BRAUN DO ROSÁRIO

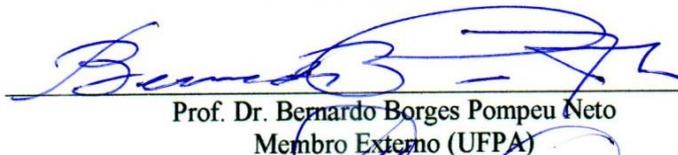
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRA EM ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

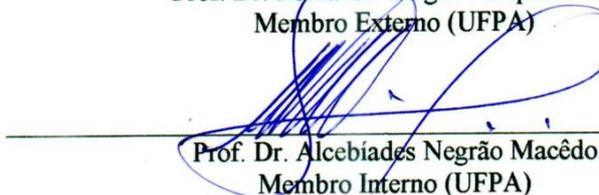
APROVADO EM: 29 / 06 / 2018.

BANCA EXAMINADORA:

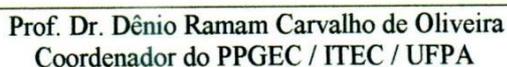

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Orientador (UFPA)


Profa. Dra. Andrielli Morais de Oliveira
Membro Externo (UFG)


Prof. Dr. Bernardo Borges Pompeu Neto
Membro Externo (UFPA)


Prof. Dr. Alcebiades Negrão Macêdo
Membro Interno (UFPA)

Visto:


Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

“O sucesso é a soma de pequenos esforços repetidos dia após dia”

(Robert Cullier)

Agradecimentos

À Deus, por meio das minhas orações e fé, a minha família por nunca me abandonar e me manter centrado nos momentos difíceis que tive que enfrentar ao longo do mestrado.

Ao Prof. Dr. Marcelo Picanço que me orientou na pesquisa.

A CAPES pelo financiamento da pesquisa, na forma de bolsa de mestrado.

Ao laboratorista Joel Martins pela ajuda nos ensaios.

Aos meus amigos Francisco Neto, André Malcher, Marcelly Mendonça, Renata Godinho, Vander Melo que muito me ajudaram e me aturaram, à todas as amizades que fiz na Universidade Federal do Pará durante o mestrado.

Enfim, agradeço a todas as pessoas que direta e indiretamente contribuíram para que eu chegasse até aqui. O MEU MUITO OBRIGADO!

ROSÁRIO, D. B. Influência do Resíduo Proveniente do Corte de Rochas Ornamentais Mármore e Granitos (RCMG) como substituição parcial ao cimento Portland Nas Propriedades de Concretos Convencionais. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém, 2018.

Resumo

Grande parte dos processos industriais são fontes geradoras de resíduos, na forma de gases, líquidos ou sólidos, provocando, quase sempre, degradação ambiental. A utilização de resíduos e subprodutos industriais na Construção Civil apresenta-se como uma excelente alternativa para diminuição do impacto ambiental causado, e maior contribuição para o desenvolvimento sustentável, considerando que a Construção Civil é o setor da atividade tecnológica que consome grande volume de recursos naturais e parece ser um dos mais indicado para absorver os resíduos sólidos. O resíduo gerado a partir do beneficiamento de rochas (resíduo de corte de mármore e granitos) é resultante do processo de serragem de blocos de rochas em placas. Na serragem, cerca de 20% a 30% do bloco é transformado em pó, que na maioria dos casos, é depositado nos pátios das empresas. Em 2008, a produção mundial de rochas totalizou cerca de 105 milhões de toneladas e, no Brasil, foram produzidas 7,8 milhões de toneladas. Deste montante, cinco milhões foram distribuídas entre mármore, travertinos, granitos e similares, o equivalente a 63% da produção total brasileira, gerando aproximadamente 1,25 milhões de toneladas de rejeitos oriundos desse processamento, ou seja, 25% de resíduo de corte de mármore e, sendo o Espírito Santo, Bahia, Ceará e Paraíba os estados que geram maior volume. Neste trabalho foi realizado a caracterização física, química e mineralógica do resíduo de corte de mármore e granito (RCMG), bem como a avaliação do potencial como material pozolânico. Foi também realizada a viabilidade do seu uso em concretos, com substituição parcial em teores de 5% ,10% e 15% em relação à massa de cimento. Para os concretos produzidos, foram avaliadas as propriedades do concreto no estado fresco (trabalhabilidade, consistência) no estado endurecido (resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade), e parâmetros de durabilidade (absorção por capilaridade absorção por imersão). A análise dos resultados permite concluir que o resíduo de corte de

mármore e granito apresentou resultados satisfatórios e tem potencial de ser utilizado dentro da cadeia produtiva da construção civil.

Palavras-chave: Aproveitamento de Resíduos; Concretos Especiais; Mármore e Granito

ROSÁRIO, D.B. **Influence of the Residue from the Cutting of Ornamental Stones Marble and Granite (RCMG) as a partial replacement for portland cement in the properties of conventional concrete.** Masters dissertation. Graduate Program in Civil Engineering. Federal University of Pará, Belém, 2018.

Abstract

Most of the industrial processes are sources of waste, in the form of gases, liquids or solids, causing, almost always, environmental degradation. The use of waste and industrial by-products in Civil Construction is an excellent alternative to reduce the environmental impact caused, and greater contribution to sustainable development, considering that Civil Construction is the sector of technological activity that consumes a large volume of natural resources and appears to be one of the most suitable for absorbing solid waste. The residue generated from the processing of rocks (cutting residue of marbles and granites) is the result of the sawing process of blocks of rocks in slabs. In the sawdust, about 20% to 30% of the block is transformed into powder, which in most cases is deposited in corporate yards. In 2008, world rock production totaled about 105 million tons and in Brazil, 7.8 million tons were produced. Of this amount, five million were distributed among marbles, travertines, granites and the like, equivalent to 63% of the total Brazilian production, generating approximately 1.25 million tons of tailings resulting from this processing, that is, 25% marble, and, being the Holy Spirit, Bahia, Ceará and Paraíba the states that generate the greatest volume. In this work the physical, chemical and mineralogical characterization of the marble and granite cutting residue (RCMG) was carried out, as well as the potential evaluation as pozzolanic material. It was also carried out the feasibility of its use in concretes, with partial substitution in contents of 5%, 10% and 15% in relation to the mass of cement. For the concretes produced, the properties of the concrete in the fresh state (workability, consistency) in the hardened state (axial compressive strength, diametral compression tensile strength and flexural tensile strength and modulus of elasticity) were evaluated and durability parameters (absorption by capillary absorption by immersion). The analysis of the results allows to conclude that the cutting residue of marble and granite

presented satisfactory results and has potential to be used within the productive chain of the civil construction.

Keywords: Waste Utilization; Special Concrete; Marble and granite

Lista de Figuras

Figura 1- Estrutura da dissertação	8
Figura 2.1 – Exportações por país de destino	12
Figura 2.2 – Estados Exportadores	13
Figura 2.3 -Etapas do beneficiamento das rochas ornamentais.....	24
Figura 2.4 - Jazida de Granito(a); (b) Bloco Extaido; (c) Bloco Beneficiado;(d)Chapas Beneficiadas;(e) Residuo de Granito(Sobras); (f) Residuo de Granito (Lama.. ..	25
Figura 2.5- Organograma do planejamento da pesquisa	28
Figura 2.6 – Organograma da caracterização do RCMG	29
Figura 3.1 - Curva granulométrica do agregado graúdo.....	32
Figura 3.2 - Curva granulométrica do agregado miúdo.....	34
Figura3.3-(a)chapas beneficiadas;(b)serra de corte;(c)Resíduo de granito (Lama);(d)Resíduo de granito(Retalhos).....	37
Figura 3.4– Secagem do resíduo ao sol	37
Figura 3.5 - Granulometria a laser do RCMG e Cimento CPV.....	38
Figura 3.6 - Finura do RCMG.....	39
Figura 3.7 - Difratograma de Raio X do RCMG.....	42
Figura 3.8 -Morfologia do RCMG.....	43
Figura 3.9 - IAP com Cal.....	46
Figura 3.1.1 - IAP com cimento.....	48
Figura 3.1.2 - Gráfico expansões ao longo do tempo.....	50
Figura 4.1 -Gráfico de dosagem método IPT/EPUSP.....	51
Figura 4.2 -Resistencia a compressão Axial aos 7 dias.....	55
Figura 4.3 -Resistencia a compressão Axial aos 28 dias.....	56
Figura 4.4 -Resistencia a compressão Axial aos 60 dias.....	56
Figura 4.5 -Resistencia a compressão diametral aos 7 dias.....	58
Figura 4.6 - Resistencia a compressão diametral aos 28 dias.....	59
Figura 4.7 - Resistencia a tração na flexão aos 28 dias.....	60
Figura 4.8 -Módulo de Elasticidade aos 28 dias.....	62
Figura 4.9 -Grafico Tensão x Deformação dos concretos.....	62
Figura 4.1.1 -Grafico de Absorção Capilar.....	63
Figura 4.1.2 - Grafico Absorção por Imersão.....	65

Figura 4.1.3 -Microscopia dos concretos com RCMG.....	66
---	----

Lista de Tabelas

Tabela 2.1- Compostos químicos encontrados nos resíduos de mármore e granitos	26
Tabela 3.1 – Caracterização do cimento CPV	30
Tabela 3.2 – Caracterização do agregado graúdo.	31
Tabela 3.3- Caracterização do agregado miúdo.....	33
Tabela 3.4- Caracterização do aditivo	35
Tabela 3.5- Caracterização física do RCMG.....	39
Tabela 3.6 – Análise química do RCMG	41
Tabela 3.7 – IAP com Cal	45
Tabela 3.8 - IAP com Cimento.....	47
Tabela 4.1- Quantidades de corpos de prova de concreto.....	52
Tabela 4.2 - Quantitativo de materiais usados nos concretos.....	53
Tabela 4.3 - Consistência dos Concretos.....	54

Lista de Símbolos

Símbolo	Significado
<i>ABIROCHAS</i>	Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais
<i>ABCP</i>	Associação Brasileira de Cimento Portland
<i>ABNT</i>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>ASTM</i>	American Society For Testing and Materials
A1 Ref	Argamassa de Referência 1
A2 Ref	Argamassa de Referência 2
A3 Ref	Argamassa de Referência 3
A4 Ref	Argamassa de Referência 4
A25 RCMG 1	Argamassa com 25% de RCMG 1
A25 RCMG 2	Argamassa com 25% de RCMG 2
A25 RCMG 3	Argamassa com 25% de RCMG 3
A25 RCMG 4	Argamassa com 25% de RCMG 4
<i>CREF</i>	Concreto de Referencia
<i>C5RCMG</i>	Concreto com 5% de RCMG
<i>C10RCMG</i>	Concreto com 10% de RCMG
<i>C15RCMG</i>	Concreto com 15% de RCMG
<i>DNPM</i>	Departamento Nacional de Produção
<i>IPT</i>	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo
<i>LEC</i>	Laboratório de Engenharia Civil
<i>RCMG</i>	Resíduo de Corte de mármore e granito
<i>RMG</i>	Rejeitos da indústria de beneficiamento de mármore e granitos
<i>RBMG</i>	Resíduo de Beneficiamento de mármore e granito
<i>RSRO</i>	Resíduo de Serragem de Rochas Ornamentais
<i>RRO</i>	Resíduo de rochas ornamentais
<i>RM</i>	Resíduo de mármore
<i>RCG</i>	Resíduo do corte de granito
<i>RG</i>	Resíduo de granito
SETEC	Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica
<i>UFPA</i>	Universidade Federal do Pará

Lista de Abreviaturas e Símbolos

Símbolo	Significado
<i>a/c</i>	<i>Relação água/cimento</i>
<i>A</i>	<i>Annita</i>
<i>Al₂O₃</i>	<i>Óxido de alumínio</i>
<i>Cal</i>	<i>Calcita</i>
<i>CaO</i>	<i>Óxido de cálcio</i>
<i>CP's</i>	<i>Corpos de prova</i>
<i>CPI</i>	<i>Cimento Portland comum</i>
<i>CPV – ARI</i>	<i>Cimento Portland de alta resistência inicial</i>
<i>CR</i>	<i>Concreto de Referência</i>
<i>C-S-H</i>	<i>Silicato de Cálcio Hidratado</i>
<i>F_c</i>	<i>Resistência à compressão axial (MPa)</i>
<i>f_{ct,sp}</i>	<i>Resistência à tração por compressão diametral (MPa)</i>
<i>F</i>	<i>Feldspato</i>
<i>Fe₂O₃</i>	<i>Óxido de ferro (III)</i>
<i>FeO</i>	<i>Óxido de ferro (II)</i>
<i>MEV</i>	<i>Microscópio Eletrônico de Varredura</i>
<i>MgO</i>	<i>Óxido de magnésio</i>
<i>MPa</i>	<i>Mega Pascal</i>
<i>Q</i>	<i>Quartzo</i>

Sumário

1 INTRODUÇÃO	2
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	4
1.2. JUSTIFICATIVA	5
1.3 OBJETIVOS	7
1.3.1 Objetivo Geral	7
1.3.2 Objetivos Específicos	7
1.3.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	7
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1 Rochas Ornamentais	9
2.1.2 Histórico Brasileiro	10
2.1.3 Exportações Brasileiras	11
2.1.4 Volume do Resíduo Gerado	13
2.1.5 Histórico sobre os Estudos com RCMG	15
2.1.6 Efeito das Adições sem Atividade Pozolânica nas Propriedades do Concreto	17
2.1.7 Efeito nas Propriedades do Concreto no Estado Fresco	17
2.1.8 Uso do Resíduo de Corte de Mármore e Granito (RCMG)	20
2.1.9 Uso RCMG como Substituição ao Aglomerante em Matrizes Cimentícias.	20
2.2 Uso do RCMG como Substituição à Areia em Matrizes Cimentícias.	21
2.2.1 Uso do RCMG como Adição em Matrizes Cimentícias	22
2.2.2 Processo de Beneficiamento de Rochas e Geração do RCMG	23
2.2.3 Composição Química do RCMG	26
2.2.4 Classificação do RCMG	27

3 MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1. Planejamento Experimental	27
3.1.1 1ª ETAPA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	30
3.1.2 Cimento Portland	30
3.1.3 Agregado Graúdo	30
3.1.4 Agregado Miúdo	33
3.1.5 Água	34
3.1.6 Aditivo	35
3.1.7 Resíduo do Corte de Mármore e Granito (RCMG)	35
3.1.8 Caracterização Física	38
3.1.9 Caracterização Química.	40
3.2 Caracterização Mineralógica	42
3.2.1 Caracterização Morfológica	43
3.2.2 Caracterização da Reatividade	44
4 2ª ETAPA: DOSAGEM DO CONCRETO	50
4.1. APRESENTAÇÃO, ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
4.1.1 Propriedades do concreto no estado Fresco.	54
4.1.2 Avaliação da Trabalhabilidade.	54
4.1.3 Avaliação da resistência por compressão axial.	55
4.1.4 Avaliação da resistência a tração por compressão diametral.	58
4.1.5 Avaliação da tração na flexão	60

4.1.6 Avaliação do Módulo de Elasticidade.	61
4.1.7 Avaliação da Absorção Capilar	63
4.1.8 Avaliação da absorção por Imersão	64
4.1.9 Análises em Microscopia Eletrônica de Varredura	65
4.2 Conclusões e Sugestões	67
5 Referências Bibliográficas	69
6 Apêndice	76

Resumo

Grande parte dos processos industriais são fontes geradoras de resíduos, na forma de gases, líquidos ou sólidos, provocando, quase sempre, degradação ambiental. A utilização de resíduos e subprodutos industriais na Construção Civil apresenta-se como uma excelente alternativa para diminuição do impacto ambiental causado, e maior contribuição para o desenvolvimento sustentável, considerando que a Construção Civil é o setor da atividade tecnológica que consome grande volume de recursos naturais e parece ser um dos mais indicado para absorver os resíduos sólidos. O resíduo gerado a partir do beneficiamento de rochas (resíduo de corte de mármore e granitos) é resultante do processo de serragem de blocos de rochas em placas. Na serragem, cerca de 20% a 30% do bloco é transformado em pó, que na maioria dos casos, é depositado nos pátios das empresas. Em 2008, a produção mundial de rochas totalizou cerca de 105 milhões de toneladas e, no Brasil, foram produzidas 7,8 milhões de toneladas. Deste montante, cinco milhões foram distribuídas entre mármore, travertinos, granitos e similares, o equivalente a 63% da produção total brasileira, gerando aproximadamente 1,25 milhões de toneladas de rejeitos oriundos desse processamento, ou seja, 25% de resíduo de corte de mármore e, sendo o Espírito Santo, Bahia, Ceará e Paraíba os estados que geram maior volume. Neste trabalho foi realizada a caracterização física, química e mineralógica do resíduo de corte de mármore e granito (RCMG), bem como a avaliação do potencial como material pozolânico. Foi também realizada a viabilidade do seu uso em concretos, com substituição parcial em teores de 5% ,10% e 15% em relação à massa de cimento. Para os concretos produzidos, foram avaliadas as propriedades do concreto no estado fresco (trabalhabilidade, consistência) no estado endurecido (resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade), e parâmetros de durabilidade (absorção por capilaridade absorção por imersão). A análise dos resultados permite concluir que o resíduo de corte de mármore e granito apresentou resultados satisfatórios e tem potencial de ser utilizado dentro da cadeia produtiva da construção civil.

Palavras-chave: Aproveitamento de Resíduos; Concretos Especiais; Mármore e Granito

1 INTRODUÇÃO

O processo de produção e consumo adotado desconsidera, na sua grande maioria, a capacidade limitada dos recursos naturais. Quanto mais avanços tecnológicos, mais recursos naturais, isto é, necessita-se de uma maior quantidade de matéria-prima para produção e oferta da diversidade de bens de consumo à sociedade.

O aumento da degradação e dos níveis de poluição ambiental é mundialmente notório, resultante principalmente pela falta de gestão adequada dos resíduos gerados. Para combater tal situação, é necessário um novo agir de cada ser humano, das lideranças e de todos os segmentos da sociedade, estabelecendo novos modelos de gestão dos recursos naturais, bem como do aproveitamento de resíduos provenientes dos mais diversos segmentos.

No cenário atual é imprescindível que a indústria da construção civil se preocupe com o mercado e com as premissas do desenvolvimento sustentável, visando alternativas de reaproveitamento de resíduos sólidos, reinserindo-os na cadeia produtiva. Vários estudos têm sido realizados neste sentido, com o intuito de reduzir os problemas relacionados ao manejo, armazenamento, transporte e destinação final dos resíduos. O desenvolvimento de novas tecnologias para absorver os rejeitos minimiza o consumo de recursos naturais, de energia, custos e fortalece a competitividade do fabricante no mercado (RODRIGUES *et al.*, 2011).

O desenvolvimento de tecnologias de aproveitamento dos rejeitos de forma ambientalmente eficiente e segura é um desafio, visto que esse volume apreciável acaba gerando diversas dificuldades relacionadas ao seu armazenamento, manejo, transporte e destinação final, além de ônus para o produtor e problemas ambientais de difícil solução. Nesse contexto, a reinserção do resíduo de corte de rochas ornamentais na cadeia produtiva constitui-se em uma alternativa para amenizar um sério problema ambiental, podendo também representar uma fonte de matéria-prima alternativa.

Nas áreas urbanas é onde concentram-se os maiores aglomerados populacionais e, por conseguinte, as maiores extrações de recursos naturais, sendo a construção civil um dos setores que mais impacta o ambiente, responsável por consumir 75% desses recursos no planeta (FECOMÉRCIO, 2012). Cerca de 210 milhões de toneladas de agregados naturais são empregados anualmente na produção de concretos e argamassas, no Brasil (JOHN, 2000). Essa enorme demanda tem esgotado as reservas de matérias gerando maior consumo de energia, poluição e ônus para os produtores, no transporte desses materiais a longas distâncias.

A indústria de rochas ornamentais é responsável por movimentar expressivos volumes no mercado nacional e internacional. Durante o processo de beneficiamento das rochas, quando essas são cortadas em chapas de 20 mm de espessura, são gerados aproximadamente 20% a 30% de resíduos em forma de lama (GONÇALVES, 2000; ALYAMAÇ, 2009, HAGGAR, 2009, BINICI *et al.*, 2007). Em 2007, o resíduo gerado foi estimado em 60 milhões de metros quadrados por ano (CHIODI FILHO, 2008), ficando muitas vezes sem tratamento adequado, disponível a céu aberto, ou lançado em rios e córregos. Em 2008, a produção mundial de rochas totalizou cerca de 105 milhões de toneladas e, no Brasil, foram produzidas 7,8 milhões de toneladas. Deste montante, cinco milhões foram distribuídas entre mármore, travertinos, granitos e similares, o equivalente a 63% da produção total brasileira, gerando aproximadamente 1,25 milhões de toneladas de rejeitos oriundos desse processamento, ou seja, 25% de resíduo de corte de mármore e granito (ABIROCHAS, 2013).

Os estados do Espírito Santo e Minas Gerais são os maiores produtores e exportadores brasileiros, seguidos pela Bahia e Ceará. Em 2008, o Brasil foi o 5º maior produtor mundial, responsável por 7,4% da produção e o 7º maior exportador em todo o mundo, além de abrigar o maior polo de beneficiamento de rochas ornamentais e de revestimento da América Latina (ABIROCHAS, 2013). De acordo com dados de 2006, há 12 mil empresas integradas à cadeia produtiva do setor de rochas ornamentais no Brasil, responsáveis por 145 mil empregos diretos e 420 mil indiretos (CHIODI FILHO, 2008).

O consumo de rochas ornamentais vem crescendo aceleradamente, e conseqüentemente, elevando-se a quantidade de resíduo gerada. No ano 2000, o RCMG gerado foi estimado em 165 mil toneladas (GONÇALVES, 2000) e em 2008 passou para um

milhão e 250 mil toneladas, gerando um aumento de 95% ao ano (CHIODI FILHO, 2008). Este volume expressivo de resíduos demonstra a importância de aproveitá-lo, principalmente na construção civil, pois apresenta grande abrangência, consome grandes quantidades de insumos naturais e, além disso, o RCMG possui elevada finura, sendo bastante compatível com as matrizes cimentícias, podendo ser utilizado como *filler* em argamassas e concretos (GONÇALVES, 2000; MENEZES *et al.*, 2008; ARUNTAŞ *et al.*; CORINALDESI *et al.*, 2010; TOPÇU *et al.*, 2009). Portanto, sua utilização em argamassas minimiza o uso de recursos naturais, contribui para suprir as necessidades habitacionais.

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O processo de produção e consumo adotado no modelo de desenvolvimento econômico vigente desconsidera, na sua grande maioria, a capacidade limitada dos recursos naturais. Quanto mais avanços tecnológicos, mais recursos naturais, isto é, necessita-se de uma maior quantidade de matéria-prima para produção e oferta da diversidade de bens de consumo à sociedade. Essa cultura consumista demonstra a falta de compromisso e de pertencimento planetário.

O aumento da degradação e dos níveis de poluição ambiental é mundialmente notório, resultante principalmente pela falta de gestão adequada dos resíduos gerados. Para combater tal situação, é necessário um novo agir de cada ser humano, das lideranças e de todos os segmentos da sociedade, estabelecendo novos modelos de gestão dos recursos naturais, bem como do aproveitamento de resíduos provenientes dos mais diversos segmentos.

O Brasil vem vivenciando um processo de inúmeras modificações, no tocante ao desenvolvimento econômico e social. Neste contexto, o setor da construção civil é responsável por grande parcela do produto interno bruto (PIB), sendo um grande consumidor de recursos não renováveis, principalmente os de origem mineral.

De acordo com (JOHN, 2008), a construção civil é o setor responsável pelo consumo de maior volume de recursos naturais, em estimativas que variam entre 15% e 50

% dos recursos extraídos, além de seus produtos serem grandes consumidores de energia, e por estas razões, é de fundamental importância o desenvolvimento de materiais alternativos que atendam a essa atividade.

O setor das atividades industriais vem crescendo rapidamente no mundo. Esse crescimento faz com que a poluição ambiental se alastre, gerando significativos impactos na qualidade de vida das pessoas e principalmente do meio ambiente.

Define-se como poluição qualquer alteração física, química ou biológica que produza modificação no ciclo biológico normal, interferindo na composição da fauna e da flora do meio (AGUIAR; NOVAES; GUARINO, 2002). Dentre as inúmeras formas de poluição ambiental está a poluição por resíduos industriais, em que se apresentam graves problemas socioeconômicos e ambientais. Estão envolvidos neste problema a geração, o acondicionamento, o manuseio, a coleta, o transporte, o tratamento e a disposição final (JACOMINO *et al.*, 2002).

1.2. JUSTIFICATIVA

O Brasil detém grandes reservas de pedras ornamentais de revestimento (granito e mármore) com os mais variados aspectos estéticos (Moreira *et al.*, 2003). A indústria de beneficiamento de mármore e granito vem despertando cada vez mais o interesse dos ambientalistas. Atualmente, e em grande parte dos casos, não existe nenhuma preocupação com o meio ambiente, sendo o rejeito jogado diretamente em lagoas e rios, sem nenhum tratamento prévio, o que, apesar de as lamas de serragem não serem consideradas resíduo perigoso (classe I), constitui um sério problema ambiental (Silva, *et al.*, 2005).

As rochas magmáticas ou ígneas são resultantes da consolidação do magma na crosta terrestre, podendo ser intrusiva ou extrusiva. As rochas magmáticas intrusivas ocorrem quando a consolidação se faz lentamente na subsuperfície terrestre, tendo tempo suficiente para os minerais crescerem e serem facilmente visíveis, como é o caso do granito, composto por quartzo, feldspatos, micas e anfibólios. Porém, quando a lava vulcânica se consolida na superfície terrestre, está se resfriando rapidamente não dando tempo dos cristais se desenvolverem tanto, originando então as rochas magmáticas extrusivas, como o caso do

basalto. As rochas ígneas escuras são mais ricas em minerais contendo magnésio e ferro, enquanto que as rochas ígneas claras são mais ricas em silício e alumínio (MACHADO *et al.*, 2013).

Durante a extração das rochas nas pedreiras, estas são cortadas em chapas para o uso em vários ramos da construção civil, gerando resíduos que se caracterizam pelo tipo da rocha extraída, como mármore, granitos ou outras rochas.

O resíduo em forma de lama é constituído principalmente de carbonato de cálcio, um mineral muito utilizado como carga em polímeros para aumentar a estabilidade térmica e dimensional, além de diminuir custo de matéria-prima para confecção de peças plásticas. A utilização da lama residual de marmoraria em polímeros foi colocada em prática visando à diminuição do impacto ambiental, causado tanto pelo descarte da lama como também para procurar uma fonte alternativa de utilização do carbonato de cálcio proveniente de rejeitos (Ferreira e Nunes, 2007).

Conforme (Weinstock,2000), a construção civil pela sua abrangência e pela quantidade de materiais empregados, mão de obra e energia que manuseia, seguramente interfere em grande escala no meio ambiente. Tardiamente, a cadeia produtiva demorou a perceber o grau de impacto gerado e atualmente vê-se forçada a mudanças culturais, tecnológicas e de comportamento para atender às demandas de uma sociedade cada vez mais esclarecida e exigente em relação à preservação do meio ambiente.

A cadeia produtiva das indústrias e da construção civil deve promover o desenvolvimento sustentável, buscando novas posturas ambientais com a pesquisa de materiais e tecnologias mais adequadas, sob o ponto de vista ambiental. Estas pesquisas visam à procura por materiais alternativos em substituição aos materiais convencionais, marcado pelo elevado consumo de matéria-prima e energia não renovável.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência do resíduo de corte de mármore e granito quanto desempenho no estado fresco e endurecido através da trabalhabilidade, resistência mecânica e durabilidade.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Verificar as diferenças nas propriedades mecânicas dos concretos com teores de adição de 5 %, 10 % e 15 % de RCMG.
- b) Avaliar a Efeito que estes teores exercem sobre a trabalhabilidade do concreto no estado fresco.
- c) Consequências contribuir para diminuição dos impactos ao meio ambiente, pela produção de concretos sustentáveis, através do aproveitamento do RCMG

1.3.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está dividida em 4 capítulos, conforme descrito a seguir, e demonstrado na Figura 1

No primeiro capítulo é apresentada a introdução que engloba a contextualização do tema, as justificativas, os objetivos e a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo é constituído por uma revisão bibliográfica, onde inicialmente explana sobre o resíduo de mármore e granito; aspectos gerais; sua mineralogia; classificação; características; beneficiamento; aspectos ambientais, riscos e danos possíveis relacionados ao uso; aplicações de aproveitamento do rejeito de mármore e granito.

No terceiro capítulo descreve-se toda parte experimental aplicada nesta pesquisa, descrevendo o planejamento e a execução dos ensaios, assim como a caracterização dos

materiais utilizados na confecção dos concretos. Neste capítulo definem-se também todas as variáveis de estudo.

O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos dos ensaios, seguidos de sua análise e discussão.

O quinto capítulo finaliza o trabalho com as conclusões e sugestões para futuras pesquisas.

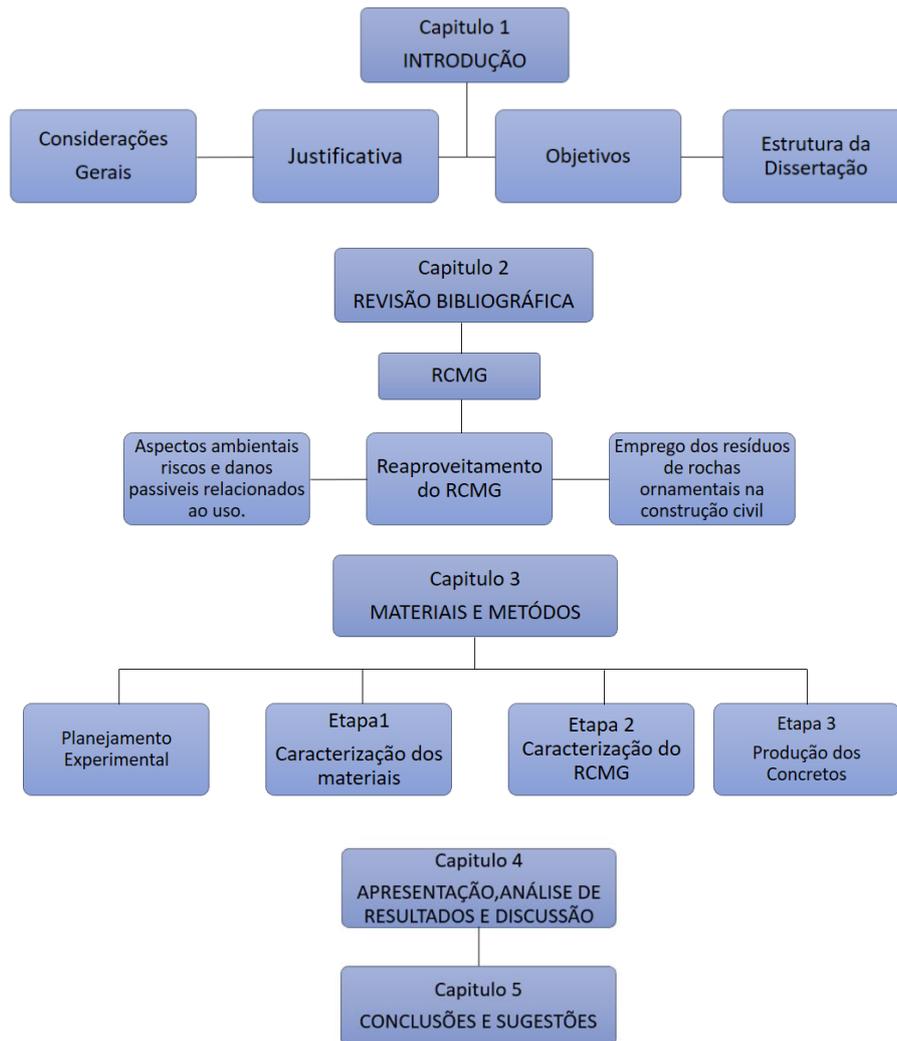


Figura 1 - Estrutura da dissertação

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Rochas Ornamentais

Do ponto de vista histórico, desde antes de Cristo existem registros da utilização de rochas para fins ornamentais. Nas civilizações da Antiguidade Oriental, tais como na Mesopotâmia e no Egito, rochas calcárias, graníticas e basálticas foram utilizadas na construção de grandes esculturas. Os egípcios foram os pioneiros na instalação de pedreiras de rochas ornamentais. Há aproximadamente 5.000 anos eles já realizavam a extração de grandes blocos de calcário e sienito para a construção das pirâmides. Na Idade Média, essas rochas ganharam destaque na construção de edificações nobres, tais como catedrais e palácios. Entre os séculos XVI e XVIII, verificou-se uma grande busca pelo mármore, inicialmente em colorações diferentes e, mais tarde, na coloração branca (RUSSO, 2011)

No entanto, a extração e o consumo das rochas ornamentais, dentro de todas as suas aplicações, foram impulsionados somente a partir do final do século XIX e o início do século XX, como uma consequência da Revolução Industrial do século XVIII, que proporcionou o aprimoramento de tecnologias já existentes e o surgimento de novas tecnologias, de forma a possibilitar a mecanização nos processos de extração e de beneficiamento, facilitando ainda a exploração de bens minerais que antes não eram extraídos e/ou beneficiados devido à rudimentariedade das tecnologias empregadas no processo exploratório (RUSSO, 2011). O processo de urbanização que vem se instalando com uma velocidade cada vez mais acentuada também constitui um fator importantíssimo para o aumento da produção desses bens minerais, principalmente após o conceito de sofisticação arquitetônica através do desenvolvimento de trabalhos de design de interiores (MOREIRAS, 2005).

2.1.2 Histórico Brasileiro

No Brasil, a extração de rochas ornamentais em escala industrial foi iniciada no final da década de 1950, quando os Estados de Minas Gerais e Espírito Santo começaram a exploração e a extração de mármore. Aos poucos, o aprimoramento tecnológico estendeu a produção para as rochas graníticas que, devido às suas qualidades físicas e variedades de textura e cor, ganharam um espaço significativo no mercado. No entanto, foi somente a partir da década de 1980 que o Brasil se tornou um país exportador deste recurso mineral. Segundo dados publicados no sumário mineral de 2011 do Departamento Nacional de Produção Mineral, em 2010 os brasileiros ocuparam a posição de 4º maiores produtores e exportadores do mundo (DNPM, 2011). De acordo com o Departamento Nacional de pesquisa Mineral – DNPM – (2011), o Brasil se colocaria em 5º lugar no ranking mundial tanto em produção como nas exportações de rochas ornamentais. E estamos tentando nos manter no mercado mundial principalmente através da implantação de tecnologias compatíveis com as dos principais produtores, o que representa uma grande dificuldade para um país emergente. Desde a década de 1990, o Brasil vem denotando crescimento qualitativo e quantitativo do setor de exploração de rochas ornamentais. Esse aumento se deu pelo maior número de empresas interessadas no beneficiamento dessas rochas, resultando em uma maior quantidade litológica já processada para a comercialização e a exportação (DNPM, 2011). Aproximadamente 120 países consomem os materiais produzidos pelas mais de 11 mil empresas que trabalham nas diversas etapas do procedimento de preparação da rocha para o consumo, além das empresas que operam sem regulamentação, que não estão incluídas nesta contagem (MAIA, 2004).

Atualmente, o nosso país é conhecido por ser o maior fornecedor de rochas ornamentais para os Estados Unidos da América, com uma quantidade de aproximadamente 630 mil toneladas no ano de 2010. Essas negociações geraram no mesmo ano um retorno de quase 500 milhões de dólares. O Brasil também é o 2º maior produtor de ardósia do mundo (16% da produção mundial), o 3º maior exportador de granito bruto (12% do total global), o 4º maior produtor de rochas ornamentais e 4º maior exportador de rochas processadas, além de o 5º maior exportador em volume físico (DNPM, 2011).

2.1.3 Exportações Brasileiras

As exportações brasileiras de rochas ornamentais e de revestimento somaram US\$ 566,84 milhões e 1.180,5 mil t no 1º semestre de 2017, com variação negativa de respectivamente 2,49% e 4,84% frente ao mesmo período de 2016. As rochas processadas compuseram 82,0% (US\$ 464,8 milhões) do faturamento e 58,9% (695,2 mil t) do volume físico dessas exportações, com variação positiva de 1,30% no preço médio dos produtos comercializados. Foi também positiva a variação do preço médio das rochas silicáticas brutas (+2,52%) e das exportações totais (+2,47%), com queda de 11,75% para as rochas carbonáticas brutas. As vendas efetuadas especificamente no mês de junho somaram US\$ 104,1 milhões e 214,2 mil t. mesmo inferiores às do mês de maio precedente do mês de julho/2016, essas exportações superaram a casa dos US\$ 100 milhões e 200 mil t, contribuindo para o desempenho semestral.

A participação das exportações de rochas ornamentais no total das exportações brasileiras manteve-se em 0,53%, repetindo o que foi registrado nos períodos janeiro-abril e janeiro-maio. (ABIROCHAS 2017)

Espírito Santo, Minas Gerais e Ceará, nesta ordem e com grande destaque para o Espírito Santo, foram os estados brasileiros que mais exportaram rochas ornamentais no 1º semestre de 2017, respondendo individualmente por um faturamento superior a US\$ 10 milhões. Com vendas superiores a US\$ 1 milhão, seguem os estados da Bahia, Rio Grande do Norte, Pernambuco, Paraíba, Santa Catarina, São Paulo e Rio de Janeiro. Completando a listagem dos dezesseis estados com registro de exportações contabilizáveis no 1º semestre, aparecem Rio Grande do Sul, Piauí, Paraná, Rondônia, Goiás e Alagoas.

Com um preço médio de US\$ 520/t para os produtos exportados, o Espírito Santo respondeu por 82,2% (US\$ 465,7 milhões) do total das exportações brasileiras de rochas, seguindo-se Minas Gerais com 11,3% (US\$ 64,3 milhões) e Ceará com 2,2% (US\$ 12,7 milhões). Os produtos exportados pelo Ceará tiveram preço médio de US\$ 720/t, que dentre todos os estados exportadores foi inferior apenas ao do Paraná (US\$ 1.050/t). O preço médio menos elevado de Minas Gerais (US\$ 310/t), reflete a participação de produtos de ardósia e quartzitos foliados, que têm preço médio de respectivamente US\$ 394/t e US\$ 278/t. (ABIROCHAS2017)

Eua, China e Itália, nesta ordem, continuam figurando como os principais destinos das exportações brasileiras de rochas ornamentais. Juntas, as exportações efetuadas para

esses três países, no 1º semestre de 2017, representaram 82,3% (US\$ 466,4 milhões) do total do faturamento, com 65,6% (US\$ 372,1 milhões) para os EUA, 10,7% (US\$ 60,8 milhões) para a China e 5,9% (US\$ 33,5 milhões) para a Itália. As exportações superaram US\$ 10 milhões para apenas mais dois países: México e Canadá.

Dentre esses cinco países, o maior preço médio foi praticado para o Canadá (US\$ 990/t), seguindo-se os EUA (US\$ 690/t), México (US\$ 570/t), Itália (US\$ 450/t) e China (US\$ 180/t). O preço médio para os EUA e Canadá reflete a comercialização de chapas, enquanto o da China a comercialização de blocos. O preço médio para a Itália reflete um conjunto mais variado de produtos, que inclui chapas, blocos, quartzitos foliados e ardósia. (ABIROCHAS,2017), Na figura 2.1 mostra as exportações brasileiras no primeiro semestre de 2017



Figura 2.1- Exportações Por país de destino (ABIROCHAS,2017)

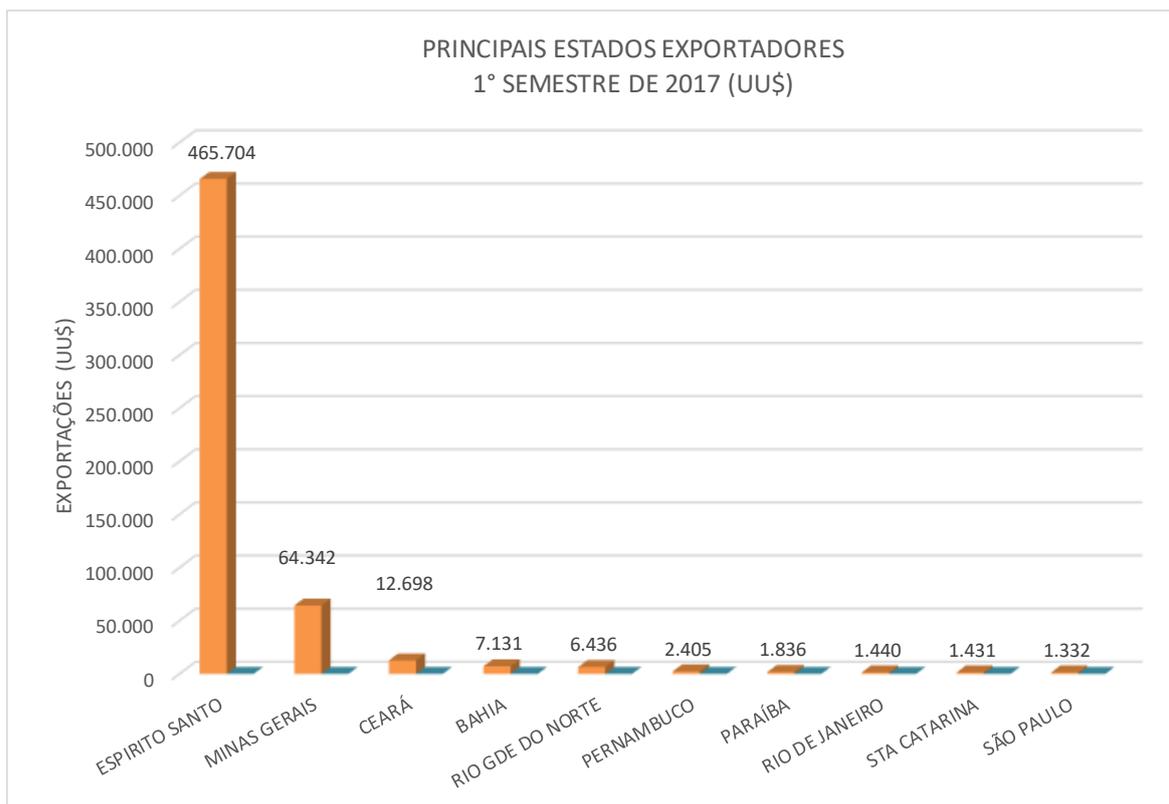


Figura 2.2- Estados Exportadores (ABIROCHAS 2017)

2.1.4 Volume do Resíduo Gerado

Atualmente no Brasil existem mais de 780 empresas, dos mais variados portes, beneficiando mais de 2 milhões de toneladas/ano de granitos e mármore. O Espírito Santo detém 50% da capacidade produtiva de serragem/beneficiamento, com cerca de 600 teares (SILVA, 1998).

O volume de resíduo gerado pelo beneficiamento de rochas ornamentais (incluindo mármore e granitos) é bastante significativo. Porém, existe uma oscilação nestes valores, porque dependem muito da demanda do mercado consumidor. Como o processo de serragem é o mesmo, este mercado será o fator principal para a produção de placas de granito e/ou mármore e, conseqüentemente, do resíduo gerado. Então, existem os resíduos de mármore, resíduos de granitos e um terceiro que é a mistura do resíduo de mármore com resíduos de granito (foco principal deste trabalho).colocar fonte

O volume total do pó gerado no processo de serragem é bastante significativo, gerando problemas de transporte, estocagem, econômicos, de manutenção dos depósitos, ambientais e problemas para a população e operários, possibilitando o surgimento de uma doença denominada de silicose⁶. A silicose é uma doença potencialmente fatal porque causa uma fibrose intersticial no pulmão pela poeira aspirada do pó da sílica, no ambiente de trabalho. **Colocar fonte**

Para FREIRE e MOTTA (1995), em serrarias produzindo chapas de 20mm de espessura, 20 a 25% do bloco de pedra é transformado em pó. Segundo Rochas Ornamentais – Informações Estatística 1986-1995 (1995), este valor é de 30%. Considerando que a maioria das empresas trabalham com chapas de 20mm e blocos com dimensões variando em torno de 2,0x1,5m com 3,0m de comprimento e o mercado interno brasileiro produz atualmente 12 milhões de metros quadrados acabados/ano de rochas ornamentais (LEAL e ALMEIDA, 1999), a estimativa da produção brasileira atual do resíduo gira em torno de 240.000 toneladas de pó por ano, considerando granito e mármore. Conforme os dados de FluxGeo, a geração destes resíduos gira em torno de 400.000 a 600.000 toneladas/ano. Considerando apenas os resíduos de granito, segundo SILVA (1998), o estado do Espírito Santo, com 50% da sua capacidade produtiva instalada, produz cerca de 50.000 t/ano do pó de granito. Este estado representa cerca de 30% da produção nacional de granito (CALIMAN apud SILVA, 1998). Partindo desses dados, o resíduo tem uma estimativa anual em torno de 165.000t/ano. Na Bahia, com base nos dados de 1996 e em consulta a empresas geradoras, produz-se cerca de 15 000 t/ano. Estes números ainda não demonstram a realidade do setor, podendo este valor ser ainda muito maior.

Segundo LEAL e ALMEIDA (1999), o estado nacional possui cerca de 300 indústrias mineradoras de blocos e 6 mil beneficiadoras (marmorarias), onde o perfil destas empresas são de micro e pequeno porte. E, devido ao perfil destas empresas beneficiadoras e às dificuldades em importar equipamentos, há uma defasagem do processo de beneficiamento, principalmente no corte dos blocos, gerando grandes perdas com relação a empresas européias.

Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais, o setor de rochas ornamentais e decorativas, incluído no Programa Especial de Exportação, deverá triplicar o valor exportado em 1998 (US\$ 200 milhões) até o ano 2002 (ABIROCHAS apud LEAL e ALMEIDA,1999).

Se as empresas produtoras, em conjunto com o governo federal, trabalharem neste sentido, e se não houver uma modernização e/ou adaptação dos processos de produção atuais, a geração deste resíduo deverá aumentar consideravelmente.

2.1.5 Histórico sobre os Estudos com RCMG

Dentro da tentativa de contribuição para um maior desenvolvimento sustentável e um maior aproveitamento de resíduos na construção civil, concomitante com o aumento do desempenho destas aplicações, verifica-se uma grande possibilidade de uso do Resíduo de Corte de Granito (RCMG). RCG na Europa e resto do mundo vem sendo depositada nos pátios das empresas. Apenas a Itália, uma das maiores produtoras mundiais do resíduo, vem tentando desenvolver blocos prensados para pavimentação.

De acordo com JOHN (1999), o estudo da reciclagem dos resíduos gerados no beneficiamento de rochas encontra-se num estágio desenvolvido em nível de laboratório, referindo-se aos trabalhos realizados na UFES por CALMON et al.(1997) e SILVA (1998), em argamassas e tijolos de solo cimento.

Na Universidade Federal do Espírito Santo foi realizado um estudo sobre sua utilização em argamassas de assentamento, como substitutivo de parte cal e na confecção de tijolos de solo cimento, iniciado por CALMON et al. (1997) e dado prosseguimento por SILVA (1998). Segundo SILVA (1998), a substituição da cal por resíduo, a partir dos experimentos realizados, leva a pensar que o resíduo está se comportando como “filler”.

Isto aponta para a direção que o resíduo poderá ser utilizado na melhoria das propriedades de outras argamassas que não somente as de assentamento. Ainda neste estudo, o autor verificou, por espectroscopia de Mössbauer, o potencial de oxidação da fração

metálica presente na composição do RCG, devido à presença da granalha no processo de serragem, e que esta fração metálica apresenta uma quantidade de partículas magnéticas, susceptíveis à oxidação.

Em jun/1999, foi publicado no 43º Congresso Brasileiro de Cerâmica em Florioanópolis-SC, um trabalho da Universidade Federal da Paraíba (NEVES et al., 1999), onde a autora visa aproveitar (reciclar) o RCG e o resíduo de polimento em misturas com argilas para a confecção de tijolos cerâmicos. No seu estudo, NEVES et al. (1999) utiliza resíduos proveniente do corte/ ou polimento de granito de duas empresas diferentes e argila utilizada em cerâmica vermelha. No seu método de pesquisa, a autora utiliza os seguintes ensaios: análise química; análise térmica e termogravimétrica; massa específica real; massa unitária no estado solto; análise granulométrica; ensaios tecnológicos para moldagem dos tijolos. São avaliadas ainda, a absorção de água; massa específica aparente; porosidade aparente, e resistência à compressão simples. NEVES et al. (1999), a partir dos resultados preliminares obtidos, conclui que os valores para os resíduos estudados estão em conformidade para uso em cerâmica vermelha, porém ensaios ainda estão sendo realizados.

LIMA FILHO et al. (1999 - a), da Universidade Federal do Ceará - UFC, publicaram no XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, um estudo sobre a "Determinação de parâmetros para a racionalização do Processamento de Rochas Graníticas por abrasão" que visa a otimização do processo de beneficiamento de rochas (serragem e polimento), correlacionando as características petrográficas e a tenacidade à fratura. Neste trabalho, o autor contesta o estudo de apenas uma propriedade (tenacidade à fratura) para o conhecimento do comportamento do material. Novos estudos estão sendo desenvolvidos na UFC para este fim.

2.1.6 Efeito das Adições sem Atividade Pozolânica nas Propriedades do Concreto

As adições sem atividade pozolânica são aquelas que não possuem reatividade química, da combinação de seus elementos químicos com os elementos químicos presentes no concreto. Estas adições são chamadas de fílers, devido a sua alta finura. Os fílers podem acelerar o processo de hidratação do cimento (SOROKA e STERN, 1975), atuando como pontos de nucleação (NEVILLE, 1997).

2.1.7 Efeito nas Propriedades do Concreto no Estado Fresco

Os fílers não apresentam influências no tipo de produtos hidratados, mas podem influenciar na quantidade inicial de produtos hidratados e no calor de hidratação. Com relação aos tempos de pega e ao tempo de cura, também não ficam alterados com a incorporação de adições sem atividade.

A incorporação de adições sem atividade pozolânica nos concretos confere às propriedades do concreto no estado fresco várias influências, como: aumento da coesão (WALLEVIK, 1995), diminuição da segregação, minimização da exsudação, podendo ou não aumentar o consumo de água.

Dentre as características do fíller que exercem maiores influências no concreto estão: finura; forma e massa específica.

A finura, caracterizada pelo tamanho médio da partícula, influenciará diretamente na demanda de água, no preenchimento de poros capilares e na densificação da zona de transição entre pasta e agregado. Quanto menor for o diâmetro médio das partículas, maior será a água de molhagem, aumentando sua demanda. Como os poros capilares possuem diâmetro de 50 nm a 10 μ m (CAMPITELLI, 1987) e a zona de transição tem espessura média de 10 a 50 μ m (METHA e MONTEIRO, 1994), o fíller poderá colmatar esses poros e densificar esta zona.

A massa específica também é um outro fator muito importante, pois determina a quantidade de grãos num mesmo volume. A escória de cobre com massa específica média de 3,87 g/cm³ (MOURA, 2000) em comparação ao filler de quartzo com 2,67 g/cm³ (PENTTALA e KOMONEN, 1997) possuirá uma quantidade menor de grãos para um mesmo volume. Isso poderá afetar a demanda de água de molhagem. Para isso tem que haver um efeito sinérgico com as outras características. A cinza volante, por exemplo, possui uma massa específica de 2,35 g/cm³. Nas mesmas condições de volume citadas anteriormente, com relação a escória de cobre e ao fíler de quartzo, teoricamente demandaria uma maior quantidade de água. Mas, devido a forma esférica das partículas da cinza, a sua utilização em substituição por parte do cimento pode permitir uma redução da quantidade de água para a mesma trabalhabilidade (BROWN apud ACI 226, 1987, BERRY et al., 1980, BOUZOUBAË et al., 1999).

Tão importante quanto a finura e a massa específica, é a forma das partículas, pois tanto a forma mais angulosa quanto a forma mais esférica, influenciarão no atrito entre as partículas na mistura e sua disseminação pelos poros existentes. Associado à forma dos grãos encontra-se também a sua textura, que contribuirão na aderência e atrito entre as partículas. Em um estudo realizado no CANNET (Canada Centre for Mineral and Energy Technology) por MALHOTRA e CARETTE (1985), com a incorporação de 5% a 20% de filler calcáreo, houve a necessidade, para relações a/c 0,40 e 0,53, do uso de superplastificantes com o objetivo de estabelecer a trabalhabilidade requerida, contribuindo para a coesão.

SOROKA e SETTER (1977) adicionando o filler calcáreo, dolomítico e basáltico em argamassas demonstram que há uma aceleração na hidratação devido às pequenas partículas, causando um incremento na resistência aos 28 dias de 39%, 48% e 56%, respectivamente. No caso do filler calcáreo, há formação do carboaluminato monocálcico (SAWICZ e HENG, 1996).

Os fillers podem influenciar tanto nas propriedades mecânicas quanto na durabilidade. Com relação às propriedades mecânicas, as maiores influências são nas idades iniciais, por estar difundido em toda mistura, e por apresentarem elevada finura, atuando como pontos de nucleação. Desta forma tende a acelerar o processo de hidratação do cimento e aumentar a quantidade de produtos hidratados. Em idades mais avançadas não há ganhos de resistência, já que não há atividade química a maior contribuição dos fillers está na diminuição da permeabilidade e no refinamento da estrutura de poros. A alta finura contribui para uma maior densificação da zona de transição e da matriz cimentícia. esta maior densificação promoverá um ganho de resistência à compressão.

No concreto endurecido, a presença de materiais finos pode ser benéfica para concretos com baixas resistências. Já para concretos de elevada resistência este efeito pode ser adverso (KALCHEFF e HUGHES apud BONAVETTI e IRASSAR,1993). A adição de 10% de filler calcáreo em concretos com relação $a/c = 0,70$ e 5% em concreto com relação 0,53, apresentaram significativa influência nas propriedades do concreto endurecido. houve um incremento de 8% e 9% respectivamente, na resistência à compressão aos sete dias, e aos 28 e 91 dias (MALHOTRA e CARETTE, 1985) SAWICZ e HENG (1996), realizando um trabalho experimental com o pó calcáreo, verificaram que a resistência à compressão e a porosidade dependem da interação da relação a/c e do teor de adição. Observaram, ainda, que para relações $a/c - 0,50$ e $a/c - 0,60$, com o incremento do teor há um aumento da resistência e um decréscimo da porosidade.

Fillers de quartzo estão sendo usados para produção de concretos de baixas e médias resistências. Utilizando-se partículas com dimensão máxima em torno de 0,1mm ocorre um aumento na resistência à compressão e flexão (PENTTALA e KOMONEM, 1997). Um estudo realizado por GOLDMAN e BENTUR (1993), comparando concretos com relação $a/c - 0,40$ com adição de sílica ativa e carbon black (negro de fumo), ambos com mesmo tamanho médio de partículas, demonstrou que o negro de fumo causou um ganho de resistência aos 28 dias de 16,8% e a sílica de 30,1%. Ambos apresentaram uma densificação da zona de transição com similares microestruturas.

2.1.8 Uso do Resíduo de Corte de Mármore e Granito (RCMG)

Diversos estudos foram realizados com a utilização do RCMG, como na produção de vidros borossilicatos (MARÇAL, 2001), em cosméticos (OLIVEIRA et al., 2007) e em adubação de solos tropicais (MACHADO et al., 2006).

Bilgin et al. (2012) adicionaram resíduo de pó de mármore na produção de tijolos industriais em proporções em massa de 0 - 80%. Os autores observaram que as misturas contendo 10% de pó de mármore e 90% de pó de tijolo não alteraram as propriedades mecânicas do produto final, comparadas ao tijolo de referência, porém com adições superiores a 10% houve um aumento da absorção de água e a diminuição das propriedades mecânicas dos tijolos.

Durante a sinterização dos tijolos, com temperaturas variando entre 900 a 1100°C, houve a queima de matéria orgânica que resultou na retração do material, reduzindo assim, seu peso e tamanho. Porém com o acréscimo de pó de mármore, apesar da redução de peso, houve um aumento de volume. Os autores concluíram que a principal razão para isso foi a ocorrência de poros na estrutura devido a liberação de CO₂ durante a calcinação CaCO₃ e também pelo fato da cal virgem (CaO), originada durante a calcinação, ser um composto muito expansivo e reativo. Por consequência, o aumento da porosidade resultou na diminuição da resistência à flexão.

2.1.9 Uso RCMG como Substituição ao Aglomerante em Matrizes Cimentícias.

No estudo realizado por ERGÜN (2011), houve a substituição parcial do cimento em 5% pelo resíduo de mármore e a diatomita. Os resultados obtidos mostraram que além do uso de um aditivo superplastificante na mistura, a substituição do cimento pelo resíduo de mármore e/ou diatomita (tanto juntos, quanto separados), melhorou as propriedades mecânicas dos concretos convencionais.

Estudos sobre cimentos alternativos, onde o clínquer foi parcialmente substituído pelo resíduo de corte de mármore nas proporções de 2,5%, 5%, 7,5% e 10%, chegaram aos seguintes resultados: os tempos de início e fim de pega não foram afetados com o aumento

do teor de resíduo; as argamassas produzidas com os cimentos contendo diferentes teores de resíduo de mármore apresentaram desempenho mecânico similar às aquelas em que foi utilizado o cimento Portland comum (após 90 dias de cura); houve uma queda máxima de 4% na resistência da composição da mistura contendo 15% de resíduo, fazendo com que os autores concluíssem que o resíduo pode ser usado na produção de cimento e possuirá o mesmo desempenho do cimento convencional e principalmente, reduzindo os custos. (ARUNTAŞ et al., 2010).

Já Menezes et al. (2009) verificaram que argamassas produzidas com até 50% de resíduo como substituição à cal, apresentaram desempenho mecânico semelhante ao das argamassas de referência, apesar de o teor de aglomerante ter sido reduzido até a metade. Os autores afirmam que isso ocorreu devido ao efeito físico do RCMG, que atua como material de preenchimento, refinando a estrutura dos poros e alojando-se entre os grãos do agregado. A zona de transição matriz-agregado e a matriz aglomerante se tornaram mais densas, melhorando o empacotamento do sistema e evitando a queda da resistência mecânica.

2.2 Uso do RCMG como Substituição à Areia em Matrizes Cimentícias.

Corinaldesi *et al.* (2010) avaliaram o efeito da adição do resíduo de corte de mármore em concretos autoadensáveis e constataram que, na presença de aditivo superplastificante, o resíduo é bem eficiente para melhorar a resistência à segregação. O resíduo foi incorporado como substituição parcial ao cimento ou à areia em 10% e a consistência foi fixada como parâmetro de controle. Em ambos os casos ocorreu um decréscimo na resistência à compressão aos 56 dias, no entanto, com a substituição do resíduo de mármore pela areia houve apenas 10% de redução, enquanto que a substituição do resíduo pelo cimento diminuiu ainda mais a resistência à compressão, chegando a 20%. Entretanto, as resistências atingidas pelas argamassas nas idades iniciais foram superiores às da mistura de referência, constatando o efeito *filler* do resíduo no processo de hidratação do cimento.

No estudo de Cruz *et al.* (2003) apud Reis e Tristão (2007), foram produzidas argamassas de cimento e areia com relação água/cimento constante ($a/c = 0,48$), traço 1:3 e substituição parcial da areia pelo resíduo de corte de rochas ornamentais em teores de 5% a

20%. Foi constatado que o módulo de elasticidade das argamassas aumentou para teores de até 15% de resíduo, sendo que com 20% de substituição houve um decréscimo neste valor.

Na pesquisa realizada por Moura *et al.* (2002), com argamassas de revestimento de traço 1:6 (cimento : areia), houve a substituição da areia pelo RCMG, em proporções de 5% e 10% em relação à massa da areia, observando-se o aumento de resistência em todas as idades estudadas, principalmente na substituição de 10% da areia, onde houve o melhor resultado. A areia utilizada foi oriunda de um solo areno-siltoso com características similares à areia utilizada na pesquisa.

2.2.1 Uso do RCMG como Adição em Matrizes Cimentícias

Krstulović *et al.* (1994) observaram que o RCMG melhorou a resistência de argamassas e concretos, principalmente quando foram adicionadas quantidades pequenas de resíduo, entre 5 e 6% em relação à massa de cimento. Os autores também perceberam que o este efeito é mais evidente se o material de enchimento for muito fino, como é o caso do *filler* calcário utilizado na pesquisa.

Freire *et al.* (2009) utilizaram o resíduo do corte de granito (RCG) em blocos paisagísticos, utilizando o traço de 1:2:1 (cimento: areia: água), onde se adicionou 10% e 25% de RCG em relação à massa de cimento. Durante a pesquisa, constatou-se que a resistência à compressão axial com 10% de adição de resíduo obteve ganho médio maior que as argamassas com 25% de adição. Da mesma forma, os blocos contendo 10% de adição de resíduo produziram uma barreira física melhor à absorção da água, diminuindo a porosidade. Os autores concluíram que a adição de 10% de RCG apresentou melhores propriedades mecânicas e maior durabilidade.

Binici *et al.* (2008) utilizaram o RCMG como agregado graúdo (19mm) e escória de alto-forno junto com areia como agregados miúdo, na produção de concretos e verificaram que houve redução na profundidade de penetração de cloretos em aproximadamente 70%, além de obter melhor ligação entre os componentes da mistura (aditivos, cimento e agregados). Os resultados indicaram que os agregados de resíduo de mármore e granito podem ser usados para melhorar as propriedades mecânicas, a trabalhabilidade e a resistência química do concreto convencional.

Gonçalves (2000) adicionou o resíduo de corte de granito RCG em concretos nas proporções de 10% e 20% em relação à massa de cimento, mantendo constante a relação água /cimento e verificou que as misturas com adição do resíduo apresentaram maior coesão e consistência e diminuíram a exsudação. O desempenho mecânico também foi melhorado, apresentando aumento na resistência à compressão axial de 8% e 19,6% para os teores de 10% e 20%, respectivamente. As taxas de absorção por sucção capilar e por imersão diminuíram com a adição de 10% de RCG e aumentaram para o teor de 20% de RCG, indicando que o resíduo promove o preenchimento dos poros, diminui a taxa de absorção e a porosidade efetiva potencial, além de aumentar a resistência capilar. Por fim, o autor concluiu que a adição de 10% de RCG promove no geral, os melhores resultados.

2.2.2 Processo de Beneficiamento de Rochas e Geração do RCMG

Para se “fatiar” a rocha em um tamanho menor, diversas são as ferramentas utilizadas dentre elas: máquinas de fio diamantado, hidrobags, marteletes, brocas diamantadas, dentre outros. Durante a extração das rochas nas pedreiras, estas são cortadas em chapas para o uso em vários ramos da construção civil, gerando resíduos que se caracterizam pelo tipo da rocha extraída, como mármore, granitos ou outras rochas.

O ciclo produtivo de rochas ornamentais compreende três etapas básicas: O primeiro pedaço de rocha é chamado de bancada ou prancha, o qual tem uma medida aproximada de 12 metros de comprimento X 6m de altura X 1,80 de largura. Após retirada a bancada, a mesma será analisada por um profissional treinado que irá demarcar essa rocha em várias áreas para um novo recorte, onde desse recorte serão produzidos cubos menores de aproximadamente 3 m x 1,8 m x 1,8 m). Para movimentar os blocos dentro das jazidas, do local da extração até o pátio de armazenagem, grandes tratores como máquinas pá carregadeiras são usadas, em seguida ocorre o beneficiamento primário, que consiste na serragem dos blocos por meio dos teares, para que estes sejam desdobrados em grandes chapas, com medidas em torno de 2,80 x 1,80 x 0,02 m e por fim, o beneficiamento secundário, que ocorre nas marmorarias, onde são realizados os acabamentos finais e polimentos conforme o pedido do cliente (RODRIGUES *et al.*, 2011; SETEC/MEC, 2007). Em cada metro cúbico de rocha serrado nos teares, desdobram-se, em média, 32 m² de chapas

com 2 cm de espessura ou 49 m² com 1 cm de espessura (ABIROCHAS, 2012). A Figura 2.3 esquematiza as três etapas ocorridas no beneficiamento das rochas ornamentais e a ilustra todo o processo.

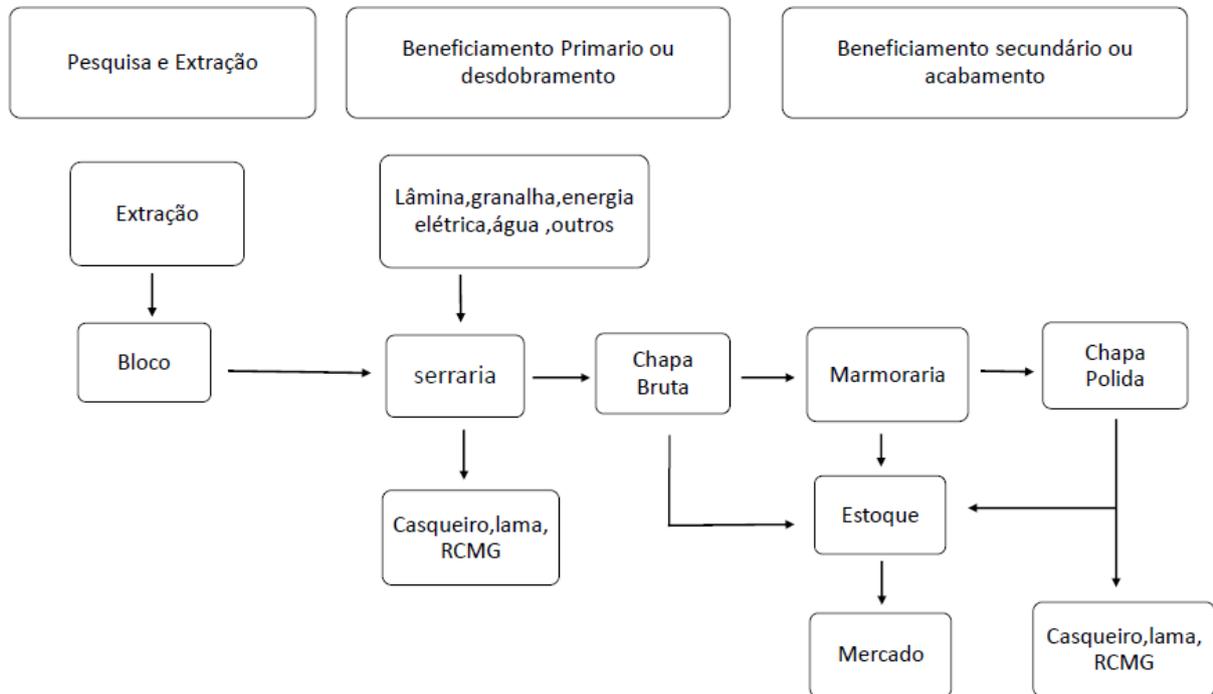


Figura 2.3 – Etapas do beneficiamento das rochas ornamentais.

Fonte: Gonçalves, 2000 com adaptações do autor, 2018

Nas figuras abaixo mostra as etapas do beneficiamento das rochas e a geração do RCMG



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 2.4 – Jazida de Granito(a); (b) Bloco Extaido; (c) Bloco Beneficiado;(d)Chapas Beneficiadas;(e) Residuo de Granito (Sobras); (f) Residuo de Granito (Lama).

2.2.3 Composição Química do RCMG

A seguir, na tabela 2.1, encontram-se descritos os compostos químicos presentes nos trabalhos de outros autores, oriundos do corte de mármore e granitos. As siglas significam, respectivamente: Rejeitos da indústria de beneficiamento de mármore e granitos (RMG), Resíduo de Beneficiamento de Mármore e Granito (RBMG), Resíduo de Serragem de Rochas Ornamentais (RSRO), Resíduo de Rochas Ornamentais (RRO), Resíduo de Mármore (RM), Resíduo do Corte de Granito (RCG), Resíduo de Granito (RG).

Tabela 2.1-Compostos químicos encontrados nos resíduos de mármore e granitos

Compostos	RMG (1)	RBMG (2)	RSRO (3)	RRO (4)	RM (5)	RCG (6)	RG (7)
SiO ₂	37,86	54,62	5,893	67,638	0,67	59,62	61,52
Al ₂ O ₃	13,65	9,7	1,231	16,416	0,12	12,77	13,53
Fe ₂ O ₃	3,56	5,86	9,06	2,994	0,08	9,49	8,75
CaO	19,92	12,99	79,01	3,337	54,43	4,83	5,73
MgO	3,49	3,22	0,397	-	0,59	1,96	1,01
TiO ₂	0,61	-	0,35	0,424	-	-	0,46
P ₂ O ₅	0,24	-	-	-	-	-	0,18
Na ₂ O	3,58	2,15	0,298	-	0,14	2,72	2,56
K ₂ O	4,32	-	-	7,552	-	5,3	3,18
MnO	0,07	-	-	0,05	-	-	0,08
SO ₃	-	0,02	-	1,425	-	0,03	-
SO ₄	-	-	0,4	-	-	-	-
Outros	-	-	-	0,163	-	-	-

Fonte: (1) Silva *et al.*,(2005), (2) Lopes *et al.*,(2006), (3) Moura e Leite, 2011, (4) Destefani e Holanda, 2011, (5) Aruntas *et al.* ,2011, (6) Gonsalves, 2000, (7) Mármol *et al.*,2010;com adaptações do autor, 2018

Quanto à caracterização física, Gonçalves (2000) e Calmon et al. (1997) apresentam, respectivamente, uma massa específica do resíduo de 2,78g/cm³ e 2,67g/cm³. Na caracterização granulométrica, Calmon et al. constatam que o RCG é constituído por partículas irregulares e diâmetro variável dos grãos, na faixa de 0,8µm a 25µm. Já Gonçalves (2000), buscando uma granulometria ótima para viabilizar a utilização do RCG como adição em concretos, realizou a moagem de amostras do resíduo em diferentes tempos, chegando a diâmetros na faixa de 3,92µm a 6,74µm.

2.2.4 Classificação do RCMG

Gonçalves (2000), a partir dos resultados apresentados no ensaio de lixiviação, observa-se que nenhum dos seus compostos apresentou concentração superior em relação às especificações da norma. No ensaio de solubilização, comparando os resultados com os limites estabelecidos pela NBR 10004 (ABNT, 1987) – Classificação dos Resíduos, apenas o Fluoreto apresentou concentração superior, classificando o resíduo como Classe II – Não Inerte. Como o fluoreto não é uma substância que proporciona periculosidade ao resíduo, o RCG, apesar de ser classificado como não inerte, não é tóxico nem perigoso e, conseqüentemente, não apresenta riscos à saúde humana.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Planejamento Experimental

Procurando estabelecer a alternativa mais adequada para utilização do resíduo de mármore e granito como material de construção civil, o planejamento experimental foi dividido em 3 etapas.

A etapa 1 constituiu da caracterização dos materiais convencionais utilizados na produção dos concretos desta pesquisa.

A etapa 2 realizou-se a caracterização física, química, mineralógica, e de reatividade do RCMG para uso potencial como pozolana, reação álcali agregado, verificando a capacidade de aproveitamento do RCMG como material filler na produção de concretos convencionais com substituição em massa do cimento Portland.

A etapa 3 empregou o RCMG como filler no concreto com substituição parcial do cimento portland em massa de 5%,10% e 15%, onde considerou a caracterização e o uso do resíduo *in natura*. Avaliou-se sua resistência à compressão, sua resistência à tração por compressão diametral, tração na flexão, módulo de elasticidade aos 28 dias, absorção de água por capilaridade e imersão, análise microscópica eletrônica de varredura (MEV). Para nortear o estudo, foram desenvolvidos organogramas com os planejamentos da pesquisa, os quais são apresentados nas Figuras 2.5 e 2.6

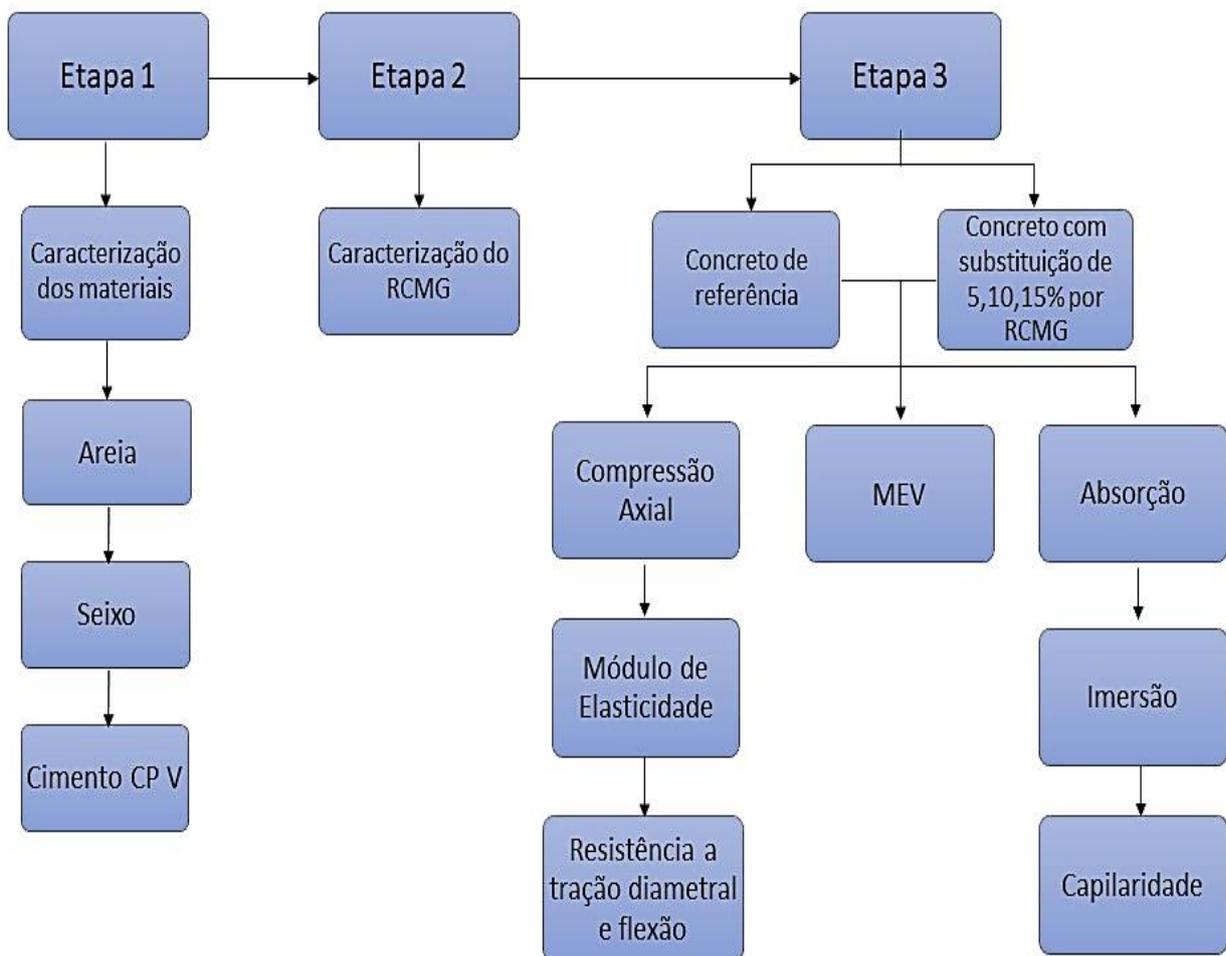


Figura 2.5 - Organograma de planejamento da pesquisa

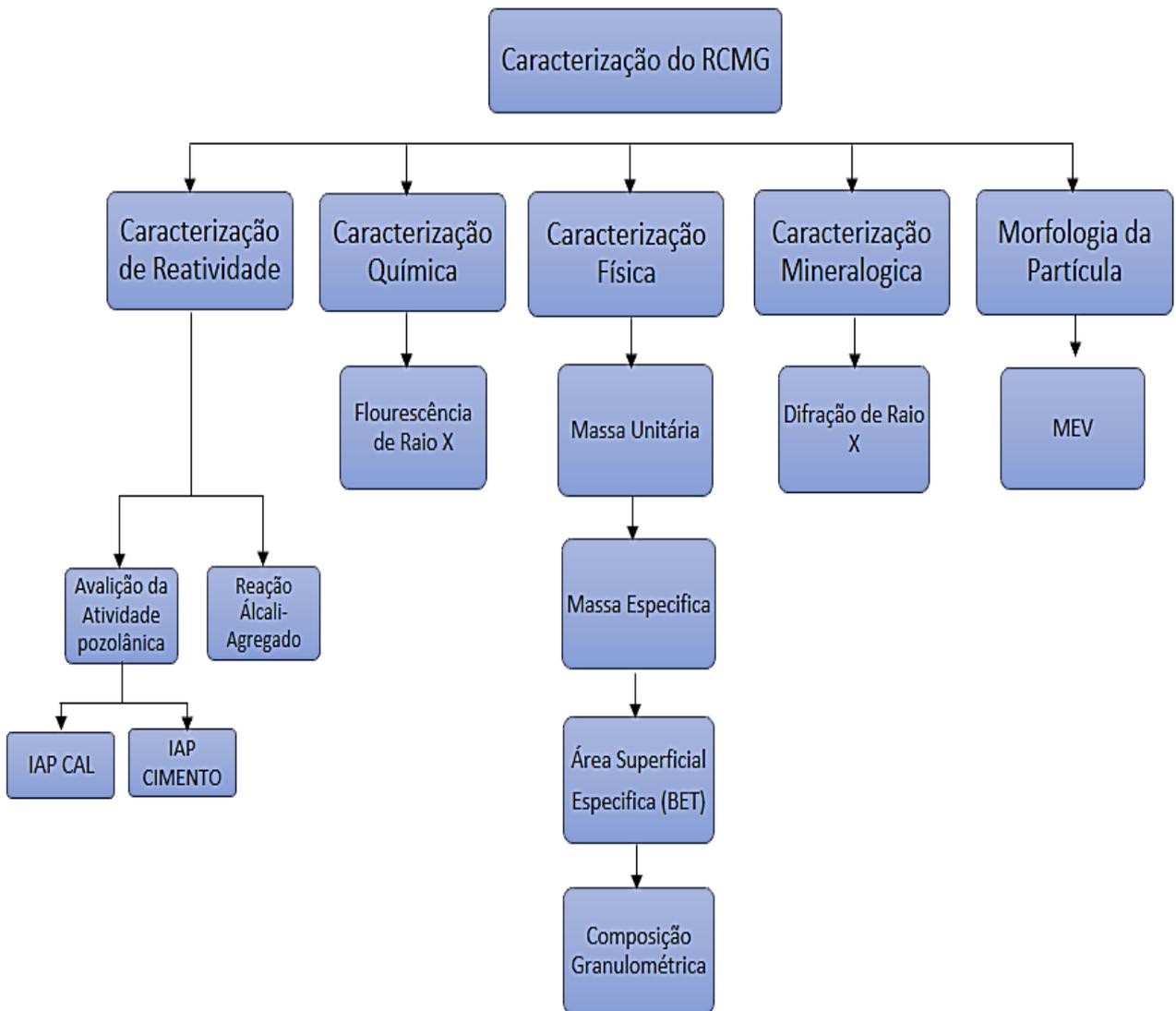


Figura 2.6 - Organograma da caracterização do RCMG

3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.1 Cimento Portland

Nesta pesquisa foi utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI) devido sua pureza e possuir apenas de 0 a 5% de material carbonático e assim poder analisar os efeitos da substituição parcial do cimento por RCMG. A caracterização deste cimento e mostrada na tabela 3.1

Tabela 3.1 – Caracterização do Cimento CPV

Cimento CP V-ARI		Especificações
Massa Especifica (g/cm ³)	3,09	NBR NM 16605 (ABNT, 2017)
Massa Unitária (g/cm ³)	1,41	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Finura na peneira # 200 (%)	< 6	NBR 11579 (ABNT, 2013)
Área Superficial Específica (m ² /g)	9,194	Método BET
Volume do Poro (g/cm ³)	0,0012	Método BET

Fonte: Fabricante

3.1.2 Agregado Graúdo

Foi utilizado na confecção dos concretos o agregado graúdo natural de origem silicosa, nomeado de seixo rolado e que atende aos requisitos descritos na NBR 7211 (ABNT, 2009) quanto aos parâmetros avaliados. O uso deste agregado deu se pela sua grande abundancia na região, A tabela 3.2 indica os resultados dos ensaios de caracterização deste agregado.

Tabela 3.2 – Caracterização do agregado graúdo

Agregado Graúdo (Seixo)				
Abertura das Peneiras (mm)	Massa Retida (g)	% Retida	% Retida Acumulada	Norma de Ensaio
75	0	0	0	
37,5	0	0	0	
19	220	4,7	4,7	
12,5	1750	35,1	39,8	
9,5	1850	37,1	76,9	ABNT NBR NM 248 (2003)
6,3	791	15,9	92,8	
4,75	123	2,5	95,3	
2,36	185	3,7	99	
Fundo	46	1	100	
Total	4965	100		
Massa Específica		2,58 g/cm ³		ABNT NBR NM 53 (2009)
Massa Unitária		1,52 g/cm ³		ABNT NBR NM 45 (2006)
Módulo de Finura		6,72 mm		ABNT NBR NM 248 (2003)
Dimensão Máxima		19 mm		ABNT NBR NM 248 (2003)

Fonte : Autor

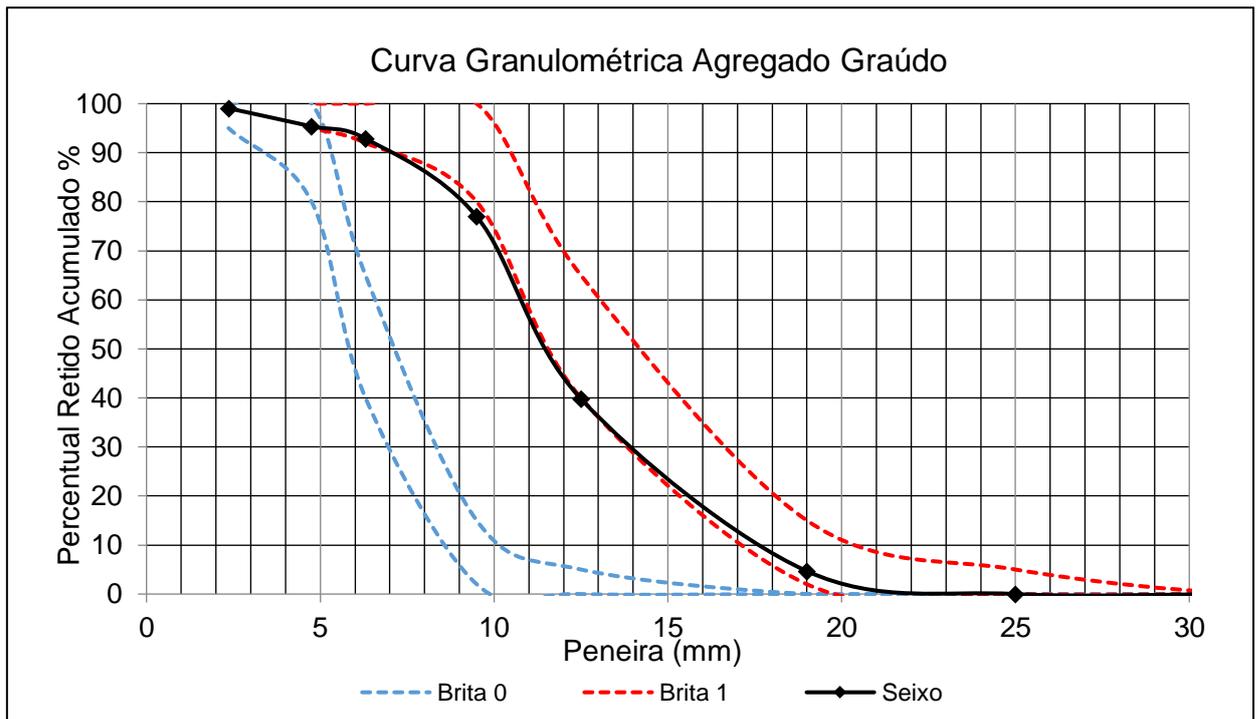


Figura 3.1 - Curva granulométrica do agregado graúdo e limites da NBR NM 7211 (ABNT, 2009).

Pelos resultados obtidos observa-se que o agregado graúdo apresenta uma distribuição contínua, variando entre as faixas de graduação, se enquadrando como material de graduação 1 (Brita 1).podendo ser utilizado.

3.1.3 Agregado Miúdo

Utilizou-se areia proveniente dos leitos dos rios próximos à cidade de Belém para a confecção das argamassas e concretos. Essa areia passou pelo processo de secagem, com o auxílio de estufa e foi armazenada em tonéis. A caracterização é apresentada na tabela 3.3 e na Figura 3.2 compara-se a curva granulométrica do agregado miúdo com os limites das zonas granulométricas.

Tabela 3.3 – Caracterização do agregado miúdo

Agregado Miúdo (Areia)			
Abertura das Peneiras (mm)	Massa Retida (g)	% Retida	% Retida Acumulada
4,75	3	0,30	0,30
2,36	50,03	5,00	5,30
1,18	74,23	7,43	12,73
0,6	123,46	12,35	25,08
0,3	511,54	51,17	76,25
0,15	162,49	16,26	92,51
Fundo	74,88	7,49	100,00
Massa Específica		2,45 g/cm ³	ABNT NBR NM 53 (2009)
Massa Unitária		1,60 g/cm ³	ABNT NBR NM 45 (2006)
Módulo de Finura		2,12	ABNT NBR NM 248 (2003)
Dimensão Máxima		2,36 mm	ABNT NBR NM 248 (2003)
Índice de vazios		34%	ABNT NBR NM 45 (2006)
Fator de empacotamento		66%	ABNT NBR NM 45 (2006)

Fonte : Autor

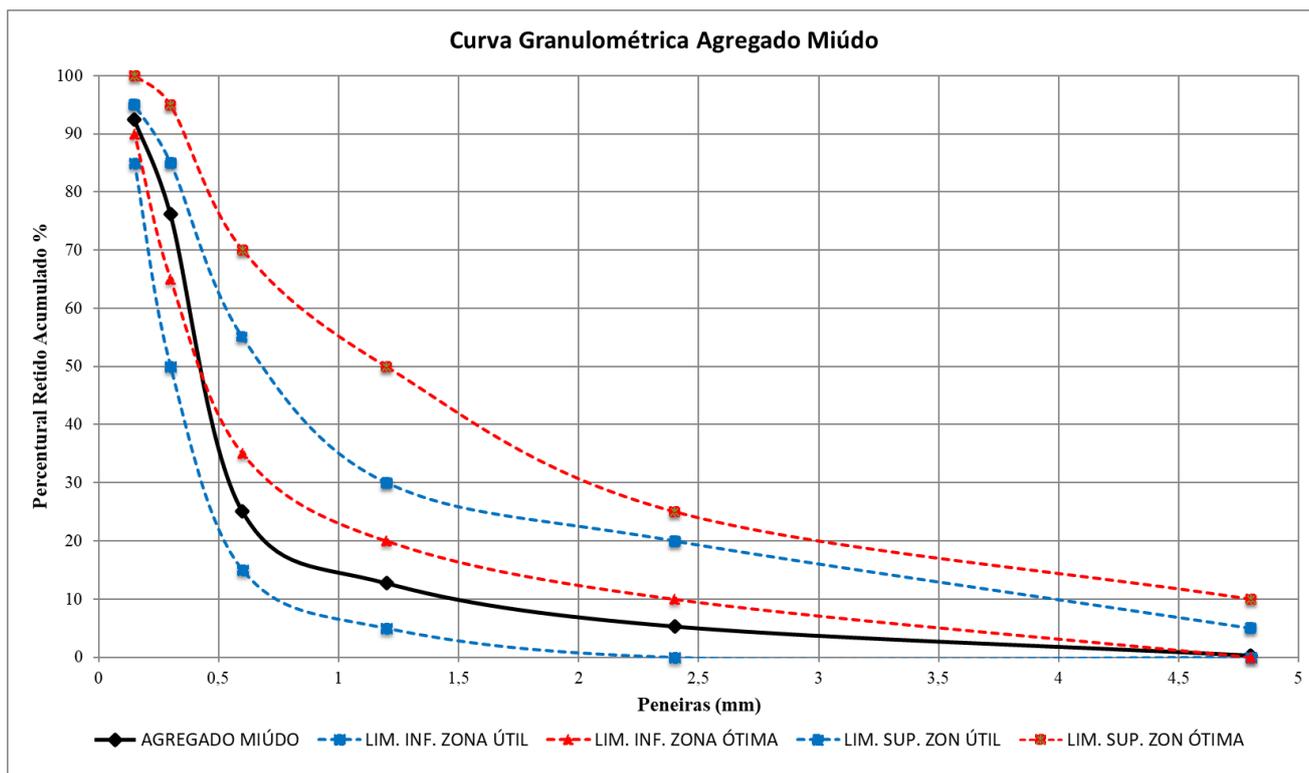


Figura 3.2 - Curva granulométrica do agregado miúdo.

Fonte : Autor

Pelos resultados obtidos observa-se que o agregado miúdo natural apresenta uma distribuição contínua, variando entre as zonas utilizáveis e ótimas. Foi empregada também nessa pesquisa a areia normatizada para a realização dos ensaios de atividade pozolânica com cal (NBR NM 5751, 2015) e com cimento Portland (NBR NM 5752, 2014). A produção de areia normal brasileira obedece à norma NBR 7214 (ABNT, 2015). De acordo com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), único a produzir esse material no Brasil, a areia normal brasileira é certificada por meio de ensaios granulométricos e petrográficos dos componentes. É classificada em quatro frações granulométricas, ou seja, material retido entre peneiras de abertura nominal de 2,4 mm e 1,2 mm (grossa); 1,2 mm e 0,6 mm (média grossa); 0,6 mm e 0,3 mm (média fina) e 0,3 mm e 0,15 mm (fina).

3.1.4 Água

Utilizou-se água potável com temperatura de 28°C e pH 6,0 oriunda da Universidade Federal do Pará que atualmente possui sua própria estação de tratamento.

3.1.5 Aditivo

Para a confecção dos concretos utilizou-se aditivo Viscocret 3535 cb Superplastificante tipo I, o uso de aditivo baseou se pôr o resíduo apresentar uma alta finura e melhorar a trabalhabilidade da mistura não sendo necessária a alteração da relação água / cimento, baseado em uma cadeia de policarboxílico modificado que atua como dispersante do material cimentício, com características apresentadas na tabela 3.4

Tabela 3.4 – Caracterização do aditivo.

Aditivo Superplastificante Tipo I (SP-I N), NBR (ABNT, 2011)	
Massa Específica (Kg/l)	1,08 ±0,02
pH	5,0 ± 1,0
Composição	Solução de poli carboxilato em meio aquoso
Dosagem	0,3 à 0,95% sobre o peso de aglomerantes

Fonte : Fabricante

3.1.7 Resíduo do Corte de Mármore e Granito (RCMG)

O resíduo, coletado em forma de lama, foi gerado por uma marmoraria localizada na Região Metropolitana de Belém. Sua composição química pode variar em função das proporções indefinidas de mármore e granito, a depender da demanda dos clientes pelos tipos de rochas.

A marmoraria estudada possui área útil de aproximadamente 150 m² e realiza apenas o beneficiamento secundário das rochas, que consiste na obtenção de produtos acabados e polimentos. Os estados fornecedores de rochas são o Espírito Santo. As chapas chegam à empresa medindo aproximadamente 2,80 x 1,80 x 0,02 m e são descarregadas com o auxílio dos próprios funcionários, as chapas são levadas ao local de estoque situado em um pequeno galpão, sendo agrupadas de acordo com o tipo de rocha.

O primeiro passo do processo de corte é a máquina com serra de disco de diamante, onde são executados cortes retos. A lâmina da serra fica fixa e as chapas das rochas ficam

apoiadas sobre uma pequena plataforma móvel que desliza em direção a serra. Todo o processo é realizado com a presença de água para facilitar o corte, resfriar a lâmina e evitar a dispersão de material particulado, gerando uma lama formada por resíduo de rochas e água, que é depositada em um reservatório, este processo pode ser observado pela Figura 3.3

➤ Coleta da Amostra

Do resíduo gerado pela marmoraria coletou-se uma amostra segundo as prescrições da NBR 10007 (ABNT, 2004), que trata da amostragem de resíduos sólidos. Aproximadamente 80 kg de amostra foram coletadas e enviadas para o Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade Federal do Pará (UFPA), onde foram armazenadas em recipientes plásticos para serem utilizadas nesta pesquisa.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.3 – (a) Chapas Beneficiadas; (b) Serra de Corte (c) Resíduo de marmore e granito (Lama); (d) Resíduo (Retalhos)

➤ **Preparação das Amostras**

A primeira etapa foi colocar o material para secagem ao sol durante 4 h no período de 8:00 h as 12:00 h durante 4 dias para perder a água absorvida, após essa etapa o resíduo foi levado para estufa por um período de 24 h em uma temperatura de 100°C para que ficasse com o mínimo de umidade. O resíduo foi armazenado em tonéis para evitar contaminação com outros materiais e posteriormente a realização dos ensaios de caracterização, na figura abaixo mostra a etapa de secagem ao sol como mostra a Figura 3.4



(e)



(f)

Figura 3.4 – (e) Secagem do resíduo ao sol,(f) resíduo seco após 4 horas

3.1.8 Caracterização Física

As características físicas avaliadas no resíduo foram distribuição granulométrica, área superficial específica (BET), massa unitária e índice de vazios de acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2006) e massa específica (NBR NM 23, 2001).

Nesta pesquisa foram desenvolvidos dois métodos de distribuição granulométrica, a investigação do uso do resíduo como filler no cimento Portland foi realizada por difração à laser buscando identificar se a granulometria se aproximava em relação ao cimento usado. A Figura 3.5 apresenta as curvas granulométricas do cimento Portland CP V e da amostra do resíduo, com base nesta análise, identificou-se que a amostra se aproxima com a granulometria do cimento, adotou-se está para os ensaios não havendo necessidade de peneiramento ou moagem da amostra. Para o resíduo ser utilizado como fíller, as partículas deveriam necessariamente ter dimensão igual ou inferior às partículas do cimento para atuarem como agente nucleador das fases hidratadas.

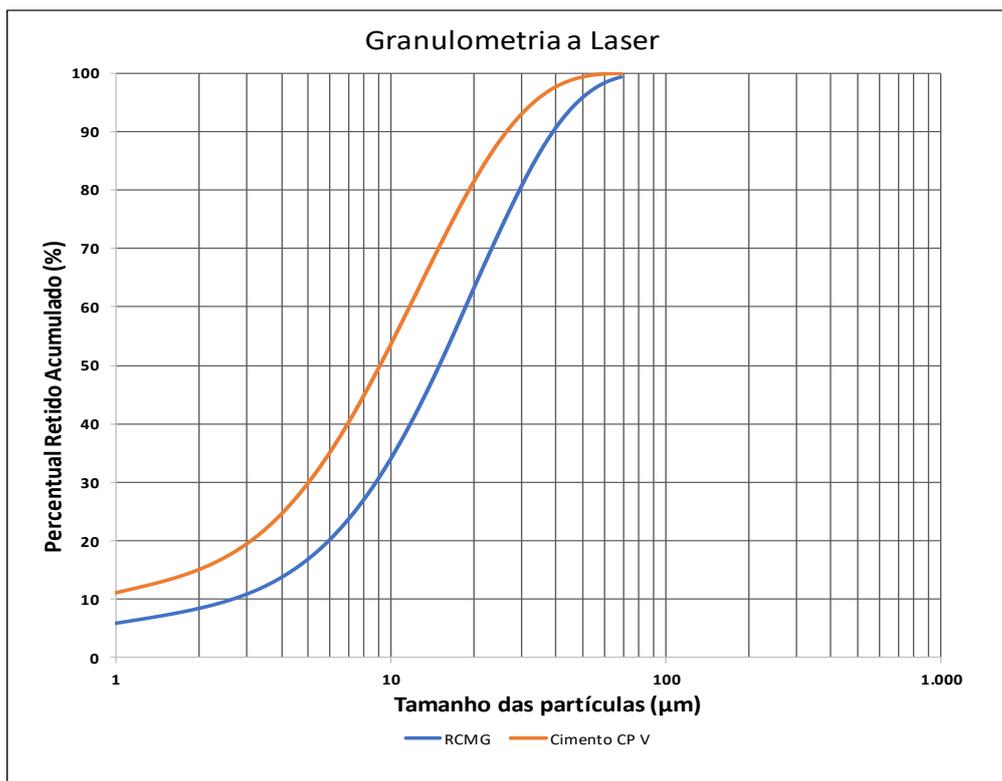


Figura 3.5 – Granulometria á laser do RCMG e Cimento CPV

A finura do material retido na peneira 200 foi de 17% muito próxima da máxima exigida dos cimentos com substituição de material filler de 15%. A tabela 3.5 apresenta os resultados da caracterização física do RCMG.

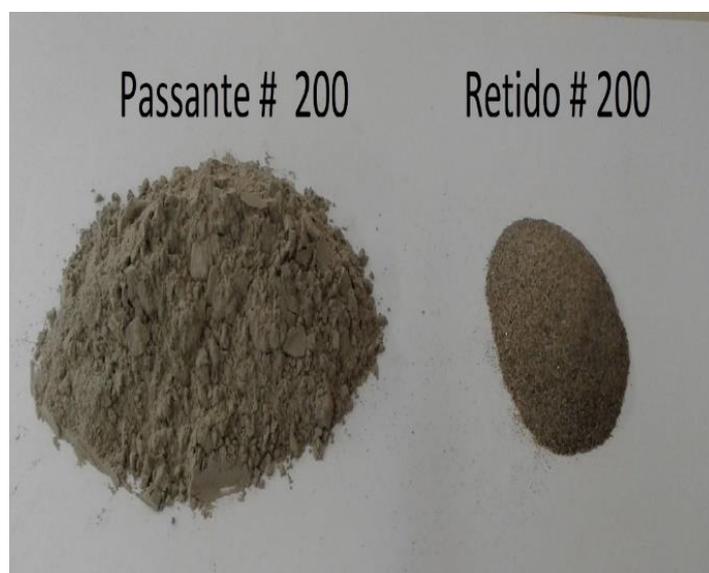


Figura 3.6 – RCMG retido # 200

Tabela 3.5 – Características Físicas do RCMG

Características Físicas		Norma de Ensaio
Massa específica	2,78 g/cm ³	NBR NM 23 (ABNT,2001)
Massa unitária	1,60 g/cm ³	NBR NM 45 (ABNT,2006)
Finura Peneira N° 200	17%	NBR 11579(ABNT,2012)
Superfície Específica - RCMG	4.683 m ² /g	Método BET
Superfície Específica - CPV	11.242 m ² /g	Método BET

Fonte : Autor

A análise de área superficial específica, determinado pelo método B.E.T. (Brunauer Emmett Teller) por adsorção de nitrogênio, realizado no Laboratório de Análises Químicas

do Instituto de Engenharia Química da Universidade Federal do Pará. Tal método é baseado na determinação da quantidade de nitrogênio gasoso necessário para cobrir a superfície de uma amostra. Desta forma, foram obtidos os resultados da área superficial específica, De acordo com Bauer (2015) a área superficial específica serve para bem caracterizar a finura de um material granulado, tendo aplicação quase que somente em materiais de grande finura (cimento e filler), logo, sua área B.E.T. será tanto maior quanto mais fino ele for. Assim, torna-se relevante sua investigação como filler no cimento Portland, pois, é essencial que o material possua características uniformes, especialmente a finura (DAL MOLIN, 2005).

3.1.9 Caracterização Química.

Caracterização química da amostra do RCMG foi utilizada a análise por Fluorescência de Raios X (FRX), realizado no Laboratório de Análises Químicas do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará.

As análises foram realizadas por Fluorescência de Raios-X, utilizando espectrômetro WDS seqüencial, modelo Axios Minerals da marca PANalytical, com tubo de raios-X cerâmico, anodo de ródio (Rh) e máximo nível de potência 2,4 KW. Na preparação utilizou-se Pastilha prensada de 5 g de amostra + 1,5 g de aglomerante (cera de parafina), respectivamente, a mistura foi prensada com uma carga de 20 toneladas. As aquisições e tratamento dos dados foram realizados por meio do software SuperQ Manager da PANalytical. A tabela 3.6 apresenta o resultado da Fluorescência do RCMG.

Tabela 3.6 - Análise química do RCMG

Resíduo do Corte do Mármore e Granito	
Componente	% Massa
SiO ₂	61,8803
Al ₂ O ₃	13,793
Fe ₂ O ₃	7,7132
CaO	6,5814
K ₂ O	5,0414
TiO ₂	1,476
P ₂ O ₅	0,8368
MgO	0,3757
Na ₂ O	0,2842
SO ₃	0,2032
MnO	0,1292
ZrO ₂	0,0739
SrO	0,05
CuO	0,0416
CO ₂ O ₃	0,0408
CO ₂	1,4791

Fonte: Autor

Na Tabela 3.6 é apresentada a análise química quantitativa do RCMG em função dos principais óxidos, obtida pelo método da fluorescência de raios-X (FRX). A partir deste ensaio podemos inferir que o resíduo classifica-se como adição mineral pozolânica, pois a somatória de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ foi de mais de 83% , maior do que o mínimo exigido pela NBR 12653 (ABNT, 2014) que é de no mínimo 70% da somatória para classes N e C e 50% para classe E, assim como o percentual máximo de perda ao fogo é de 10% para classe N e 6% para classes C e E.

Apresentando grande potencial pozolânico, buscou se verificar se o material se encontrava na forma amorfa ou cristalina.

3.2 Caracterização Mineralógica

A caracterização mineralógica do RCMG foi obtida por meio da Difração de Raios X (DRX), pelo método do pó, realizado no Laboratório de Análises Químicas do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará.

As análises foram realizadas em difratômetro modelo X'PERT PRO MPD (PW 3040/60), da PANalytical, com Goniômetro PW3050/60 (Θ/Θ) e com tubo de raios-x cerâmico de anodo de Cu ($K\alpha_1 = 1,540598 \text{ \AA}$), modelo PW3373/00, foco fino longo, 2200 W, 60 kv e filtro $K\beta$ de Níquel. O detector utilizado foi do tipo RTMS, X'Celerator. A coleta dos difratogramas foi realizada com passo angular de $0,02^\circ$ e o tempo por passo 0.5 s e intervalo de medida entre os ângulos de Bragg (2θ) de 0° e 70° . A aquisição dos dados foi feita com o software X'Pert Data Collector, versão 2.1a, e o tratamento dos dados com o software X'PertHighScore versão 2.1b, também da PANalytical.

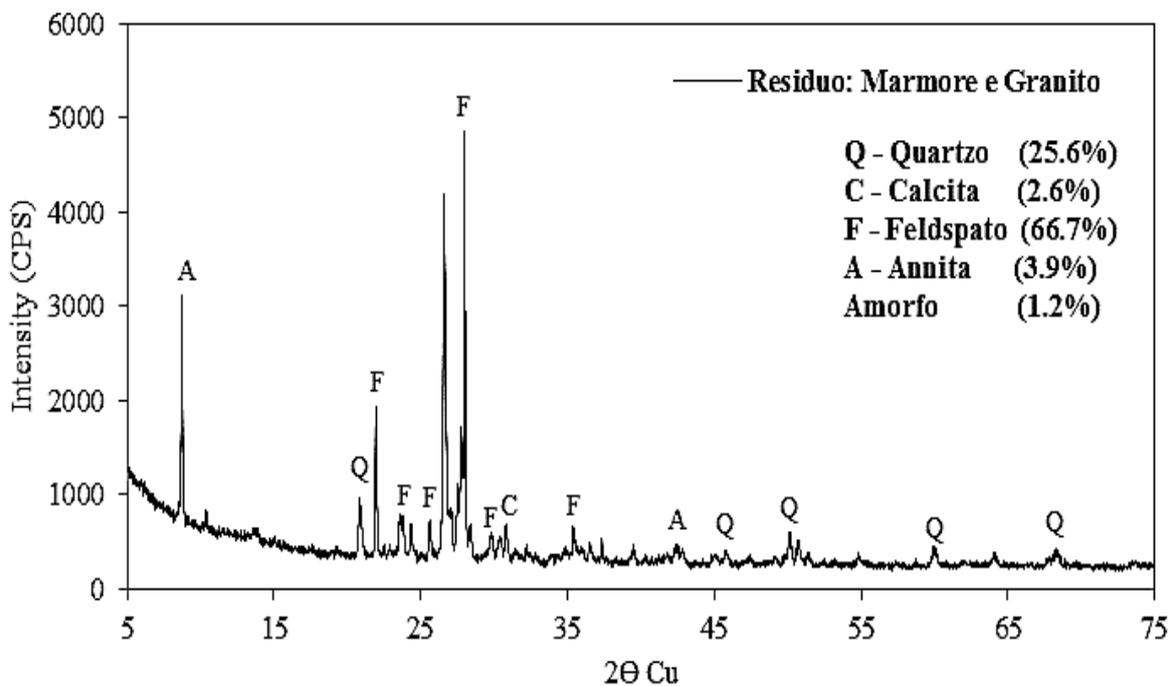


Figura 3.7 – Difratograma de raio x do RCMG

A escala horizontal (ângulo de difração) fornece o espaçamento do arranjo cristalino, e a escala vertical (altura do pico) fornece a intensidade do raio. A intensidade de picos característicos de cada mineral é proporcional a sua quantidade. Conforme esperado,

a forma apresentada na difração mostra que os compostos químicos presentes no RCMG se apresentam tipicamente na forma cristalina. Como mostra a figura

Ao analisar a imagem acima, tem-se a presença de inúmeros picos de difração, embora esta ainda apresente um pequeno percentual de amorfização. Desta forma, o RCMG irá se apresentar como um produto cristalizado, observa se a predominância do mineral Feldspato, seguido do Quartzo. Dessa maneira pode se supor que o material tem probabilidade de ser utilizado como material filler, pois apresentou apenas 1,2% de material no estado amorfo.

3.2.1 Caracterização Morfológica

As análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizadas no microscópio eletrônico de varredura da marca LEO, modelo 1430 VP do Instituto de Geociências da UFPA, no Laboratório de Análises por meio do microscópio eletrônico de varredura. A Figura 3.8 mostra a morfologia do RCMG. Pode-se observar que as formas das partículas são irregulares, com textura superficial áspera como mostra a Figura 3.8

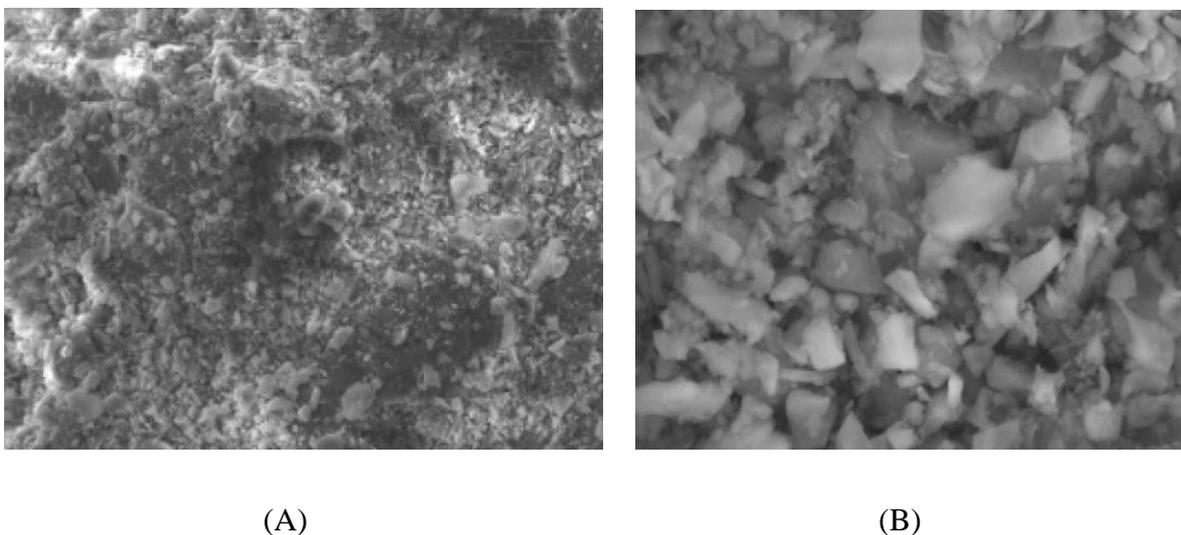


Figura 3.8 – (A) Morfologia do RCMG- Aumento 100 μ m; Aumento 500 μ m (B)

As micrografias mostram que os grãos de RCG não apresentam uma forma definida, sendo angulosos. Observa-se uma diferenciação da forma lamelar dos feldspatos presentes nos granitos, devido ao processo de serragem dos blocos.

3.2.2 Caracterização da Reatividade

Procurando estabelecer alternativas mais adequadas para aplicação do RCMG como material de construção civil, foram realizados ensaios de potencial reatividade. Com o propósito de reforçar a hipótese de que o resíduo analisado pela FRX e pelo DRX se caracteriza ou não como material pozolânico, buscou-se avaliar o índice de atividade pozolânica (IAP) com cal e cimento. Assim como, avaliar sua reação álcali-agregado para a condição de aplicação como filler.

➤ Índice de atividade pozolânica com cal

De acordo com a NBR 5751 (ABNT, 2015) o índice de atividade pozolânica com cal é o valor da resistência à compressão simples em corpos de prova de 50 mm de diâmetro x 100 mm de altura, o qual deve ser superior a 6 MPa para que o material seja caracterizado como pozolana segundo NBR 12653 (ABNT, 2015).

A NBR 5751 estabelece a utilização dos materiais nas seguintes proporções:

- Hidróxido de Cálcio: 104 gramas;
- Areia normal brasileira de acordo com a NBR 7214 (ABNT, 2015): 936 gramas, sendo 234 g de cada uma das quatro frações;
- Material pozolânico determinado pela equação.

$$m = 2 \frac{\delta_{poz}}{\delta_{cal}} \cdot 104 \text{ g}$$

δ_{poz} = valor da massa específica do material pozolânico;

δ_{cal} = valor da massa específica do hidróxido de cálcio (podendo ser fornecido pelo fabricante).

A quantidade necessária de água é estabelecida pelo o índice de consistência de (225 \pm 5) mm, determinado segundo a NBR 7215 (ABNT, 1997). Foram moldados três corpos de prova de acordo com a NBR 7215 e sua cura ocorreu em duas etapas: nas primeiras 24 horas, os moldes permaneceram em ambiente à temperatura de (23 \pm 2) °C. Durante os 6 dias decorrentes, foram mantidos em estufa à temperatura de (55 \pm 2) °C. Em seguida os corpos de prova foram armazenados ainda dentro dos moldes, em ambiente à temperatura de (23 \pm 2) °C, durante 2 horas, posteriormente capeados e ensaiados à compressão. abaixo os resultados obtidos para o IAP com cal, a Tabela 3.7 apresenta a resistência à compressão média dos corpos de prova ensaiados e a Figura 3.9 mostra a resistência mínima prevista na NBR 12653 (ABNT, 2015).

Tabela 3.7 – Resultado IAP com Cal

Argamassa	Resistência à compressão (MPa)
Corpo de prova CP 1	1,25
Corpo de prova CP 2	1,28
Corpo de prova CP 3	1,23
Média	1,25

Fonte : Autor

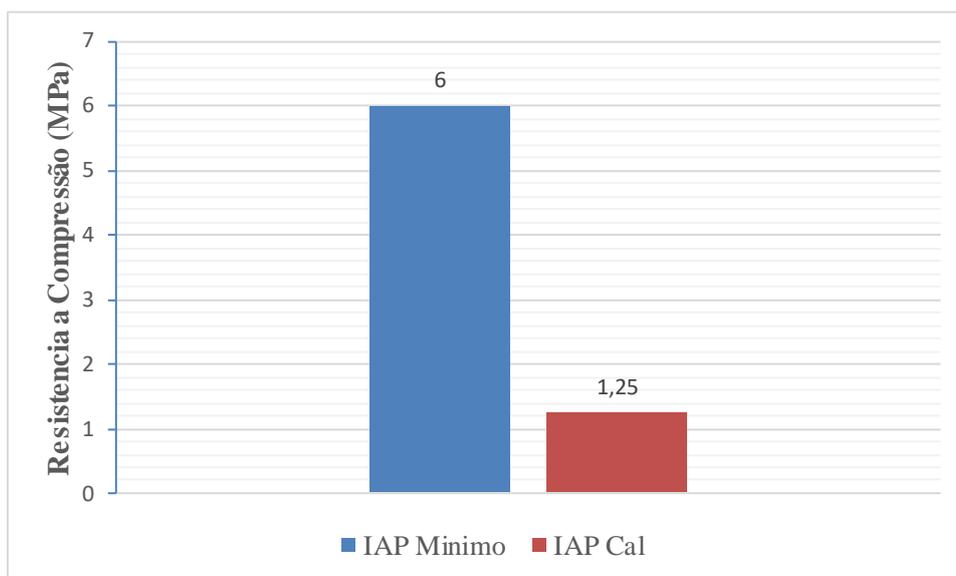


Figura 3.9 – Resultado IAP com Cal

A argamassas produzidas neste ensaio não atingiram o valor mínimo de 6 MPa exigido pela NBR 12653 (ABNT, 2015), para que sejam consideradas materiais pozolânicos. Observa-se que a amostra ensaiada alcançou 20,83 % da resistência mínima exigida

➤ Índice de atividade pozolânica com Cimento Portland

A NBR 5752 (ABNT 2014) especifica um método para determinação do índice de desempenho de materiais pozolânicos com cimento Portland aos 28 dias, sendo calculado pela relação entre a resistência à compressão da argamassa A e da Argamassa B descrita pela equação abaixo

$$I = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \times 100$$

A seguir os índices das fórmulas são definidos:

I cimento = índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, onde o resultado expresso em porcentagem (%);

fcB = resistência à compressão média, aos 28 dias, dos corpos de prova moldados com cimento Portland CP II F-32 e substituição de 25% de material pozolânico (argamassa B);

fcA = resistência à compressão média, aos 28 dias, dos corpos de prova moldados somente com cimento Portland CP II F-32 como material cimentício

Foram moldados quatro corpos de prova cilíndricos de (50 x 100) mm para argamassa de referência e quatro para argamassa com substituição, misturados e curados de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1997). A quantidade de material em massa para cada argamassa foi estabelecida pela norma NBR 5752 (ABNT 2014).

Os resultados obtidos para IAP com cimento, seguem apresentados na Tabela 3.8 e a Figura 3.1.1 apresenta o percentual do IAP com cimento e material pozolânico, bem com o percentual do IAP mínimo previsto pela NBR 12653 (ABNT, 2015).

Tabela 3.8 – Resultado IAP com Cimento

Resistência à compressão aos 28 dias	
Referência	Resistência (MPa)
A1Ref	23,10
A2Ref	20,21
A3Ref	23,31
A4Ref	21,92
Média	22,13
Argamassa (CP + 25% RCMG)	
A25RCMG 1	7,46
A25RCMG 2	6,78
A25RCMG 3	6,97
A25RCMG 4	7,61
Média	7,205
IAP Com Cimento Portland	33%

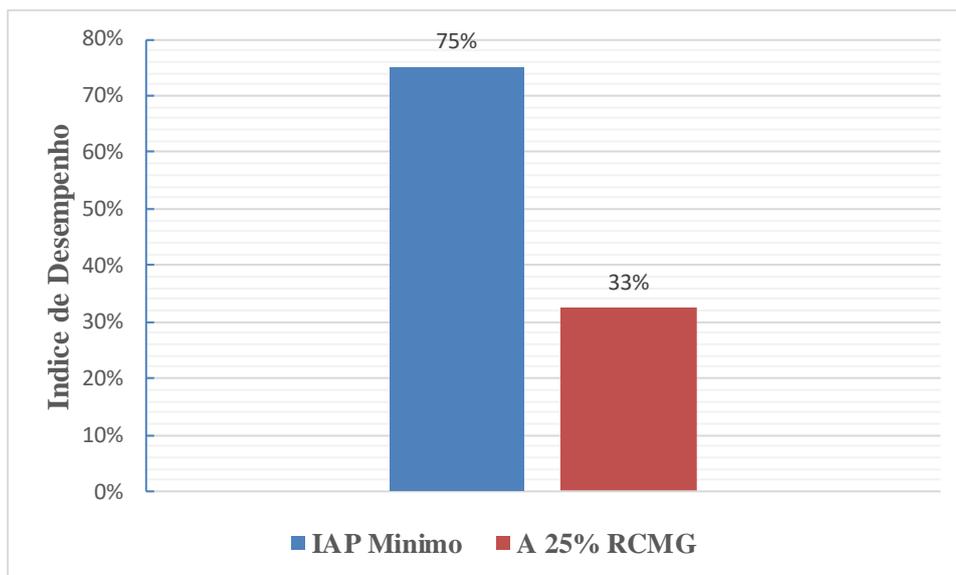


Figura 3.1.1 – Resultado IAP com Cimento

O IAP com cimento Portland foi de 33%, não atingindo o percentual mínimo de 75% exigido pela NBR 12653 (ABNT 2015), para que seja considerado um material pozolânico. Verificou-se que as argamassas com adição de RCMG obtiveram uma significativa queda de resistência em relação às argamassas de referência. Portanto, confirma-se a hipótese inicial do resultado da FRX que o RCMG estudado não se classifica como material pozolânico.

❖ **Reação Álcali-Agregado (RAA)**

A reação álcali-agregado é um problema de degradação que pode se desencadear em estruturas de concreto. Trata-se de uma reação química lenta que ocorre entre alguns minerais presentes nos agregados e hidróxidos alcalinos presentes nos poros do concreto. O produto dessa reação é um gel sílico-alcalino hidrófobo, ou seja, que aumenta de volume quando em contato com a água, levando à intensa fissuração da estrutura. Sendo assim, a prevenção é a melhor forma de evitar o surgimento de RAA, portanto, conhecer a potencialidade reativa dos agregados é fundamental.

O método mais difundido é o da ASTM C 1260, que foi normalizado no Brasil pela NBR 15577-4 (ABNR, 2008), de acordo com essa norma foram moldados três (03) primas de argamassa misturados em um misturador mecânico (argamassadeira), com o agregado que se desejou avaliar. Na dosagem foram utilizados 990g (gramas) de resíduo de mármore e granito em frações granulométricas conforme solicita a norma, 440 g de cimento CPV – ARI. Depois de moldados, foram colocados em câmara úmida por 24 horas, após esse período, os prismas de argamassa foram desmoldados e alocados em um recipiente com água e levados a estufa com 80°C de temperatura por 24 horas. Posteriormente, foram submetidos a um banho térmico em torno de 80°C de solução de hidróxido de sódio (NaOH), por 28 dias de imersão, somando 30 dias de idade. Foram realizadas leituras periódicas do comprimento das barras conforme preconiza a norma. Os resultados de expansão são avaliados após 30 dias, contados a partir da data da confecção das barras.

De acordo com a NBR 15577-4 (ABNT, 2008), são considerados potencialmente reativos aos álcalis, os agregados que apresentarem expansões maiores que 0,19% e, potencialmente inócuos, agregados com expansões inferiores a esse valor, sendo que o cálculo sempre considera a média dos três (03) prismas de argamassa.

A Figura 3.1.2 apresenta o gráfico das expansões ao longo do tempo. Pode-se observar que o resíduo de mármore e granito se caracterizou como material potencialmente inócuo, por apresentar expansões inferiores a 0,19% conforme classifica a NBR 15577-4 (ABNT, 2008), portanto a sua aplicabilidade como material torna-se relevante.

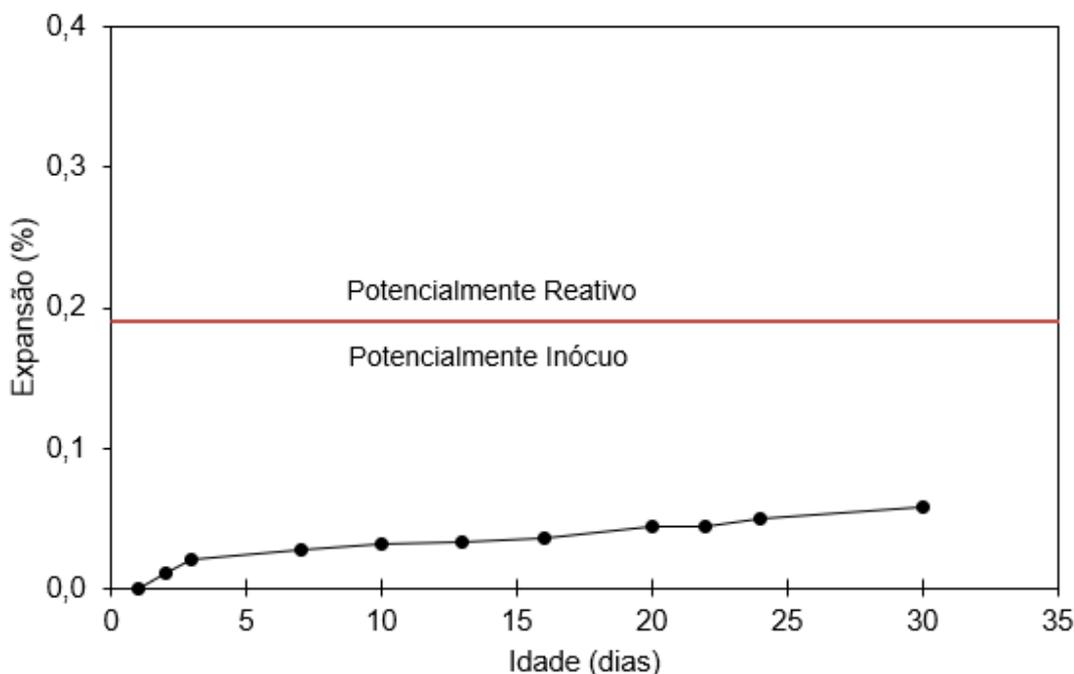


Figura 3.1.2 - Gráfico de expansões ao longo do tempo

4 2ª ETAPA: DOSAGEM DO CONCRETO

Dando continuidade no estudo de uma aplicação viável para o resíduo de mármore e granito como material de construção civil, nesta etapa, foi avaliado os efeitos da substituição parcial do cimento pelo resíduo in natura nas propriedades do concreto, já que o mesmo não apresentou propriedades pozolânicas significativas como mostrados nos ensaios de DRX e IAP.

Para a dosagem do concreto utilizou-se o método do IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992) que consiste em ajustar um teor ótimo de argamassa (α) estabelecendo como parâmetro de controle, o valor de abatimento do tronco de cone, que neste estudo foi fixada em 100 ± 20 mm, com Fck de 30 MPa e concretos confeccionados com substituição em massa do cimento pelo resíduo, nos teores de 5% ,10% e 15%, foi utilizado um teor de argamassa de 51% visando um concreto mais econômico.

A dosagem visou um concreto com traço de referência obtido do gráfico de dosagem de 1:5,04 e relação água/ cimento de 0,61 adicionou-se aditivo superplastificante para manter a consistência e não alterar a relação água/cimento. Para os valores correspondentes obteve-se um traço unitário de 1:2,08:2,96:0,61

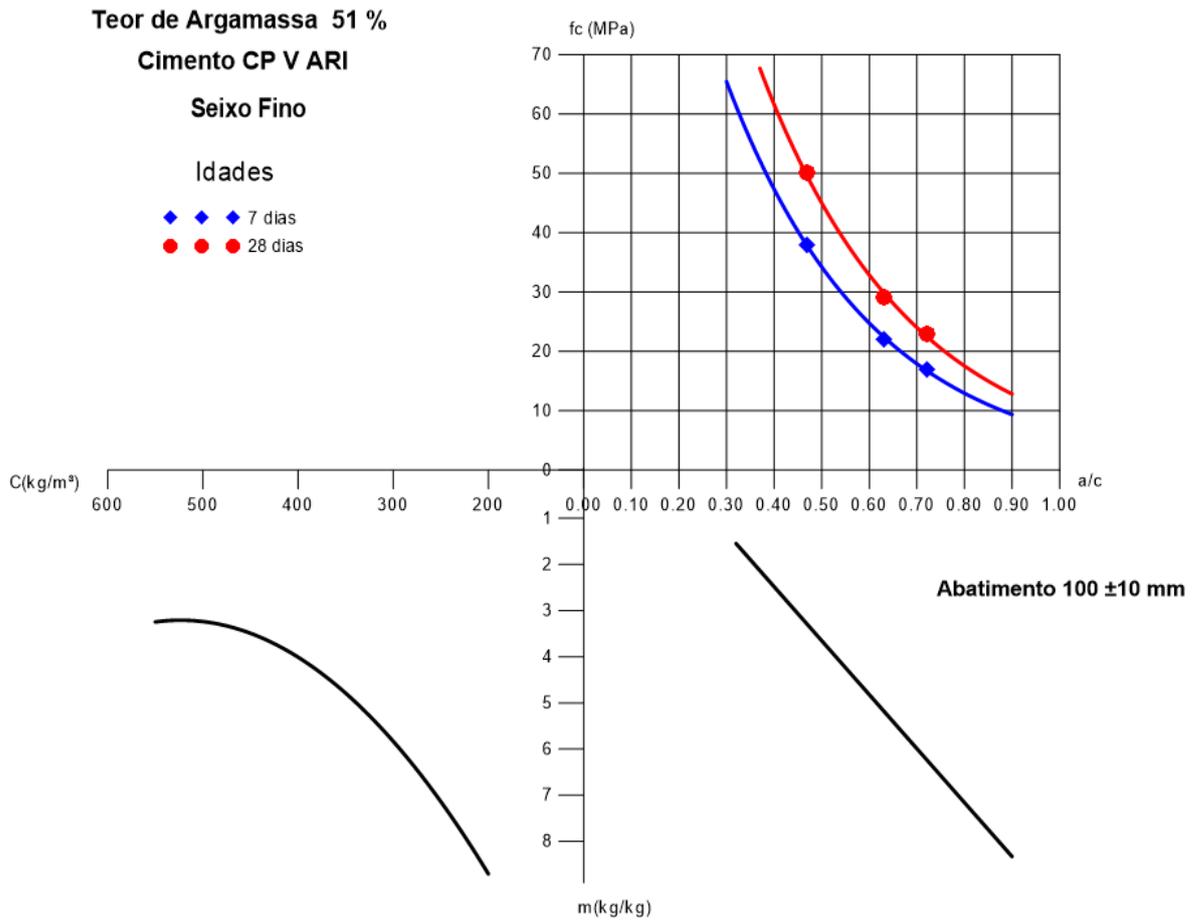


Figura 4.1 - Gráfico de dosagem método IPT/EPUSP.

Fonte: Autor

Para a produção dos concretos foram utilizadas as seguintes quantidades de corpos de prova apresentados na Tabela 4.1

Tabela 4.1 - Quantidade de corpos de prova de concreto

CONCRETOS	Resistência à Compressão Axial			Módulo de Elasticidade	Tração por Compressão Diametral		*Tração na Flexão	Absorção Por Imersão	Absorção Por Capilaridade	
	7 dias	28 dias	60 dias	28 dias	7 dias	28 dias	28 dias	28 dias	28 dias	
CREF	6	6	6	3	3	3	3	3	3	
C5RCMG	6	6	6	3	3	3	3	3	3	
C10RCMG	6	6	6	3	3	3	3	3	3	
C15RCMG	6	6	6	3	3	3	3	3	3	
TOTAL						132				

*para o ensaio de tração não flexão foram usadas vigotas com dimensões 500 mm x 150 mm x 150 mm

A substituição do cimento Portland pelo RCMG foi realizada por compensação de volume, pois, tratando-se de dosagem, a utilização de um material com menor massa específica resulta em um volume maior. Sendo assim, a substituição da massa do cimento portland pela massa do RCMG resultaria em traços com volumes menores de resíduo, uma vez que a massa específica do RCMG é menor que a massa específica do Cimento Portland, demandando assim menos água e cimento para produzir traços equivalentes ao traço de referência, obtendo-se desta forma, valores incoerentes. Os detalhes do consumo dos materiais utilizados estão apresentados na Tabela 4.2

Tabela 4.2 - Quantidade de materiais para produção dos concretos

Concreto	Cimento (Kg)	RCMG (Kg)	Areia (Kg)	Seixo (Kg)	Água (Kg)	Aditivo (ml)
CREF	32,909	0,000	68,480	97,413	20,075	0,000
C5 RCMG	31,429	1,480	68,480	97,413	19,172	23,281
C10 RCMG	29,949	2,961	68,480	97,413	18,269	30,503
C15 RCMG	28,468	4,441	68,480	97,413	17,366	34,267

Os concretos foram confeccionados em uma betoneira de eixo inclinado, onde fixou-se o tempo de mistura em 5 minutos e a ordem da mistura, sendo: agregado graúdo, metade da água, agregado miúdo, cimento e o restante da água, posteriormente foi adicionado o RCMG aos poucos devido a amostra conter muitos finos a sua imediata inserção ocasiona perda de consistência e trabalhabilidade, por último adicionou-se o aditivo para melhorar a trabalhabilidade do concreto e atingir o abatimento estabelecido de 100 ± 20 mm.

Seguindo as prescrições da NBR 5738 (ABNT, 2016), após a mistura completa, o concreto foi adicionado e adensado manualmente com haste de aço nos moldes com dimensões de 10 x 20 cm. Terminado o adensamento do concreto nas fôrmas cilíndricas, realizou-se o acabamento superficial e, em seguida, as superfícies dos corpos de prova foram protegidas com filme plástico para evitar a evaporação da água presente na superfície. A desforma foi realizada no dia seguinte à dosagem, posteriormente, os corpos de prova foram colocados imersos em tanques com água e cal para continuar o regime de cura até a idade de controle. Antes dos ensaios mecânicos os corpos de prova foram retificados com o objetivo de proporcionar uma distribuição uniforme dos esforços nas suas superfícies.

4.1. APRESENTAÇÃO, ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios de desempenho mecânico e durabilidade dos concretos, feitos e indicados no programa experimental estabelecido no capítulo 3.

4.1.1 Propriedades do concreto no estado Fresco.

4.1.2 Avaliação da Trabalhabilidade.

Dentro do programa experimental, foi realizado o estudo da trabalhabilidade dos concretos de referências e com RCMG, em que se avaliou esta propriedade pela norma de determinação de consistência através do ensaio de abatimento do tronco de cone para todos os traços apresentados na matriz dos experimentos.

A trabalhabilidade foi controlada através do ensaio de abatimento do tronco de cone, preconizado pela NBR NM 67 (ABNT, 1998), sendo este considerado um fator de controle nos concretos. Os resultados da trabalhabilidade medida na confecção dos concretos respectivamente estão apresentados nas Tabelas 4.2

Tabela 4.3 - Consistência do concreto (Slump test).

Concretos	Abatimento (mm)
CREF	95
C5RCMG	90
C10RCMG	90
C15RCMG	95

Fonte :Autor

Houve uma queda progressiva de trabalhabilidade a partir da incorporação do RCMG na mistura. Este efeito pode ter ocorrido em função da finura, forma irregular das partículas, houve a necessidade do uso de aditivo superplastificante para manter a trabalhabilidade do concreto de referência.

4.1.3 Avaliação da resistência por compressão axial.

A Figura 4.2 apresenta uma análise comparativa entre os concretos com substituições de RCMG nas proporções de 5%, 10% e 15%. Observa-se que aos 7 dias, houve incremento de resistência à compressão nos concretos com substituições em relação aos de referência. Enquanto que nas substituições de 15 % obteve-se um aumento significativo de desempenho mecânico. Já, aos 28 dias os concretos com RCMG obtiveram desempenho, não havendo variância significativa entre eles. nas idades de 60 dias não houve ganho de resistência significativo, as misturas tiveram praticamente o mesmo desempenho que o concreto de referência.

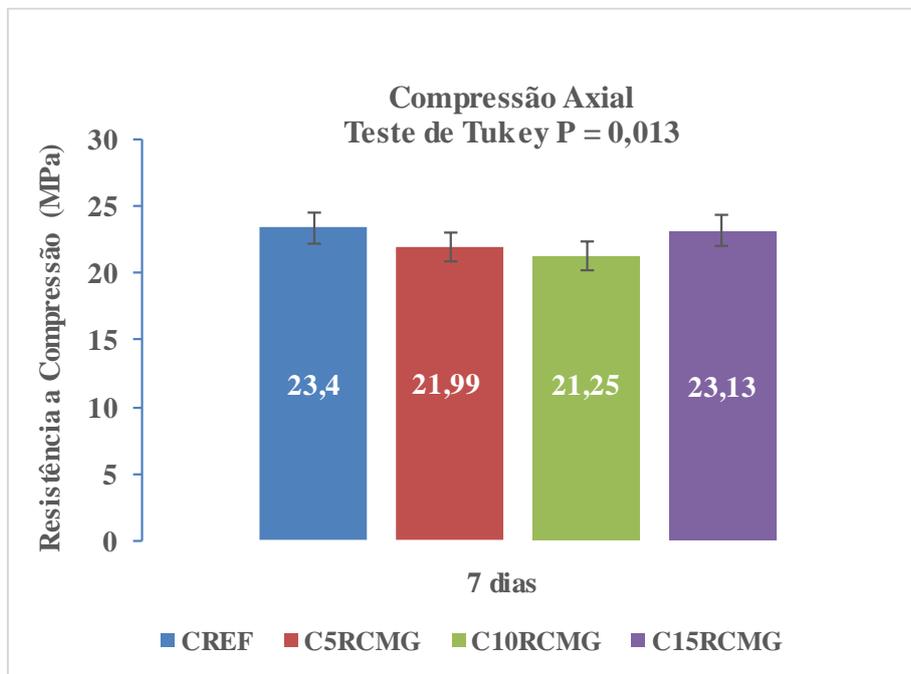


Figura 4.2 – Resistência à compressão dos concretos com substituição parcial do cimento por RCMG aos 7 dias. Valores expressados em médias \pm desvio padrão. (ANOVA; $P < 0,05$)

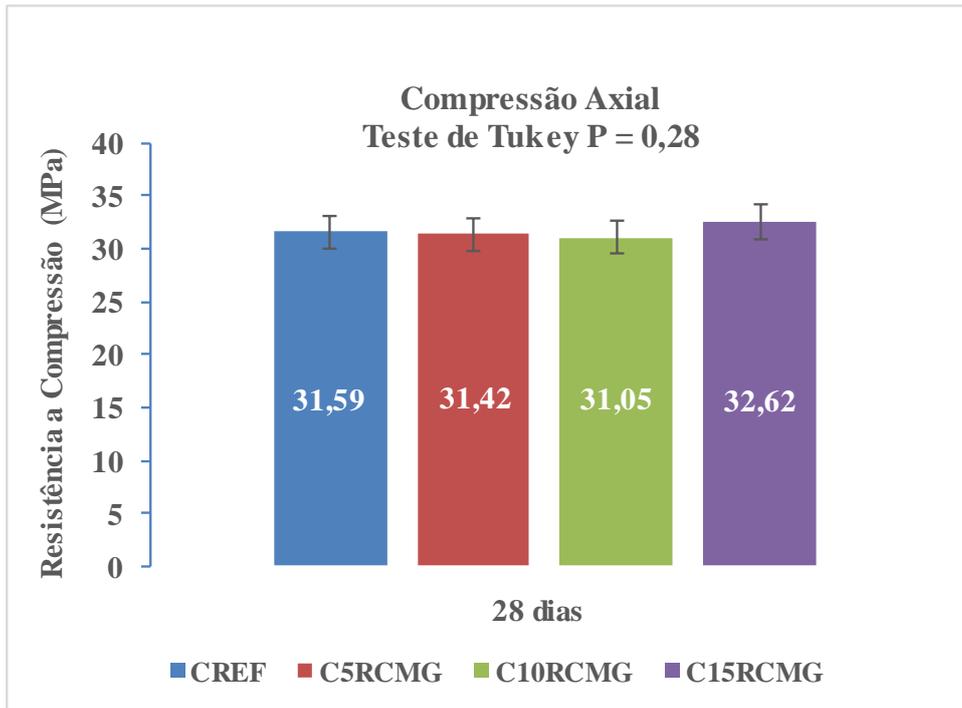


Figura 4.3– Resistência à compressão dos concretos com substituição parcial do cimento por RCMG aos 28 dias. Valores expressados em médias \pm desvio padrão. (ANOVA; $P < 0,05$)

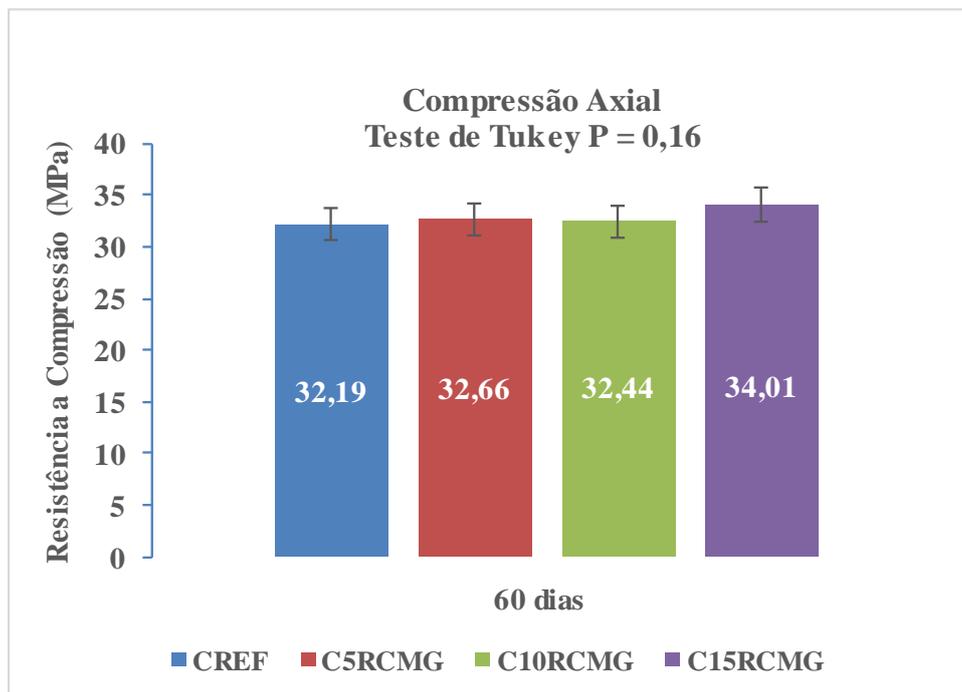


Figura 4.4 – Resistência à compressão dos concretos com substituição parcial do cimento por RCMG aos 60 dias. Valores expressados em médias \pm desvio padrão. (ANOVA; $P < 0,05$)

A maioria das adições minerais inclui alguma forma de sílica vítrea que pode compatibilizar com a cal na presença de água, à temperatura ambiente, para formar silicato de cálcio hidratado idêntico aquele formado pela hidratação do cimento. No entanto, conforme Aïtcin (2009), alguns fillers empregados como adição ao cimento não possuem essa propriedade, sendo utilizado com finalidade exclusivamente pela sua presença física, gerando assim um efeito micro filler, que é responsável por aumentar a densidade da mistura resultante do preenchimento dos vazios pelas minúsculas partículas das adições, cujo diâmetro médio de partícula, deve ser semelhante ou menor que o do cimento (PILAR, 2012).

Alguns fatores poderiam contribuir para esse resultado, dentre eles: a finura do resíduo, que é um importante parâmetro que influencia o efeito nucleação heterogênea; a área superficial específica que, quando associada a uma função eficiente, pode ser utilizada para descrever o aumento do grau de hidratação ou resistência à compressão das argamassas resultante dos efeitos físicos das adições minerais (LAWRENCE, 2005).

Observou-se que as amostras com RCMG obtiveram ganho de resistência principalmente a partir dos 28 dias, uma possível interpretação física no caso de pó inerte é que uma partícula da mistura deve influenciar a cinética de hidratação de um grão de cimento apenas se ambas as partículas estiverem suficientemente perto para interagirem entre si. Quando a quantidade de mistura mineral é pequena, as partículas da mistura têm uma elevada probabilidade de estarem perto de um ou mais grãos de cimento. Por outro lado, quando a quantidade de adição aumenta, esta probabilidade diminui, uma vez que algumas partículas podem ser isoladas a partir de grãos de cimento (CYR et al., 2006).

4.1.4 Avaliação da resistência à tração por compressão diametral.

Para a avaliação da influência do RCMG na resistência à tração por compressão diametral foram rompidos três corpos-de-prova cilíndricos, para cada traço de concreto, nas idades de 7 e 28 dias, de acordo com a NBR 7222(2011). A seguir, na figura 4.5 são apresentados os resultados encontrados.

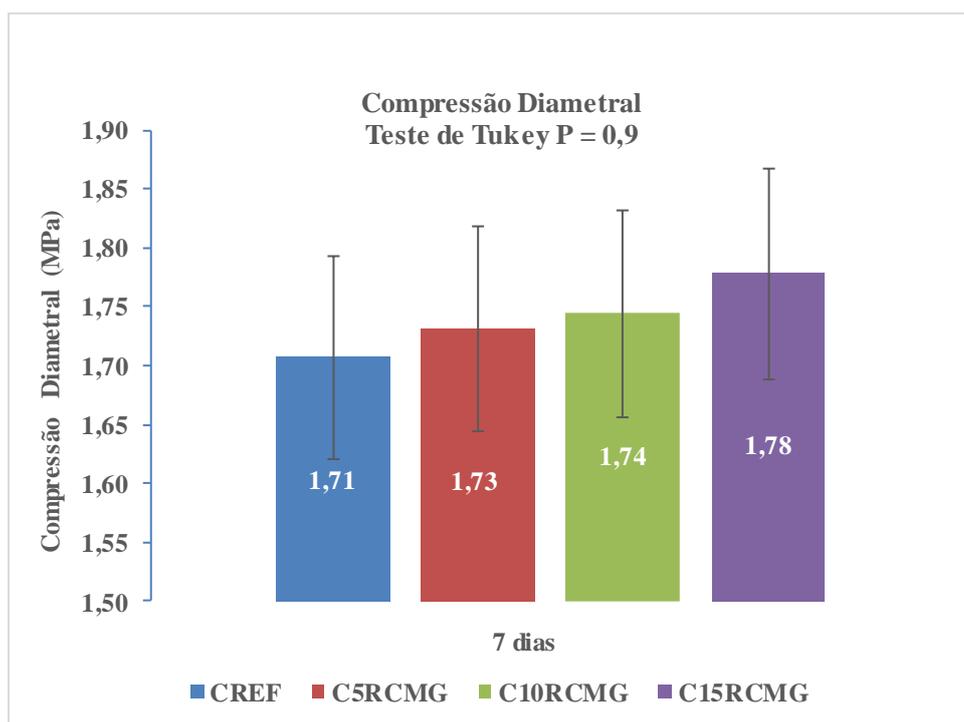


Figura 4.5 – Resistência à compressão dos concretos com substituição parcial do cimento por RCMG aos 7 dias. Valores expressados em médias \pm desvio padrão. (ANOVA; $P < 0,05$).

Quanto a resistência à tração, observou-se estatisticamente houve variação significativa dos concretos com substituições, na idade 7 dias as misturas com RCMG mostraram desempenho superior de 1,16% ,1,75% e 4,09% para os concretos C5RCMG, C10RCMG e C15RCMG respectivamente, na idade 28 dias o incremento de resistência foi ainda maior ficando em torno de 2,44%,4,39% e 7,08% para os concretos C5RCMG,C10RCMG e C15RCMG respectivamente.

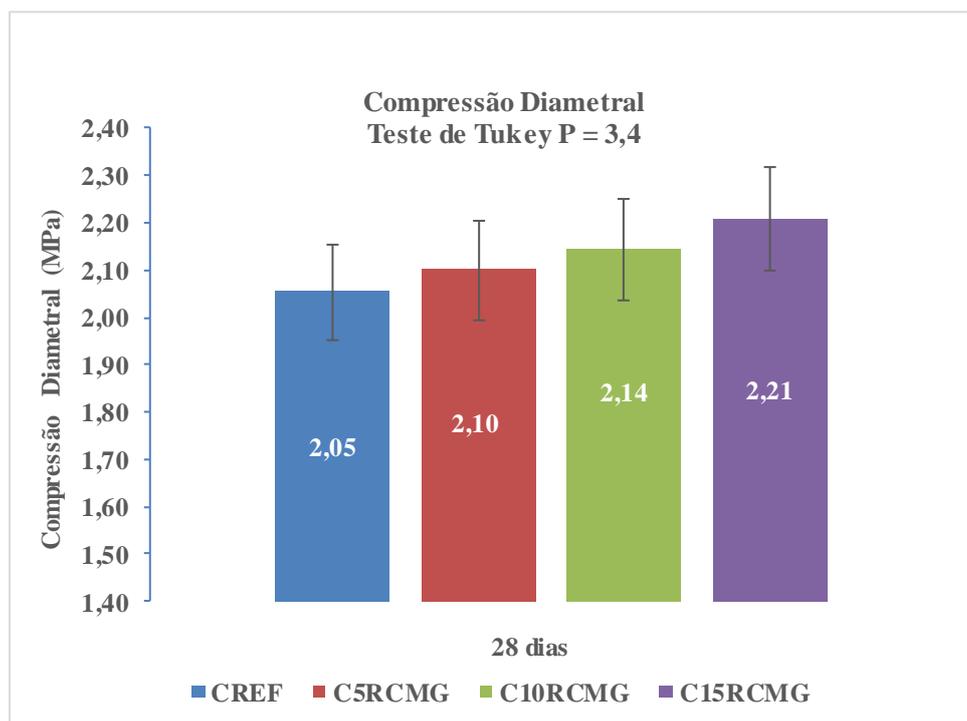


Figura 4.6– Resistência à compressão diametral dos concretos com substituição parcial do cimento por RCMG aos 28 dias. Valores expressados em médias \pm desvio padrão. (ANOVA; $P < 0,05$)

Na idade de 28 dias houve melhora no ganho de resistência, como a estrutura dos compostos do RCMG é cristalina, não há reação química. há apenas um preenchimento dos vazios. Quando os concretos são submetidos aos esforços de tração, a linha média de fratura passa pela zona de maior fragilidade, que são entre o poro e o filler, no contato filler – filler ou no contato filler – produtos hidratados/produtos não hidratados, já que não há ligações químicas entre o grão de adição e os compostos adjacentes. Sem efeito pozolânico do RCG, e apesar da aceleração da hidratação da matriz, a quantidade final dos produtos de hidratação não deve ser alterada. Ou seja, os níveis de resistências dos concretos de referência e com adição de 10%, a longas idades, devem ser os mesmos. Esse ganho ocorreu, provavelmente, devido a um efeito filler preenchendo os interstícios, com uma maior quantidade de produtos hidratados menores e mais dispersos gerados a partir da dispersão das partículas de RCMG.

4.1.5 Avaliação da tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado segundo a norma NBR 12142 (ABNT, 2010), na idade de 28 dias. Para cada mistura de concreto foram moldados dois corpos-de-prova prismáticos, com dimensões 15x15x50 cm. Na figura 4.7 são apresentados os resultados encontrados.

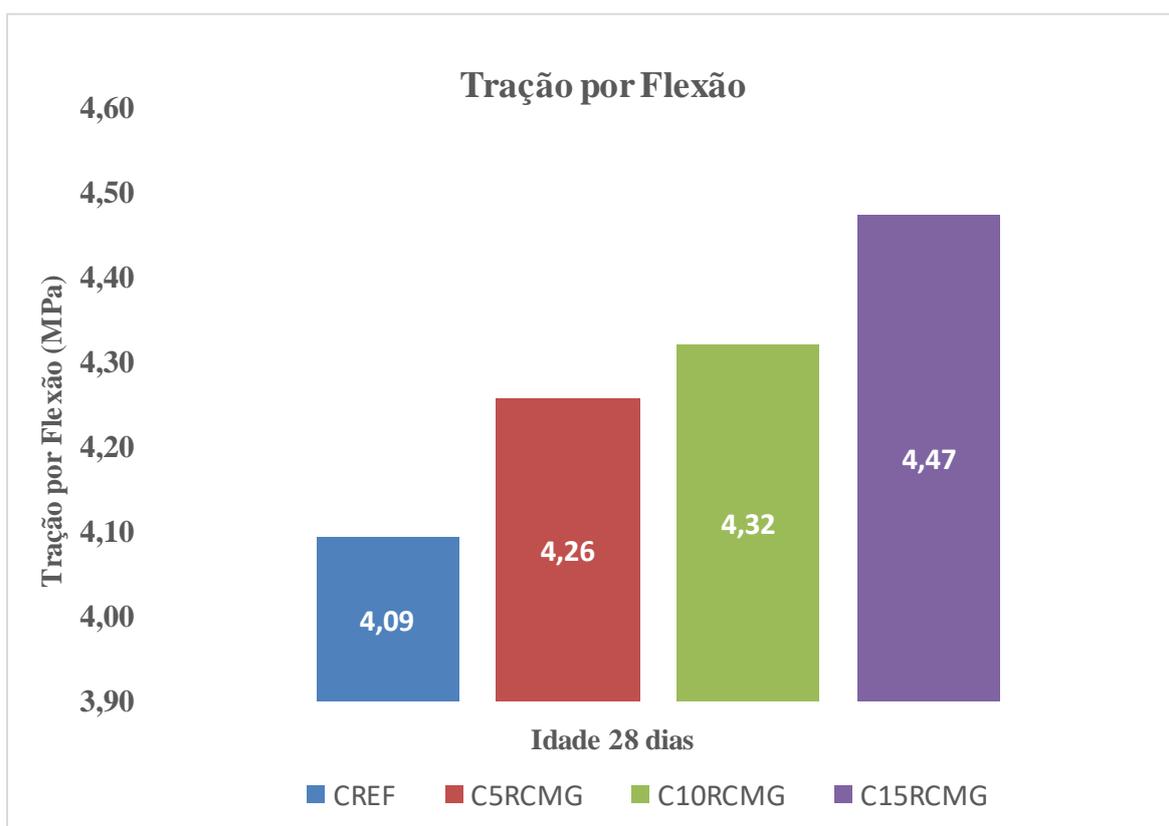


Figura 4.7– Resistência à tração na flexão dos concretos com substituição parcial do cimento por RCMG aos 28 dias. Valores expressados em médias \pm desvio padrão. (ANOVA; $P < 0,05$)

Observou-se estatisticamente houve variação significativa dos concretos com substituições na idade 28 dias as misturas com RCMG mostraram desempenho superior de 4,15% 5,62% e 9,29% para os concretos C5RCMG, C10RCMG e C15RCMG respectivamente ocasionado pelo melhor compactamento das misturas com substituição do Resíduo

A distribuição das partículas, o refinamento dos poros, a possível dispersão e aceleração da hidratação fizeram com que a resistência aos esforços de tração na flexão nos concretos com adição de RCMG se elevassem. MOURA (2000), em seu estudo, verificou que a adição de 20% de escória de cobre moída em concretos provocou um aumento de 17% na resistência à tração na flexão, para concretos com relação a/c - 0,60, em relação aos concretos de referência. Ele verificou também, que o aumento na resistência à tração por compressão diametral e resistência à tração na flexão foram atribuído ao efeito filler da escória de cobre ser o principal responsável pelo aumento da resistência à compressão.

Com relação à resistência aos esforços de tração, o efeito físico do filler é maior nas primeiras idades, devido à aceleração da hidratação do cimento nestas idades. Fato comprovado também por CABRERA et al. (1998), em seu estudo com concretos de alta resistência com cimento com filler calcário.

4.1.6 Avaliação do Módulo de Elasticidade.

A Figura 4.8 apresenta os resultados entre os concretos com uso de RCMG Aos 28 dias, a substituição de 5 % do cimento por RCMG apresentou desempenho melhor em relação ao de referência, já nos concretos com substituição de 10 e 15% de RCMG houve um incremento significativo de desempenho chegando a 39,5% para o C10RCMG 42% para o C15RCMG, em relação aos outros teores, no entanto ao correlacionar os dois últimos teores conclui-se que ambos não diferem significativamente entre si. De forma análoga a Figura 4.9 mostra a linha de tendência dos valores médios do módulo de elasticidade dos concretos analisados aos 28 dias.

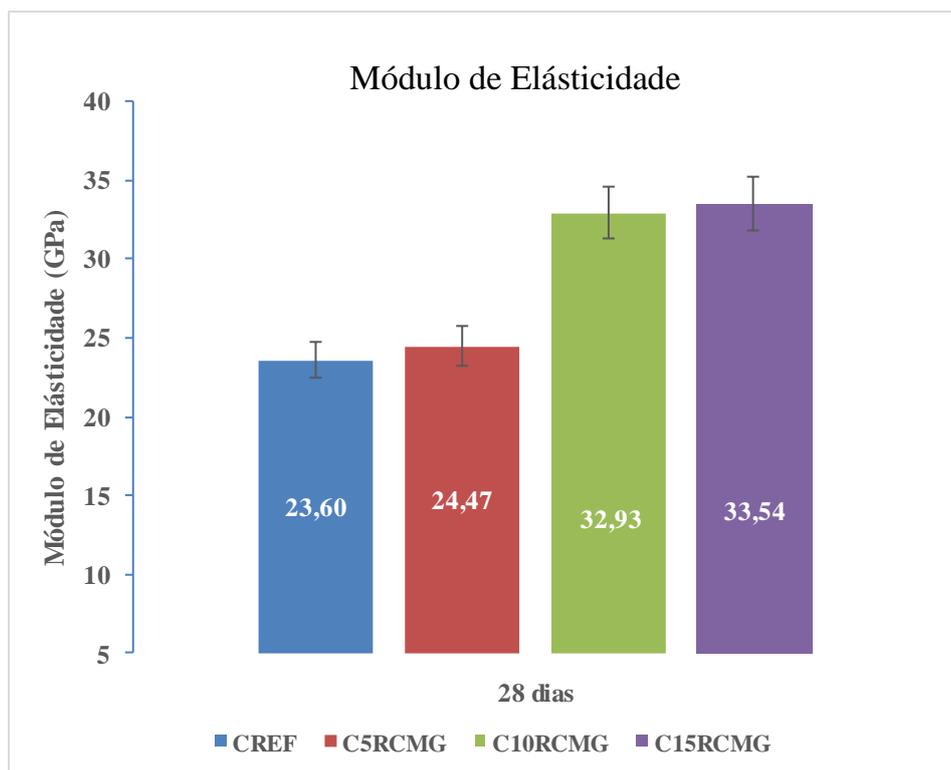


Figura 4.8– Módulos de Elasticidade compressão dos concretos com RCMG aos 28 dias. Valores expressados em médias \pm desvio padrão. (ANOVA; $P < 0,05$)

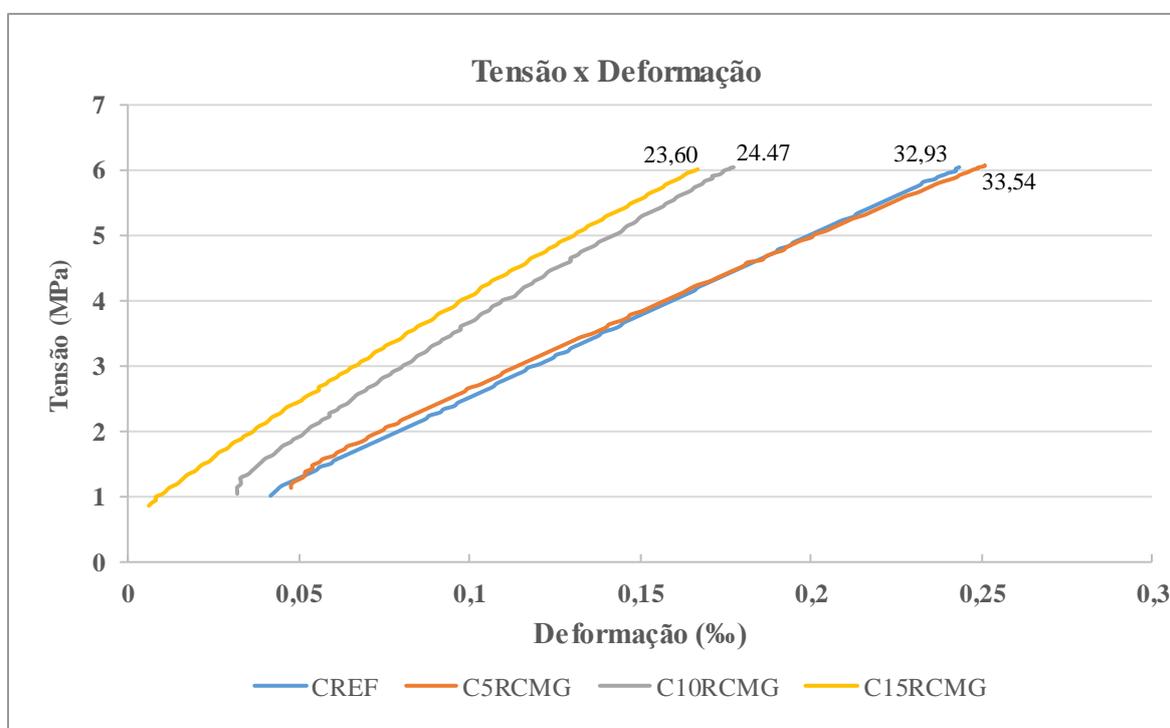


Figura 4.9– Linha de tendência dos valores médios do módulo elasticidade, aos 28 dias.

O aumento no módulo de elasticidade dos concretos contendo as substituições de 10 e 15% está relacionado as propriedades físicas encontradas no RCMG, como formato irregular dos grãos e maior massa específica do resíduo, podendo deixar o concreto mais denso e resistente a deformações.

4.1.7 Avaliação da Absorção Capilar

A substituição parcial do cimento por RCMG surtiu efeito na absorção de água capilar Figura 3.7. Ao longo do tempo os concretos C5RCMG,C10RCMG,C15RCMG obtiveram um comportamento semelhante De forma geral, ambos os concretos com substituições apresentaram um bom desempenho na taxa de absorção capilar em comparação ao concreto de referência. Como mostrado na figura abaixo

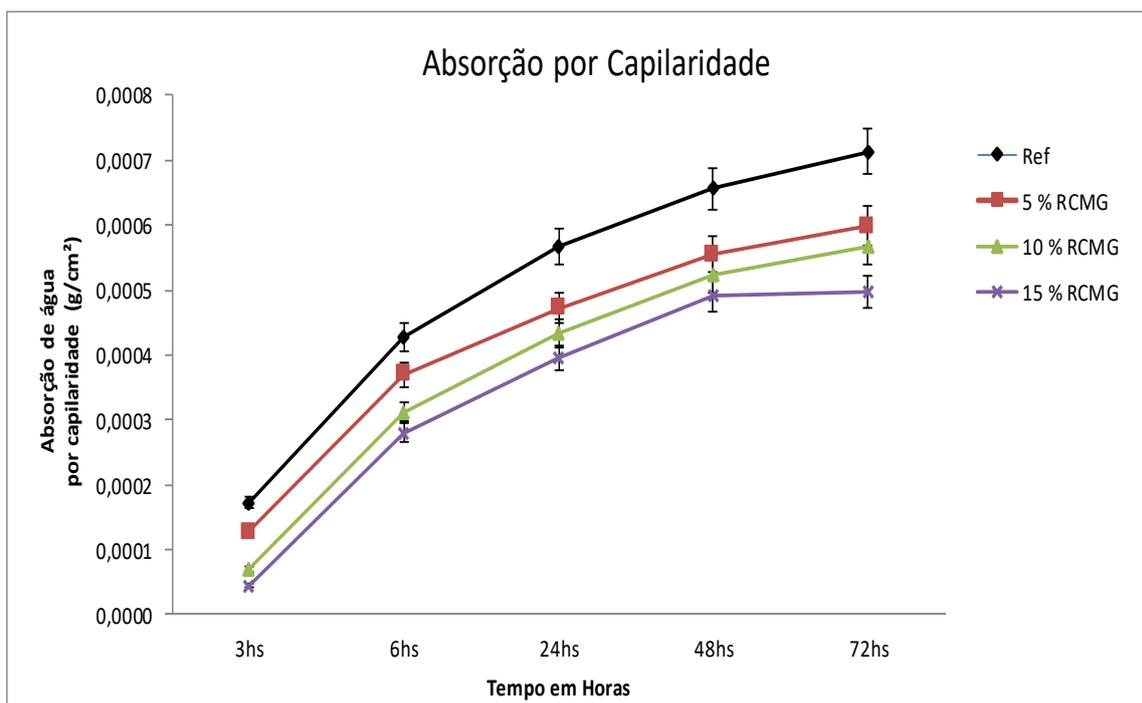


Figura 4.1.1 – Absorção por Capilaridade

Quanto às respostas da absorção de água por capilaridade, alguns fatores poderiam contribuir para esse resultado. Em primeiro lugar, a propriedade física da absorção capilar em concretos é dependente da distribuição e tamanho dos poros presentes nesses materiais (SMYL; GHASEMZADEH; POUR-GHAZ, 2016). Em segundo lugar, esse comportamento pode ser atribuído, pelo fator de empacotamento, um melhor empacotamento da mistura resulta em sistemas com menos porosidade (CARASEK, 2016). Em terceiro lugar, a fraca trabalhabilidade do concreto diminui a compactação e aumenta a porosidade do concreto. O aumento da porosidade diminui a densidade e eleva a taxa de absorção de água (GANESH PRABHU et al., 2014). Observou-se que ambas as amostras obtiveram uma redução na taxa de absorção capilar em relação ao concreto de referência, no entanto pode-se destacar uma significativa diminuição na absorção para os concretos com substituições

Para Shettima (2016) a diminuição relativa das capacidades de absorção deve-se provavelmente ao aumento do processo de hidratação e finura dos rejeitos que ocupam tanto os macros como os micros poros na mistura.

4.1.8 Avaliação da absorção por Imersão

A substituição parcial do cimento por RCMG surtiu efeito na absorção de água capilar (Figura 3.8). Ao longo de 28 dias os concretos C5RCMG, C10RCMG, C15RCMG obtiveram um comportamento semelhante. De forma geral, ambos os concretos com substituições apresentaram um bom desempenho na taxa de absorção capilar em comparação ao concreto de referência. Como mostrado na figura 3.8 abaixo

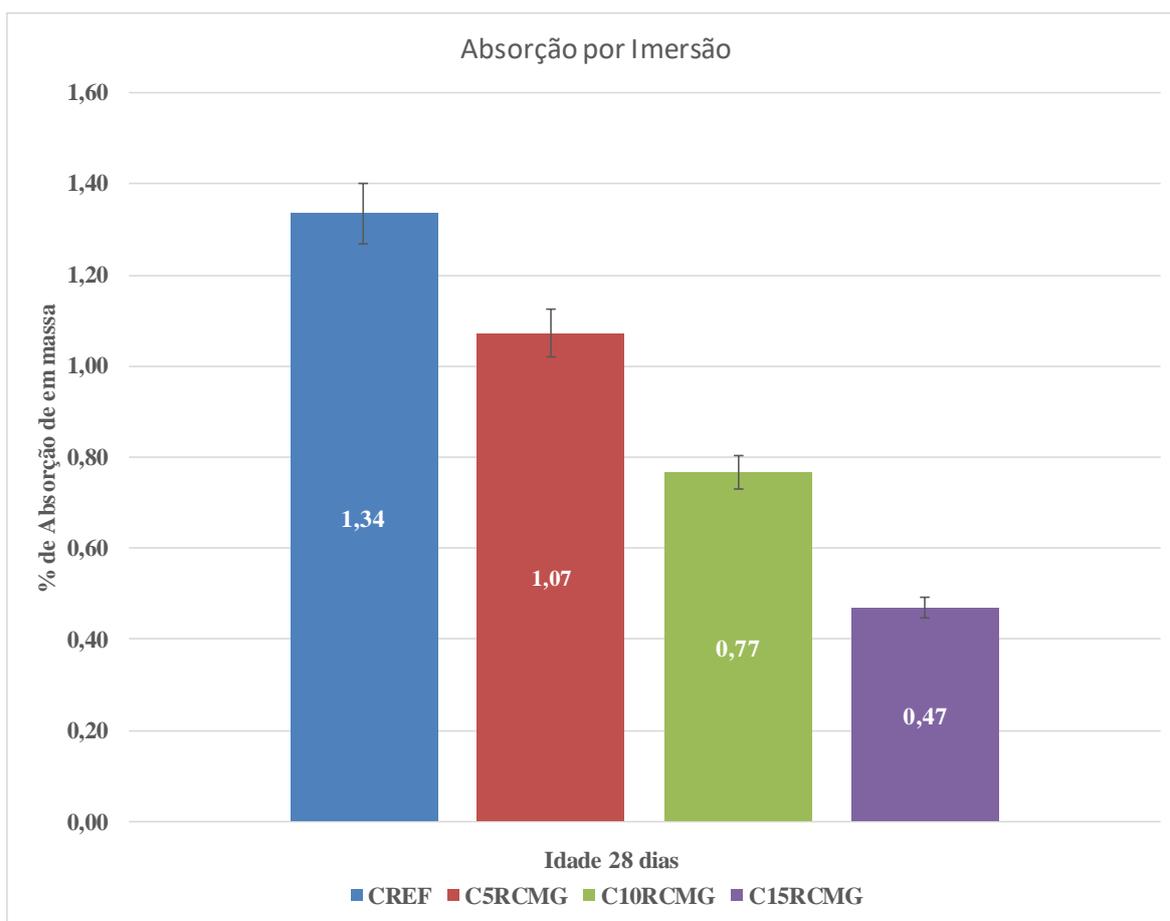


Figura 4.1.2 – Absorção por Imersão aos 28 dias

4.1.9 Análises em Microscopia Eletrônica de Varredura

As análises do MEV (microscópio eletrônico de varredura) permitiram observar a morfologia dos concretos produzidos com RCMG. Foi feitas análises comparativas entre amostras com menor e maior percentual de RCMG. Primeiramente realizou-se uma varredura num nível de observação de 100 μm buscando visualizar a imagem como um todo. Seguidamente, a varredura deu-se através do aumento do grau de observação, através da ampliação da lente para 10 μm .

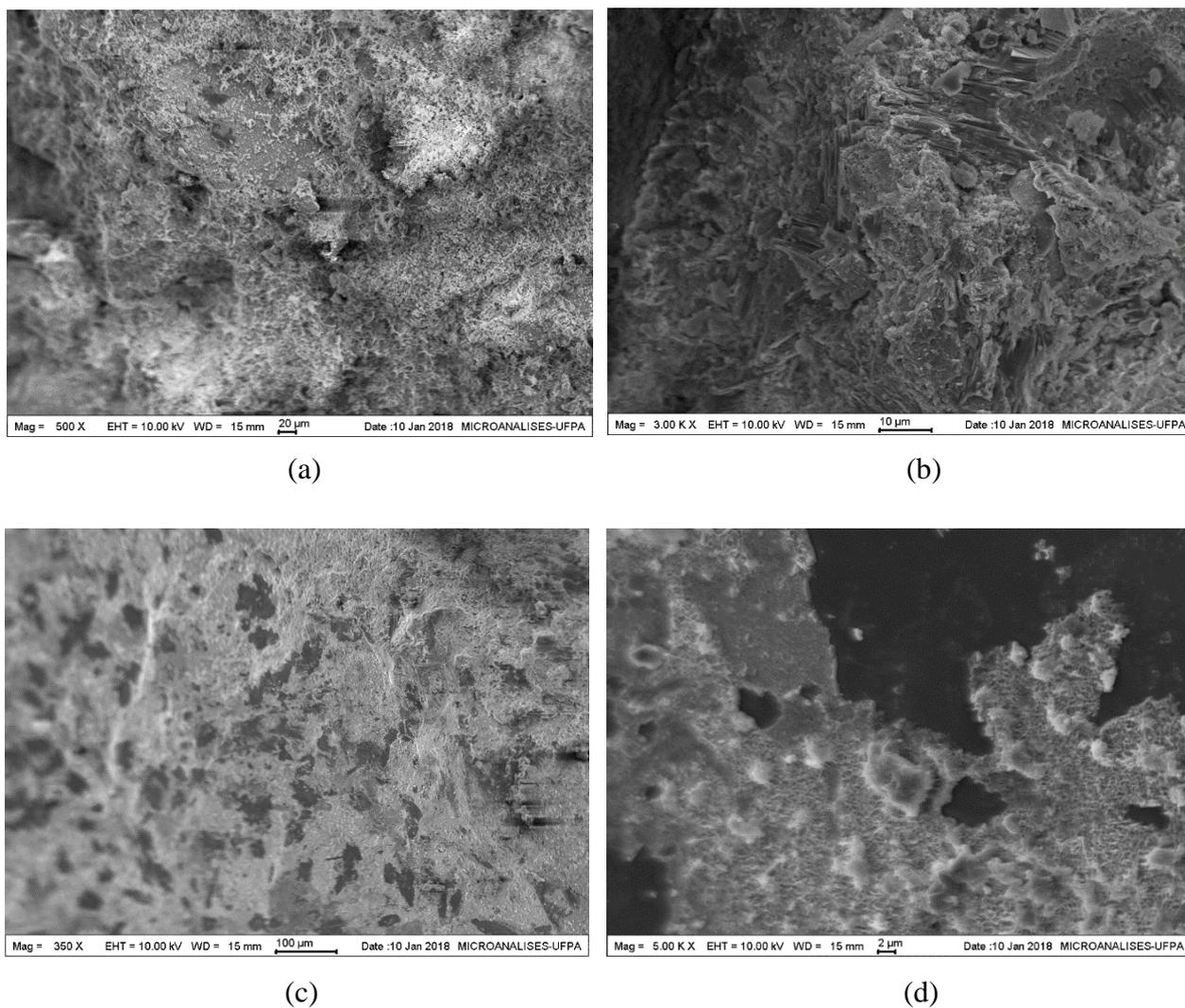


Figura 4.1.3 – MEV da amostra REF (a) ;C5RCMG (b);C10RCMG (c);C15RCMG (d)

Observou-se nas imagens que as amostras com 10 e 15% de substituições apresentam superfície mais compactadas e uma menor porosidade mostrando que houve um preenchimento um melhor dos vazios na zona de transição.

4.2 Conclusões e Sugestões

Esta pesquisa teve como objetivo geral estudar o aproveitamento do RCMG como material de construção civil, de acordo com os resultados em concordância com o que descreve a literatura, pode-se concluir que os concretos produzidos com resíduo de mármore e granito obtiveram resultados satisfatórios, sugerindo seu uso como material de construção civil.

Por meio da caracterização identificou-se que a soma dos teores médios de SiO_2 , Fe_2O_3 e Al_2O_3 encontrados na amostra de RCMG foi demais de 80% resultando em um valor bem acima para que um determinado material seja considerado pozolânico, resultado este corroborado pelo índice de atividade pozolânica do resíduo que se apresentou aquém do mínimo preconizado por norma. Apesar do RCMG apresentar grande potencial pozolânico, os ensaios mostraram que o mesmo encontra-se no estado cristalino, inviabilizando seu uso como material pozolânico, por esta razão optou-se o seu uso como material filler em substituição ao cimento devido suas propriedades físicas. Assim como, em relação a reação álcali-agregado, o resíduo se classificou como material potencialmente inócuo, portanto, possibilitando sua utilização como material filler.

A análise da substituição do cimento por RCMG usado como filler (5, 10, e 15%) gerou efeito positivo quando comparados com os concretos de referência, incrementando a resistência à compressão para os percentuais adotados, As análises de resistência à tração e módulo de elasticidade alcançaram resultados satisfatórios em todos os teores, principalmente para os concretos com 10 e 15% de substituição. Na análise de absorção capilar os concretos com substituições apresentaram variações significativas quando comparados aos concretos de referência

Conclui-se que o RCMG sob o ponto de vista do seu aproveitamento na construção civil, em função das análises realizadas, indicou o seu uso como proposta viável na forma de adição como filler. Portanto, viabilizando assim uma alternativa para a sua retirada dos pátios das marmorarias, pois o mesmo não tem um destino adequado, tornando-se um problema ambiental.

4.2.1 Sugestões

Considerando a enorme quantidade de resíduo descartados nas jazidas e marmorarias, é importante que se dê continuidade nos estudos, cujo objetivo é estudar o aproveitamento do RCMG como material de construção civil. Sendo assim, descreve-se a seguir algumas propostas de trabalhos para futuras pesquisas:

- Estudar o aproveitamento do resíduo como filler no cimento Portland, com teores diferentes.
- Estudar o aproveitamento do RCMG em substituição ao cimento nas argamassas em outros teores e analisar todas as propriedades mecânicas e de durabilidade;
- Estudar o aproveitamento do RCMG como filler na confecção de concretos em teores acima de 30% e analisar as propriedades mecânicas e de durabilidade.

5 Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado graúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. NBR NM 53. Rio de Janeiro. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”. NBR NM 51. Rio de Janeiro. 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. NBR NM 52. Rio de Janeiro. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados – Determinação da composição granulométrica. NBR NM 248. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados – Terminologias. NBR 9935. Rio de Janeiro. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados para concreto – Especificação NBR 7211. Rio de Janeiro. 2009.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland – Análise química – Método de arbitragem para determinação de dióxido de silício, óxido férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Le Chatelier. NBR 11582. Rio de Janeiro. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro. 2003.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos – Método de ensaio. NBR 5739. Rio de Janeiro. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. NBR 5738. Rio de Janeiro. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado – Determinação da massa unitária e dos espaços vazios. NBR NM 45. Rio de Janeiro. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. NBR 7215. Rio de Janeiro. 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland Comum. NBR 5732. Rio de Janeiro. 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. NBR 7222. Rio de Janeiro. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cal – Método de ensaio. NBR 5751. Rio de Janeiro. 2012.

BINICI, H.; SHAH, T.; AKSOGAN, O.; KAPLAN, H. Durability of concrete made with granite and marble as recycle aggregates. **Journal of Materials Processing Technology** , v. 208, p. 299–308, 2008.

BILGIN, N., YEPREM, H.A.; ARSLAN, S.; BILGIN, A.; GÜNAY, E.; MARŞOĞLU, M. Use of waste marble powder in brick industry. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 449–457, 2012.

CHIODI FILHO, C. **Situação e perspectivas brasileiras no setor de rochas ornamentais e de revestimento**. In: III CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAS ORNAMENTAIS E VI SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE. 2007, Natal. **Anais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008, p. 16-40.

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

DESTEFANI, A. Z.; HOLANDA, J. N. F. Utilização do planejamento experimental em rede simplex no estudo de resíduo de rocha ornamental como filler para obtenção de máxima compacidade. **Cerâmica**. v. 57, p. 491-498, 2011.

ERGÜN, Ali. Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v.25, p. 806-812, 2011.

FEDERAÇÃO DO COMÉRCIO DE BENS, SERVIÇOS E TURISMO DE SÃO PAULO (FECOMERCIO). **Sustentabilidade não é só sobre desmatamento e emissão de poluentes**. Disponível em:<<http://www.fecomercio.com.br/?option=comeventos&view=interna&Itemid=20&id=3363>> Acesso em jul 2017.

FREIRE, L. C., QUEIROZ, J. P. C., CARANASSIOS, A. **Utilização de resíduos oriundos do desdobramento de rochas ornamentais para confecção de blocos paisagísticos**. XVII Jornada de Iniciação Científica – CETEM, 2009.

GONÇALVES, J. P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para a produção de concretos**. Porto Alegre, 2000. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2000.

HELENE, P.R.L., TERZIAN, P., Manual de Dosagem e Controle de Concreto. Ed.Pini, São Paulo, 1992, 349p.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. São Paulo, 2000. 113p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, 2000.

KRSTULOVIĆ, P; KAMENK, N.; POPOVID, K. A new approach in evaluation of filler effect in cement I. Effect on strength and workability of mortar and concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 24, no. 4, p. 721-727,1994.

MACHADO R.B.; RIBEIRO, R.C.C.; ANDRADE F.V. **Utilização de rejeitos oriundos do corte de rochas ornamentais na correção da acidez e da adubação de solos tropicais**. XVI Jornada de Iniciação Científica – CETEM. p. 120-126. Rio de Janeiro, 2006.

MACHADO, F.B.; MOREIRA, C.A.; ZANARDO, A; ANDRE, A.C.; GODOY, A.M.; FERREIRA, J. A.; GALEMBECK, T.; NARDY, A.J.R.; ARTUR, A.C.; OLIVEIRA, M.A.F.de. **Atlas de Rochas**. [on-line]. ISBN: 85-89082-12-1. Disponível em <<http://www.rc.unesp.br/museudpm>> Acesso em maio 2017.

MAIA, Soraia Maria Carlos. **Estudo integrado geológico/tecnológico de rochas ornamentais: os granitos Flores e Jacarandá**, RN. 2004. Dissertação (Mestrado em geodinâmica). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2004.

MARÇAL, Rubens L.S.B. **Fabricação de vidros especiais a partir de resíduos da indústria de rochas ornamentais**. 2011, 79p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) Instituto Militar de Engenharia, IME - RJ, Rio de Janeiro, 2011.

MATTA, V. R. P. **Efeito da adição do resíduo de corte de mármore e granito (rcmg) nas propriedades das argamassas de cimento Portland.** TCC em Engenharia Civil, Universidade Federal da Bahia – UFBA, 2013.

MARTINEZ, Cláudia. HEIDER, Mathias. **Rochas ornamentais e de revestimentos.** DNPM: Sumário Mineral 2011.

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 argamassas. **Cerâmica**, v. 55, p. 263-270, 2009.

MOURA, Washington A.; GONÇALVES, Jardel P., LEITE, Roneison da Silva. **Utilização do resíduo de corte de mármore e granito em argamassas de revestimento e confecção de lajotas para piso.** Sitientibus, Feira de Santana, n.26, p.49-61, jan./jun. 2002.

MOREIRAS, Sergio Trajano Franco. **Estudo sobre o revestimento de fachadas de edifícios altos com placas de granitos ornamentais.** 2005. 80p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2005.

OLIVEIRA, C. N.; QUEIRÓZ, J.P.C.; RIBEIRO, R.C.C. **Aplicação de Resíduos Oriundos do Corte de Rochas Ornamentais na Produção de Cosméticos.** XVII Jornada de Iniciação Científica – CETEM. p. 123-129. Rio de Janeiro, 2007.

REIS, A.S.; TRISTÃO, F.A. **Análise de argamassas com resíduo de corte de rochas ornamentais.** In: 2º CONGRESSO NACIONAL DE ARGAMASSAS DE CONSTRUÇÃO, 2007, Lisboa. Anais eletrônicos. Disponível em: <http://www.apfac.pt/congresso2007/comunicacoes/Paper%2038_07.pdf>. Acesso em mar. 2017.

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 e Materiais. São Paulo, v. 8, p. 203-207, 2011.

RUSSO, Mário Luís Cabello. **Reciclagem de Resíduo Gerado na Extração de Quartzito**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2011.

SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA (SETEC)/
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO (MEC). **Rochas Ornamentais**. Brasília, 2007.

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

CALLISTER, W. D., *Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Abordagem Integrada*. John Wiley & Sons, Inc., 2005.

CAMPOS, H. K. T. *Curso: Modelo de gestão integrada dos resíduos sólidos urbanos. A geração de resíduos no Brasil e os problemas associados*. Brasília: DF, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000.

CAMPOS, J. O. **Reflexões sobre a gestão de resíduos industriais**. 2000. Disponível em: <http://www.ablp.org.br/residuos.html> Acesso em: 14 jan. 2017.

METHA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*. São Paulo: PINI, 1994.

METHA, P. K; MONTEIRO, P. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

METHA, P. K; MONTEIRO, P. **Concreto: Microestrutura, propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MONTEIRO, P. J. M. **Microstructure of concrete and its influence on the mechanical properties**. Berkeley, California, 1985. 153 p. Tese (Doutorado) – University of California, Berkeley.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. Tradução engenheiro Salvador E. Giamusso. 2º. edição, editora PINI, São Paulo, 1997.

NEVILLE, A. M. **Tecnologia do concreto** / A. M. Neville, J. J. Brooks: tradução:
Ruy Alberto Cremonini. – 2. Ed. – Porto Alegre: Bookman, 2013.

6 Apêndice

APÊNDICE A – Resultados da reação álcali agregado

Data	Idade (dias)	Amostra	Leitura (mm)	Expansão (%)	Expansão Média (%)
20/11/2017	X	X	Moldagem	X	X
07/11/2017	X	X	Desmoldagem	X	X
08/11/2017	1,0	Barra A	0,93	0,000	0,000
		Barra B	0,45	0,000	
		Barra C	0,35	0,000	
10/11/2017	2,0	Barra A	0,98	0,017	0,011
		Barra B	0,47	0,007	
		Barra C	0,37	0,007	
11/11/2017	3	Barra A	1,01	0,028	0,020
		Barra B	0,50	0,018	
		Barra C	0,39	0,014	
15/11/2017	7	Barra A	1,03	0,035	0,027
		Barra B	0,51	0,021	
		Barra C	0,42	0,025	
18/11/2017	10	Barra A	1,05	0,042	0,032
		Barra B	0,52	0,025	
		Barra C	0,43	0,028	
21/11/2017	13	Barra A	1,05	0,042	0,033
		Barra B	0,52	0,025	
		Barra C	0,44	0,032	
24/11/2017	16	Barra A	1,06	0,045	0,036
		Barra B	0,53	0,028	
		Barra C	0,45	0,035	
28/11/2017	20	Barra A	1,08	0,052	0,044350
		Barra B	0,56	0,039	
		Barra C	0,47	0,042	
30/11/2017	22	Barra A	1,07	0,049	0,044352
		Barra B	0,56	0,039	
		Barra C	0,48	0,046	
02/12/2017	24	Barra A	1,10	0,059	0,050186
		Barra B	0,57	0,042	
		Barra C	0,49	0,049	
08/12/2017	30	Barra A	1,12	0,066	0,058357
		Barra B	0,60	0,053	
		Barra C	0,51	0,056	
CLASSIFICAÇÃO			Potencialmente inócuo		

APÊNDICE B

Tabela B.1 – Resultados individuais de resistência à compressão para idade 7 dias.

CONCRETOS	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL - 7 Dias									
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	Media	Fck	DP	CV
CREF	24,58	23,87	22,08	24,86	22,27	22,74	23,4	21,34	1,25	5,86%
C5RCMG	19,98	21,88	23,47	21,82	22,32	22,48	21,99	19,64	1,43	7,27%
C10RCMG	20,2	21,2	21,17	21,43	21,48	22,02	21,25	20,35	0,55	2,68%
C15RCMG	24,86	24	21,72	21,23	22,73	24,26	23,13	20,24	1,75	8,66%

Tabela B.2 – Resultados individuais de resistência à compressão para idade 28 dias.

CONCRETOS	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL - 28 Dias									
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	Media	Fck	DP	CV
CREF	34,48	33,7	30,09	29,83	30,39	31,06	31,59	28,30	1,99	7,04%
C5RCMG	28,55	31,26	33,54	31,18	31,89	32,12	31,42	28,06	2,04	7,27%
C10RCMG	31,56	30,29	31,25	31,02	30,69	31,47	31,05	30,15	0,54	1,79%
C15RCMG	33,52	32,29	31,03	33,84	32,48	32,54	32,62	30,50	1,28	4,20%

Tabela B.3 – Resultados individuais de resistência à compressão para idade 60 dias.

CONCRETOS	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL - 60 Dias									
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	Media	Fck	DP	CV
CREF	35,16	34,37	30,69	30,48	30,96	31,47	32,19	28,82	2,04	7,07%
C5RCMG	29,69	32,51	34,78	32,43	33,16	33,4	32,66	29,23	2,08	7,13%
C10RCMG	32,98	31,65	32,65	32,41	32,07	32,88	32,44	31,51	0,57	1,79%
C15RCMG	34,96	33,67	32,36	35,28	33,87	33,93	34,01	31,81	1,33	4,19%

Tabela B.4 – Resultados individuais de resistência à compressão diametral para idade 7 dias.

CONCRETOS	COMPRESSÃO DIAMETRAL 7 Dias				
	CP1	CP2	CP3	Desvio Padrão	Média
CREF	1,87	1,77	1,48	0,20	1,71
C5RCMG	1,74	1,84	1,62	0,11	1,73
C10RCMG	1,74	1,69	1,80	0,05	1,74
C15RCMG	1,80	1,71	1,82	0,06	1,78

Tabela B.5 – Resultados individuais de resistência à compressão diametral para idade 28 dias.

CONCRETOS	DIAMETRAL 28 Dias				
	CP1	CP2	CP3	Desvio Padrão	Média
CREF	2,30	2,47	2,34	0,09	2,37
C5RCMG	3,07	3,02	3,07	0,03	3,05
C10RCMG	3,42	3,34	3,46	0,06	3,41
C15RCMG	3,48	3,47	3,49	0,01	3,48

Tabela B.6 – Resultados individuais de resistência à flexão para idade 28 dias.

CONCRETOS	RESISTÊNCIA A FLEXÃO 28 dias				
	VIGA 1	VIGA 2	VIGA 3	Desvio Padrão	Media (MPa)
CREF	4,31	4,05	3,92	0,20	4,09
C5RCMG	3,51	4,19	5,07	0,78	4,26
C10RCMG	4,03	4,48	4,45	0,25	4,32
C15RCMG	4,61	4,38	4,43	0,12	4,47

Tabela B.7 – Resultados individuais para o módulo de Elasticidade idade 28 dias.

CONCRETOS	MÓDULO DE ELÁSTICIDADE - 28 Dias				
	CP1	CP2	CP3	Desvio Padrão	Media
CREF	23,58	22,49	24,72	1,12	23,60
C5RCMG	23,44	23,91	26,05	1,39	24,47
C10RCMG	33,06	34,64	31,09	1,78	32,93
C15RCMG	35,37	32,92	32,33	1,61	33,54

Tabela B.8 – Resultados individuais para Absorção por Capilaridade idade 28 dias

CREF	ms	3hs	6hs	24hs	48hs	72hs
CPI	3,477	3,492	3,513	3,530	3,529	3,533
CPII	3,418	3,430	3,449	3,454	3,469	3,474
Média	3,448	3,461	3,481	3,492	3,499	3,504
Absorção (%)		0,0002	0,0004	0,0006	0,0007	0,0007

C5RCMG	ms	3hs	6hs	24hs	48hs	72hs
CPI	3,475	3,479	3,498	3,510	3,512	3,518
CPII	3,387	3,403	3,422	3,426	3,437	3,438
Média	3,431	3,441	3,460	3,468	3,4745	3,478
Absorção (%)		0,0001	0,0004	0,0005	0,0006	0,0006

C10RCMG	ms	3hs	6hs	24hs	48hs	72hs
CPI	3,365	3,360	3,384	3,398	3,40	3,407
CPII	3,452	3,468	3,482	3,487	3,499	3,499
Média	3,409	3,414	3,433	3,443	3,450	3,453
Absorção (%)		0,0001	0,0003	0,0004	0,0005	0,0006

C15RCMG	ms	3hs	6hs	24hs	48hs	72hs
CPI	3,345	3,356	3,379	3,392	3,395	3,396
CPII	3,445	3,468	3,482	3,487	3,499	3,499
Média	3,395	3,412	3,431	3,440	3,447	3,448
Absorção (%)		0,0000	0,0003	0,0004	0,0005	0,0005

Tabela B.9 – Resultados individuais para Absorção por Imersão idade 28 dias

CREF	ms	msat	mi
CP1	3,462	3,509	2,004
CP2	3,504	3,550	2,009
Média	3,483	3,530	2,0065
A %		1,34	
Indice de Vazios %		3,05	
C5RCMG	ms	msat	mi
CP1	3,481	3,519	2,018
CP2	3,513	3,55	2,025
Média	3,497	3,535	2,0215
A %		1,07	
Indice de Vazios %		2,48	
C10RCMG	ms	msat	mi
CP1	3,503	3,531	2,035
CP2	3,539	3,565	2,037
Média	3,521	3,548	2,036
A %		0,77	
Indice de Vazios %		1,79	
C15RCMG	ms	msat	mi
CP1	3,510	3,512	2,045
CP2	3,529	3,56	2,054
Média	3,5195	3,536	2,0495
A %		0,47	
Indice de Vazios %		1,11	