

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE CORTE DE
GRANITO (RCG) COMO ADIÇÃO PARA
PRODUÇÃO DE CONCRETOS

JARDEL PEREIRA GONÇALVES

ORIENTADORES: Prof^a. Dr^a. Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Prof. Dr. Washington Almeida Moura

Porto Alegre, Dezembro/2000

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE CORTE DE
GRANITO (RCG) COMO ADIÇÃO PARA
PRODUÇÃO DE CONCRETOS

JARDEL PEREIRA GONÇALVES

Dissertação apresentada ao corpo docente do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do Grau de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL.

Porto Alegre, Dezembro/2000

Esta dissertação de Mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL e aprovada em sua forma final pelos orientadores conjuntos e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof^a Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Dr^a pela Universidade de São Paulo
Orientadora

Prof. Washington Almeida Moura
Dr. Pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientador conjunto

Prof. Francisco de Paula Simões Lopes Gastal
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

BANCA EXAMINADORA:

Ruy Alberto Cremonini
Dr. pela Universidade de São Paulo

João Luiz Calmon Nogueira da Gama
Dr. Universitat Politècnica de Catalunya

Maria Luiza Cañas Martins
Dra. pela Universidade Politécnica de Madrid

AGRADECIMENTOS

À FEP – Fundação Escola Politécnica da Bahia, pelo grande apoio financeiro.

Ao grande amigo e orientador Washington Almeida Moura, pela amizade, pelas orientações e discussões sempre produtivas.

À orientadora Prof.^a Denise Dal Molin, pela valiosa orientação.

Ao LABOTEC – Laboratórios de Tecnologia da UEFS pelo empenho e dedicação nos ensaios, sob a coordenação da Eng.^a Wilma Cristina, seguidos de Ruth, André, Virgílio, Gil e Sr. Milton.

Ao grande amigo Freitas pelo apoio, discussões e companheirismo.

Ao auxiliar de pesquisa, Rôneison, pelo empenho na realização dos ensaios.

Aos funcionários do Colegiado de Pós-Graduação, pela atenção.

À Cimentos Votorantim, pela doação do cimento, representada pelo Eng^o. Eduardo Godoy.

À ilustre Mônica Batista pelo apoio na realização dos ensaios de ciclagem.

À PEVAL Ltda. pelo fornecimento de dados e do resíduo.

À Coordenação de Mineração da Bahia, representada pelo Sr. Adalberto Ribeiro, pelas valiosas informações.

À Morena por ter compartilhado de todos momentos do trabalho.

E a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a elaboração deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS.....	xi
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 TEMA DA PESQUISA	3
1.2 OBJETIVOS	3
1.2.1 Objetivo Geral	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
1.3 HIPÓTESES GERAIS E ESPECÍFICAS.....	3
1.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	4
1.5 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	4
CAPÍTULO 2 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E RECICLAGEM DE RESÍDUOS.....	6
2.1 CONSUMO DE MATÉRIAS-PRIMAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	6
2.2 APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL	8
2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS.....	11
2.4 PARÂMETROS E METODOLOGIA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL.....	12
CAPÍTULO 3 RESÍDUO DE CORTE DE GRANITO – RCG	16
3.1 RESERVAS DE GRANITO E PANORAMA DO SETOR DE ROCHAS ORNAMENTAIS	16
3.2 DESDOBRAMENTOS DOS BLOCOS DE GRANITO	19
3.2.1 Pesquisa e Definição dos Locais de Extração dos Blocos.....	19

3.2.2 A Extração dos Blocos das Pedreiras	19
3.2.3 Transporte dos Blocos para a Beneficiadora	21
3.2.4 Carregamento e Preparação do Tear	22
3.2.5 Desdobramento dos Blocos	22
3.2.6 Descarregamento e Acabamento das Chapas	23
3.2.7 Armazenamento e Comercialização.....	23
3.3 VOLUME DO RESÍDUO DE RCG GERADO	24
3.4 HISTÓRICO SOBRE OS ESTUDOS COM RCG	26
CAPÍTULO 4 EFEITO DAS ADIÇÕES MINERAIS EM CONCRETOS.....	29
4.1 ADIÇÕES MINERAIS	30
4.2 EFEITO DAS ADIÇÕES COM ATIVIDADE POZOLÂNICA NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO	32
4.2.1 Efeito nas Propriedades do Concreto Fresco.....	33
4.2.1.1 Trabalhabilidade	33
4.2.1.2 Demanda de água	34
4.2.1.3 Hidratação	35
4.2.1.4 Tempos de pega e cura.....	36
4.2.2 Efeito nas Propriedades do Concreto no Estado Endurecido.....	37
4.2.2.1 Resistência à compressão axial e resistência à tração	38
4.3 EFEITO DAS ADIÇÕES SEM ATIVIDADE POZOLÂNICA NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO.....	41
4.3.1 Efeito nas Propriedades do Concreto no Estado Fresco.....	41
4.3.2 Efeito nas Propriedades do Concreto no Estado Endurecido.....	43
4.4 PARÂMETROS PARA AVALIAÇÃO DO USO DO RCG COMO ADIÇÃO EM CONCRETOS.....	45
4.4.1 Para o Concreto Fresco	45
4.4.2 Para o Concreto Endurecido	45

CAPÍTULO 5 PROGRAMA EXPERIMENTAL	49
5.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE CORTE DE GRANITO (RCG)	49
5.1.1 Características Químicas	50
5.1.2 Características Físicas	51
5.1.3 Avaliação do Risco Ambiental do RCG	54
5.1.4 Avaliação do Potencial de Oxidação	55
5.1.4.1 Avaliação do potencial de oxidação do RCG por difração de raios X.....	55
5.1.4.2 Avaliação do potencial de oxidação do RCG por ciclos de imersão e secagem	56
5.1.4.2.1 Materiais utilizados	56
5.1.4.2.2 Produção da argamassas e Ensaio de Imersão e secagem.....	58
5.2 AVALIAÇÃO DOS CONCRETOS COM ADIÇÃO DE RCG	62
5.2.1 Materiais Utilizados	62
5.2.1.1 Cimento	62
5.2.1.2 Agregados	62
5.2.1.3 Água	63
5.2.1.4 Adição.....	63
5.3 DOSAGEM DOS CONCRETOS.....	64
5.4 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO.....	66
5.5 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO	67
5.5.1 Fatores Avaliados	67
5.5.2 Resistência à Compressão Axial.....	68
5.5.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral	74
5.5.4 Resistência à Tração na Flexão.....	81
5.5.5 Absorção por Sucção Capilar	86

5.5.6 Porosidade Efetiva	99
5.5.7 Absorção por Imersão.....	103
CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES	109
6.1 COM RELAÇÃO ÀS CARACTERÍSTICAS DO RCG.....	109
6.2 COM RELAÇÃO ÀS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO	110
6.3 COM RELAÇÃO ÀS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO	110
6.3.1 Propriedades Mecânicas.....	110
6.3.2 Parâmetros de Durabilidade	111
6.3.2.1 Absorção por sucção capilar	111
6.3.2.2 Absorção por imersão.....	111
6.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	112
CAPÍTULO 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Grau de Impacto de diferentes tendências nas atividades da construção civil (BERNTEIN <i>apud</i> JOHN, 1998).....	07
Figura 2.2 Componentes da análise do ciclo de vida (SHEN <i>apud</i> KIPERSTOK et al., 1999).....	15
Figura 3.1 Produção mundial de Rochas ornamentais em 1995, Stone 96 – World Marketing Handbook <i>apud</i> Rochas Ornamentais – Informações Estatística 1986-1995, Instituto Geológico e Mineiro, Ministério da Economia, 1995.....	17
Figura 3.2 Mapa da distribuição dos granitos na Bahia, (CBPM – Companhia Baiana de Produção Mineral, (http://www.cbpm.com.br/index.html , 2000).....	18
Figura 3.3 Perfuratrix utilizada para corte dos blocos.....	20
Figura 3.4 Resíduo gerado na lavra das rochas.....	21
Figura 3.5 Armazenamento dos blocos nos pátios das serrarias	21
Figura. 3.6 Placas polidas e armazenadas para comercialização	23
Figura. 3.7 Operações realizadas na industrialização de rochas ornamentais. NITES <i>apud</i> SILVA (1998), adaptado com a geração dos resíduos	24
Figura 5.1 Difratoograma de uma amostra de RCG	51
Figura 5.2 MEV por elétron secundário: grãos de RCG agrupados. Aumento de 100x	53
Figura 5.3 MEV por elétron secundário: grãos de RCG separados. Aumento de 5000x	53
Figura 5.4 Difração de raios X de amostras de RCG: (a) em março/2000 e (b) julho/2000	55
Figura 5.5 Esquema do painel de lâmpadas utilizado para secagem dos corpos de prova	59
Figura 5.6 Ganho de massa das argamassas no ensaio de secagem e imersão em solução contendo cloretos	61

Figura 5.7 Curvas de comportamento dos concretos com e sem adição de RCG	65
Figura 5.8 Resistência à compressão dos concretos aos (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 63 dias de idade	70
Figura 5.9 Resistência à compressão axial dos concretos em função: (a) teor de adição, (b) relação a/c e (c) idade	73
Figura 5.10 Resistência à Tração por Compressão Diametral dos concretos com (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 63 dias de idade	77
Figura 5.11 Resistência à tração por compressão diametral dos concretos em função: (a) teor de adição, (b) relação a/c e (c) idade	79
Figura 5.12 Resistência à tração por compressão diametral dos concretos em função da interação entre o teor de adição de RCG e a idade	80
Figura 5.13 Resistência à tração na flexão aos 28 dias, dos concretos produzidos	82
Figura 5.14 Resistência à tração na flexão em função da relação a/c dos concretos produzidos	83
Figura 5.15 Microscopia Eletrônica de varredura por elétrons secundários (3500x) dos concretos produzidos: (a) Referência, (b) 10% de adição de RCG, (c) 20% de adição de RCG.....	85
Figura 5.16 Desenho esquemático do corpo-de-prova utilizado no ensaio de absorção por sucção capilar (MOURA, 2000)	87
Figura 5.17 Ganho de massa em função da \sqrt{t} do CP 01 para a/c = 0,40	88
Figura 5.18 Ganho de massa em função da \sqrt{t} do CP 02 para a/c = 0,40	89
Figura 5.19 Ganho de massa em função da \sqrt{t} do CP 01 para a/c = 0,55	89
Figura 5.20 Ganho de massa em função da \sqrt{t} do CP 02 para a/c = 0,55	90
Figura 5.21 Ganho de massa em função da \sqrt{t} do CP 01 para a/c = 0,70	90
Figura 5.22 Ganho de massa em função da \sqrt{t} do CP 02 para a/c = 0,70	91
Figura 5.23 Taxa de absorção dos concretos em função (a) teor de adição de RCG, (b) relação a/c.....	94

Figura 5.24 Influência da interação entre a relação a/c e o teor de adição na taxa de absorção dos concretos	95
Figura 5.25 Resistência capilar dos concretos em função (a) teor de adição de RCG, (b) relação a/c.....	98
Figura 5.26 Influência da interação entre o teor de adição de RCG e relação a/c na resistência capilar dos concretos	98
Figura 5.27 Porosidade efetiva potencial dos concretos em função (a) teor de adição de RCG, (b) relação a/c.....	102
Figura 5.28 Influência da interação entre o teor de adição de RCG e relação a/c na porosidade efetiva potencial dos concretos	102
Figura 5.29 Absorção por imersão dos concretos em função (a) teor de adição de RCG, (b) relação a/c.....	105
Figura 5.30 Influência da interação entre o teor de adição e a relação a/c na absorção por imersão dos concretos	105
Figura 5.31 Índice de vazios dos concretos em função (a) teor de adição de RCG, (b) relação a/c e (c) interação entre teor de adição e relação a/c.....	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 Análise química do RCG utilizado no estudo e resultados encontrados por outros pesquisadores	50
Tabela 5.2 Diâmetro médio do RCG por da Granulometria laser, em função do tempo de moagem	52
Tabela 5.3 Resultados do ensaio de Lixiviação (NBR 10005, ABNT - 1987) e solubilização (NBR 10006, ABNT - 1987) do RCG	54
Tabela 5.4 Composição química, resistência e índices físicos do cimento CP I	57
Tabela 5.5 Caracterização do agregado miúdo usado na produção das argamassas	58
Tabela 5.6 Traços de argamassa com respectivas relação a/c e consistência	58
Tabela 5.7 Resistência à tração na flexão das argamassas com e sem adição de RCG	60
Tabela 5.8 Caracterização do agregado miúdo usado na produção dos concretos.....	62
Tabela 5.9 Caracterização do agregado graúdo usado na produção dos concretos	63
Tabela 5.10 Proporcionamento (em massa) e parâmetros de dosagem dos concretos executados	64
Tabela 5.11 Abatimentos dos concretos executados	66
Tabela 5.12 Resumo do Programa experimental em concretos	68
Tabela 5.13 Resistência à Compressão Axial dos concretos	69
Tabela 5.14 Resultados da ANOVA em relação a resistência à compressão axial dos concretos	71
Tabela 5.15 Resultados de resistência à Tração por Compressão Diametral dos concretos.....	75

Tabela 5.16 Resultados da ANOVA em relação a resistência à tração por compressão diametral dos concretos	78
Tabela 5.17 Resultados de resistência à Tração na Flexão dos concretos produzidos	82
Tabela 5.18 Resultados da ANOVA em relação a resistência à tração na flexão	83
Tabela 5.19 Taxa de absorção e resistências capilares dos concretos produzidos com e sem adição de RCG	92
Tabela 5.20 Taxa de absorção e resistências capilares potenciais dos concretos produzidos com e sem adição de RCG	93
Tabela 5.21 Resultados da ANOVA em relação à taxa de absorção	93
Tabela 5.22 Resultados da ANOVA em relação à resistência capilar	97
Tabela 5.23 Resultados dos acréscimo de massa de cada corpo-de-prova e suas respectivas porosidades efetivas	100
Tabela 5.24 Resultados da ANOVA em relação à porosidade efetiva	101
Tabela 5.25 Resultados do ensaio de absorção por imersão dos concretos estudados	103
Tabela 5.26 Resultados da ANOVA do ensaio de absorção por imersão dos concretos avaliados	104
Tabela 5.27 Resultados da ANOVA do ensaio de absorção por imersão dos concretos avaliados, enfocando o índice de vazios	106

UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE CORTE DE GRANITO (RCG), COMO ADIÇÃO, PARA PRODUÇÃO DE CONCRETOS

Jardel Pereira Gonçalves

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 granitos) é resultante do processo de serragem de blocos de rochas em placas, num equipamento denominado tear. Na serragem, cerca de 25% a 30% do bloco é transformado em pó, que na maioria dos casos, é depositado nos pátios das empresas. No Brasil, a quantidade estimada de geração deste resíduo é de 165000 toneladas por ano, sendo o Espírito Santo, Bahia, Ceará e Paraíba os estados que geram maior volume. Neste trabalho foi realizado a caracterização física, química e de risco ambiental do resíduo de corte de granito (RCG), bem como a avaliação do potencial de oxidação do Fe contido. Foi também realizada a viabilidade técnica do seu uso em concretos, com adição em teores de 10% e 20% em relação à massa de cimento. Para os concretos produzidos, foram avaliadas as propriedades do concreto endurecido (resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e resistência à tração na flexão), e parâmetros de durabilidade (absorção por sucção capilar e absorção por imersão). A análise dos resultados permite concluir que o resíduo de corte de granito não apresenta riscos ambientais, que sua utilização como adição em concretos é viável tecnicamente, e que 10% de adição é o teor que apresenta melhor desempenho.

USE OF THE GRANITE CUT RESIDUE (GCR) AS ADDITION IN THE PRODUCTION OF CONCRETES

Jardel Pereira Gonçalves

ABSTRACT

Most part of the manufacturing processes is generating sources of residues, in the form of gases, liquids or solids, almost always contributing to the environmental degradation. The use of residues and industrial sub-products in the building site, seems to be an excellent alternative to decrease the impact caused, as well a larger environmental contribution for the maintainable development, considering that the building site is the section of the technological activity that consumes a great volume of natural resources and it seems to be one of the most alternative to absorb the solid residues. The residue generated from the improvement of rocks (residue of cut of granites) is a resulting of the process of sawdust blocks of rocks into plates, in equipment called loom. In the sawdust about 25% to 30% of the block is transformed into powder, which in majority of the cases, are deposited at companies' paths. In Brazil the dear amount of generation of this residue is about 165000 tons a year, and has Espírito Santo, Bahia, Ceará and Paraíba states as the larger generate volume. In this work a physical and chemical characterization was done, as well as an environmental risk of the granite cut residue (RCG) and of the potential of oxidation of the Fe contained. Thus, It was also done a study of the technical viability of its uses in concretes, with addition tenors of 10% and 20%, compare to cement mass. To the produced concretes, the properties of the hardened concrete were evaluated (compressive strength, flexural and split tensile strength), and durability parameters (absorption by capillary suction and absorption by immersion). The analysis of the results allows concluding that the residue of granite cut doesn't represent an environmental risk, that using it, as concrete's addition is technically feasible and which 10% of addition is the tenor that presents better acting.

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

Grande parte dos processos com atividade econômica atualmente são fontes geradoras de resíduos, na forma de gases, líquidos ou sólidos, causando grande degradação ambiental, não contribuindo para um desenvolvimento sustentável. O desenvolvimento sustentável pode ser definido como uma forma de desenvolvimento econômico que *“emprega recursos naturais e o meio ambiente não apenas em benefício do presente, mas também das gerações futuras”* (SJÖSTROM *apud* JOHN, 1998). Aliado ao desenvolvimento sustentável, encontram-se as exigências para organização ambiental da série de normas ISO 14000, as normas estaduais e federais com estabelecimento de limites máximos para emissões atmosféricas e tratamentos de efluentes, procedimentos para disposição de resíduos em aterros e incineração.

A construção civil é um dos maiores consumidores de matérias-primas naturais. Estima-se que consome entre 20 a 50% do total de recursos naturais consumidos pela sociedade (SJÖSTROM *apud* JOHN, 1998). No Brasil, o consumo estimado de agregados naturais, somente na produção de concretos e argamassas, é de aproximadamente 220 milhões de toneladas (JOHN, 2000). SMOLCZYK *apud* JOHN (1995) afirma que a produção de 1 tonelada de cimento implica a mineração de 1,5 tonelada de matéria-prima, principalmente argila e calcário.

Segundo o ENBRI (European Network of Building Research Institute), a construção civil consome cerca de 4,5% do total de energia consumido no planeta sendo, 84% na fase de produção destes materiais (JOHN, 1998).

O setor da Construção Civil, além de consumir grandes quantidades de recursos naturais não renováveis, possui alto consumo, é gerador de poluição (para cada tonelada de clínquer produzido mais de uma tonelada de CO₂ é gerada (BILODEAU e MALHOTRA, 2000)).

O mercado da construção civil se apresenta como uma das mais eficazes alternativas para consumir materiais reciclados, pois a atividade da construção é realizada em qualquer região, com a ampliação cada vez maior do ambiente construído, o que permitirá reduzir os custos de transporte. Além disso, grande parte dos componentes necessários à produção de edificações podem ser produzidos sem grande sofisticação técnica, (JOHN, 1996).

A reciclagem também pode contribuir bastante com a diminuição das áreas destinadas à deposição e redução destas despesas.

A incorporação de resíduos na produção de materiais pode reduzir o consumo de energia para a produção do mesmo produto sem resíduos, e pode, dependendo de onde esteja localizado o resíduo e seu mercado consumidor potencial, reduzir distâncias de transporte e contribuir para a redução da poluição gerada.

Na Construção Civil, as rochas ornamentais (granito e mármore) são bastante empregadas em edificações (revestimento, pavimentações, entre outros). Na Bahia, o setor de rochas ornamentais conta com 67 empresas, detentoras de 122 jazidas, sendo que das 69 em operação, apenas 33 são de granito. Das 67 empresas, 22 possuem capacidade de produzir chapas serradas e 11 estão em plena atividade, de acordo com CADASTRO DOS PRODUTORES DE ROCHAS ORNAMENTAIS BAHIA-BRASIL (1999).

A produção de rochas ornamentais (mármore e granitos), na maioria das empresas brasileiras, é feita a partir da serragem, em chapas, de grandes blocos de pedra, em equipamentos chamados teares. A Bahia possui atualmente 45 teares em atividade plena. Durante a serragem gera-se uma grande quantidade de resíduo, que pode ser apenas de mármore, apenas de granito ou mistura de ambos. No Brasil, gera-se cerca de 165000 toneladas de resíduo de corte de granito por ano. Na Bahia, com base em dados de 1996, produz-se cerca de 15000 t/ano deste resíduo.

Levando em consideração a grande quantidade de resíduo gerada e tentando contribuir para o desenvolvimento sustentável, o aproveitamento de resíduo de corte de granito na construção civil, alguns pesquisadores vêm estudando na produção de argamassas (CALMON *et al.*, 1997), tijolos cerâmicos (NEVES *et al.*, 1999) e peças cerâmicas (LIMA FILHO *et al.*, 2000 - b).

Segundo informações fornecidas pelas empresas do setor, na Itália já há uma utilização do RCG em confecção de placas prensadas para pavimentação. Aqui no Brasil, além dos estudos supracitados, há também a utilização das sobras dos blocos, chamada de costaneira, em pavimentação e paisagismo.

Neste contexto, devido ao grande volume de resíduos de corte de granito gerado e ainda não consumido, este trabalho visa avaliar a viabilidade técnica da

sua utilização como adição em concretos. A definição do uso do RCG, suas características físicas, químicas e de risco ambiental, também serão investigadas neste trabalho.

1.1 TEMA DA PESQUISA

O trabalho abordará a utilização de resíduos resultantes da serragem de blocos de granitos, como adição, para a produção de concretos. Este tema encontra-se ligado à Engenharia Civil e Materiais de Construção, além de possuir relações com a área ambiental e resistência dos materiais.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho possui, além do objetivo geral, objetivos específicos, como seguem abaixo:

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade técnica da utilização do resíduo de corte de granito na construção civil como adição em concretos.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para alcançar com êxito o objetivo geral têm-se os seguintes objetivos específicos:

- a) caracterizar química e fisicamente o resíduo;
- b) avaliar a possibilidade de riscos ambientais do RCG (lixiviação, solubilidade);
- c) avaliar o potencial de oxidação do Fe contido no RCG.
- d) determinar o teor ótimo de adição do RCG em concretos;
- e) determinar as características mecânicas (resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e resistência à tração na flexão) e de durabilidade (absortividade e absorção por imersão) dos concretos produzidos;

1.3 HIPÓTESES GERAIS E ESPECÍFICAS

A hipótese principal deste trabalho de pesquisa é que a utilização do RCG como adição para a fabricação de concretos é viável tecnicamente.

Como hipóteses secundárias, têm-se:

- a) concretos produzidos com adição de RCG não apresentam riscos ambientais.
- b) concretos confeccionados com RCG possuem desempenho semelhante ao dos concretos convencionais.
- c) existe um teor ótimo a ser adicionado do RCG aos concretos para um melhor desempenho de suas propriedades mecânicas e de durabilidade.

1.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Este estudo apresentou algumas limitações, como segue:

- utilização do resíduo de corte de granito proveniente de apenas uma empresa geradora;
- dificuldade na realização de outros ensaios para avaliação da durabilidade dos concretos com adição de RCG.

1.5 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação estará organizada da seguinte forma:

No Capítulo 1, são apresentadas as questões gerais do aproveitamento de resíduos sólidos na Construção Civil, justificando a relevância do tema. São também apresentados o objetivo geral e os específicos, as hipóteses gerais e específicas e estrutura da dissertação.

No Capítulo 2, discutem-se aspectos relacionados com o desenvolvimento sustentável, consumo de matérias-primas na Construção Civil, formas de minimização da quantidade de resíduos gerada, alternativas de reaproveitamento e da reciclagem dos resíduos sólidos na Construção Civil.

No Capítulo 3, são abordadas questões relativas ao RCG (Resíduo de Corte de Granito), produção mundial de rochas ornamentais, processo de desdobramento para a produção de rochas ornamentais, processo de geração do resíduo, quantidade do resíduo gerada no Brasil, Bahia e Espírito Santo, bem como o estado da arte sobre os estudos realizados e/ou em andamento com o resíduo estudado.

No Capítulo 4, é focado a influência das adições no concreto. Tanto o concreto no estado fresco (coesão, segregação, hidratação) quanto no estado endurecido (resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão, absorvidade, entre outros). Serão

discutidas as adições com atividade pozolânica, como a sílica ativa, cinza volante, escória de alto forno, metacaulim, escória de cobre, e sem atividade pozolânica, atuando como fíler, como o pó de quartzo, fíler calcáreo e o *carbon black*.

No Capítulo 5, apresenta-se e detalha-se o programa experimental, materiais utilizados e ensaios realizados, resultados encontrados bem como as análises e discussões dos resultados obtidos.

O Capítulo 6 é dedicado às conclusões sobre a influência do RCG como adição em concretos, com base nos resultados do programa experimental realizado.

CAPÍTULO 2 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E RECICLAGEM DE RESÍDUOS

Neste capítulo, são abordados aspectos relacionados ao desenvolvimento sustentável, consumo de matérias-primas, formas de diminuição da quantidade de resíduo gerada e as alternativas de aproveitamento. Dentre as alternativas, a reciclagem apresenta muitas vantagens mas, para sua implementação, é necessário verificar parâmetros e seguir uma metodologia para que os produtos desenvolvidos tenham um bom desempenho nas aplicações determinadas.

2.1 CONSUMO DE MATÉRIAS-PRIMAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Na Conferência sobre Desenvolvimento e Meio Ambiente da Nações Unidas (Rio 92) é consolidada, através da AGENDA 21, a visão do desenvolvimento sustentável, *de maneira a garantir para as gerações futuras iguais condições de desenvolvimento - a igualdade entre gerações - mas, também uma maior equidade no acesso aos benefícios do desenvolvimento - a igualdade intrageração* (LIDDLE, ONU *apud* JOHN 2000).

Segundo PENTTALLA (1997), o princípio do desenvolvimento sustentável é uma melhor distribuição dos recursos econômicos da humanidade, tendo uma preocupação com a preservação da natureza. Os processos de produção devem economizar energia e não gerar sub-produtos perigosos, que podem por em risco a natureza e o ser humano.

O desenvolvimento sustentável pode ser definido ainda, como aquele que *"permite atender às necessidades básicas de toda a população e garante a todos a oportunidade de satisfazer suas aspirações para uma vida melhor sem, no entanto, comprometer a habilidade das gerações futuras em atenderem as suas próprias necessidades"* (CHEN e CHAMBERS *apud* JOHN 2000).

Porém, para atender às necessidades básicas, é preciso um nível de desenvolvimento, acompanhado pelo avanço das tecnologias, avanços estes que podem gerar grandes impactos ambientais. Neste sentido, JANSSEN e VAN DER BERGH *apud* JOHN (2000) abordam sobre a *"desvinculação"* entre o desenvolvimento sustentável e os impactos ambientais, através da *"desmaterialização"* da produção, o que quer dizer, redução do consumo de materiais e matérias primas naturais para a produção de um mesmo bem, redução

do consumo de energia empregada e redução da poluição gerada. Como exemplo básico encontram-se algumas indústrias cimenteiras, grandes consumidoras de recursos naturais, energia e geradoras de poluição, em que para produção de 1 tonelada de cimento é gerada 1 tonelada de CO₂ aproximadamente (BILODEAU e MALHOTRA, 2000). Atualmente, estas indústrias estão utilizando subprodutos na produção do cimento, diminuindo o consumo de matéria-prima. Esta produção é feita com a técnica do co-processamento reduzindo o consumo de energia e diminuindo a emissão de CO₂ no meio ambiente, contribuindo para um maior desenvolvimento sustentável e economia.

BILODEAU e MALHOTRA (2000) enfatizam que, para a Engenharia Civil, a concepção de desenvolvimento sustentável envolve o uso e produção de materiais de elevado desempenho a custos razoáveis, com o menor impacto ambiental possível.

A Civil Engineering Research Foundation (CERF), entidade dedicada a promover a modernização da construção civil dos Estados Unidos, realizou uma pesquisa entre 1500 construtores, projetistas e pesquisadores de todo o mundo, enfocando as tendências para o futuro do setor. A “questão ambiental” foi considerada a segunda mais importante tendência para o futuro, conforme se observa na figura 2.1.

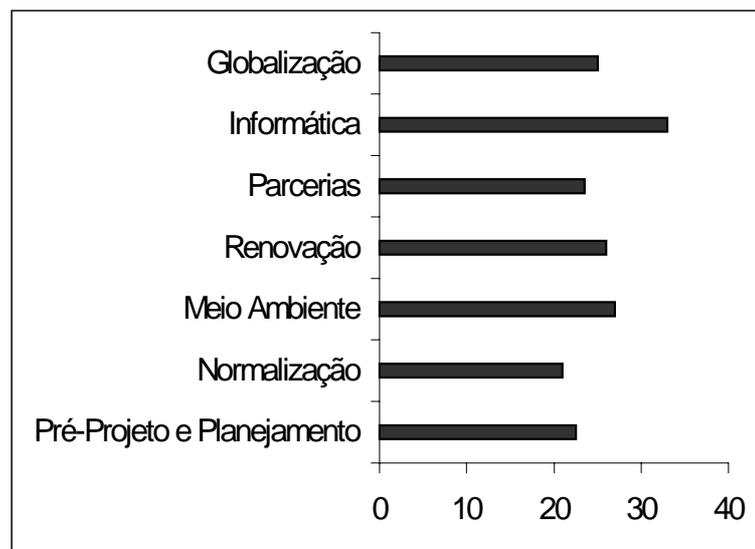


Figura 2.1 Grau de impacto de diferentes tendências nas atividades da construção civil (BERNTEIN *apud* JOHN, 1999).

Um outro aspecto é que todas as satisfações que estão relacionadas com o desenvolvimento sustentável, além de envolver todos os indivíduos integrantes de cada processo produtivo, envolvem uma relação entre os processos, desde o nível macro ao micro.

2.2 APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Muitos dos processos com atividade econômica atualmente, inclusive a produção de materiais de construção, são fontes geradoras de resíduos, causando grande degradação ambiental.

A Construção Civil consome cerca de 14% a 50% de recursos naturais (SJÓSTROM *apud* JOHN, 1998). O Brasil consome cerca de 220 milhões de toneladas de agregados por ano (JOHN, 2000), o que representa quase 1,3 t/hab. ano.

O grande volume de recursos naturais consumido e uma grande geração dos resíduos nos processos industriais faz da reciclagem uma boa alternativa. A proteção do solo e da água, a limitação da produção de perdas e a reutilização de materiais são itens chave para o conceito de desenvolvimento sustentável (PERA, 1996). Porém, devem ser conhecidas todas as características físicas, químicas e ambientais destes resíduos para sua possível utilização.

O impacto da demanda ambiental sobre a construção civil não pode ser subestimado. KILBERT *apud* JOHN (1999) propôs seis princípios:

- a) minimizar o consumo de recursos (CONSERVAR),
- b) maximizar a reutilização de recursos (REUSO),
- c) usar recursos renováveis ou recicláveis (RENOVAR/RECICLAR),
- d) proteger o meio ambiente (PROTEÇÃO à NATUREZA),
- e) criar um ambiente saudável e não tóxico (NÃO TÓXICO),
- f) buscar a qualidade na criação do ambiente construído (QUALIDADE)

Com relação à gestão de resíduos, atualmente, vigora uma hierarquia de objetivos (LEACH *et al.*, GRÜBL e RÜHL *apud* JOHN, 2000):

- a) reduzir a geração de resíduos na fonte;
- b) reutilizar o resíduo;

- c) reciclar;
- d) incinerar recuperando a energia;
- e) depositar em aterros sanitários.

A possibilidade de redução dos resíduos gerados nos processos industriais apresenta limitações financeiras para micro e pequenas empresas e limitações técnicas e de mobilidade de adequação e/ou mudança de processos para médias e grandes empresas. De forma que os resíduos sempre existirão, seja em pequena ou em larga escala. A política ambiental vigente ainda é quase que exclusivamente voltada para a deposição controlada dos resíduos, sendo outras técnicas também utilizadas mas, em pequena escala: a incineração e o co-processamento.

A redução da geração de resíduos na fonte envolve a otimização do processo de produção. A retroalimentação do processo, a partir da quantidade de resíduo gerada, após a otimização, possibilita que melhorias sejam introduzidas no processo. Segundo KIPERSTOK et al. (1999), a redução de resíduos na fonte, bem como as tecnologias limpas, visam aproximar o processo produtivo na condição de emissão zero. Objetiva também a eliminação da poluição a montante dos processos, tentando se afastar da visão do binômio tratamento/disposição final ("*End of Pipe*") como soluções para os problemas ambientais gerados pela indústria.

Segundo LIMA *apud* MENEZES (2000, p. 127) "*a incineração é um processo de redução por peso, do volume das características de periculosidade dos resíduos, com a conseqüente eliminação da matéria orgânica e características de patogenicidade, através da combustão controlada*". Atualmente a incineração também consiste num processo de reciclagem de energia liberada na queima dos materiais (redução em 90% do volume), visando à produção de energia elétrica e de vapor.

Ainda segundo MENEZES (2000), a incineração no Brasil se caracteriza pela existência de grande quantidade de incineradores de porte pequeno.

A incineração consiste em um trabalho de destruição térmica dos resíduos. Operando a uma temperatura de 900 a 1300°C, as unidades de incineração são altamente eficientes na destruição dos resíduos. Todavia, apresenta suas limitações: na incineração são gerados resíduos pós-combustão, como cinzas e gases, que

exigem uma disposição ou tratamentos adequados, que são os aterros que também apresentam suas limitações.

Cinzas derivadas da combustão de resíduos perigosos são classificadas como resíduo perigoso e precisam ser dispostas atendendo às exigências dos órgãos ambientais competentes, afirma FERRARI (2000). Para se ter idéia, a CETREL S.A., empresa criada para garantir a proteção ambiental do Pólo Petroquímico de Camaçari – Bahia, gera 160t/mês de cinzas no processo de incineração, que são depositados em seus aterros industriais (CERQUEIRA e ALVES, 1999). Um outro fator é o custo, onde, em média, cobra-se R\$ 1.500,00 a R\$ 2.500,00 por tonelada de resíduo incinerado.

Outra vertente é o co-processamento, já utilizado em São Paulo, Paraná, Rio de Janeiro e Minas Gerais em fábricas de cimento, onde uma parte do calor gerado na combustão é utilizado para co-processar o resíduo, que é parte do combustível.

Segundo FERRARI (2000), co-processamento em fornos de clínquer é a técnica de utilização de resíduos industriais a partir do processamento destes como substituto parcial de matéria prima e/ou de combustível, na fabricação de cimento. O co-processamento é mais indicado para a incineração de resíduos perigosos devido às altas temperaturas e longo tempo de permanência do resíduo nos fornos; alta turbulência dos gases; ambiente alcalino natural; minimização do resíduo gerado e estabilidade térmica. Dentre os benefícios, destacam-se a valorização do resíduo, que se transforma em combustível, substituindo o uso de outros combustíveis não-renováveis no processo de fabricação do cimento; a redução dos níveis de emissão de CO₂; e o custo *versus* benefício, redução dos custos de produção; uso de tecnologia e instalações existentes. As restrições deste processo são os tipos de resíduos a serem co-processados (que depende do valor energético a ser recuperado) e sua origem (descartando o uso dos resíduos de origem radioativa, explosiva, de saúde, entre outros., que venham a causar danos ao ambiente).

A política ambiental vigente ainda é principalmente voltada para a disposição controlada dos resíduos, apresentando várias restrições. Segundo ALVES (1998) a partir de dados fornecidos pela Cetesb, das 535 mil toneladas de resíduo classe I, 53% são tratados, 31% são estocados e 16% são dispostos no solo. Com relação aos resíduo classe II, 35% são para tratamento, 2% estocados e 63% são dispostos. Entres estas restrições, têm-se os aterros controlados que geram a utilização de

grandes áreas por tempo indefinido, limitando a utilização do solo. Atualmente já existem pesquisas sobre a execução de aterros com materiais secundários, porém muito incipientes. Outra restrição diz respeito à concentração de enormes quantidades de resíduos perigosos, elevando os riscos de acidentes de graves conseqüências. Para controlar os riscos dos acidentes, a normalização dos aterros tem sofrido aperfeiçoamentos constantes. Estes aperfeiçoamentos têm elevado o preço destes serviços, cerca de 100 a 250 US\$/t em países desenvolvidos (DALMIJN, GLASS *apud* CASSA e CARNEIRO, 1999) e 25 US\$/t no Brasil (CAR *apud* CASSA e CARNEIRO, 1999).

A produção de novos materiais pode reduzir o consumo de energia, como o caso de concretos produzidos com altos teores de escória em substituição ao cimento, e altos teores de pozolanas (BILODEAU e MALHOTRA, 2000).

Entre outras vantagens da reciclagem têm-se:

- a) preservação dos recursos ambientais (EPA, JOHN *apud* JOHN, 2000);
- b) redução do volume de aterros e incineração (EPA, JOHN *apud* JOHN, 2000);
- c) redução do consumo energético (EPA, JOHN *apud* JOHN, 2000);
- d) redução da poluição emitida para a fabricação de um mesmo produto (EPA, JOHN *apud* JOHN, 2000);
- e) geração de empregos (EPA *apud* JOHN, 2000);
- f) aumento da durabilidade da construção.

2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS

Devido à quantidade de resíduo gerado por inúmeros processos de produção e à diferença entre diversos resíduos é que a NBR 10004 (1987), Resíduos Sólidos – Classificação, classifica os resíduos em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, que podem apresentar riscos à saúde pública e/ou ao meio ambiente, nas seguintes classes:

- a) resíduos Classe I – perigosos – apresentam riscos à saúde pública (provocando ou acentuando o aumento da mortalidade ou incidência de doenças), ao meio ambiente (quando o resíduo é manuseado ou destinado de forma inadequada), ou características como inflamabilidade, corrosividade,

reatividade, toxicidade, patogenicidade, que estão definidas na norma em discussão;

- b) resíduo Classe II – não inertes – aqueles que não se enquadram como resíduo Classe I ou Classe III, tendo como propriedades a combustibilidade, a biodegradabilidade ou a solubilidade em água;
- c) resíduo Classe III – Inertes – aqueles que, quando submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme teste de solubilização realizado segundo a norma NBR 10006 (1987), não tiver nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos de potabilidade de água, conforme listagem nº8 (da referente norma).

O processo de reciclagem deve levar em consideração todas as características do resíduo e, principalmente, seu risco ambiental, para que o desenvolvimento dos novos produtos tenham um bom desempenho e uma maior aceitação por parte dos consumidores.

2.4 PARÂMETROS E METODOLOGIA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

CINCOTTO (1988) apresentou alguns parâmetros para utilização de resíduos na Construção Civil, onde a autora destaca principalmente a quantidade do resíduo disponível (grande o suficiente para justificar o estudo), as distâncias de transporte e processamento e avaliação do risco de contaminação.

JOHN (1996), no **WorkShop** sobre Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção (USP - São Paulo, 1996) e JOHN (2000) apresentam uma metodologia de pesquisa e desenvolvimento de reciclagem de resíduos como materiais de construção civil.

Esta metodologia é de grande importância para direcionar os estudos envolvendo resíduos sólidos, servindo como uma orientação para pesquisas em andamento e uma referência para pesquisas que se iniciarão, evitando o uso inadequado e prevenindo acidentes.

O estudo da reciclagem de resíduos sólidos envolve:

- estatística da geração do resíduo, identificação e quantificação dos resíduos

disponíveis. Estas estatísticas podem ser encontradas através dos órgãos controladores, como o CRA – Centro de Recursos Ambientais. Em São Paulo, são geradas anualmente 535 mil toneladas de resíduo classe I e 25 milhões classe II, (ALVES, 1998). Na Bahia, a Rede Reciclar Bahia¹ está realizando um inventário sobre todos os resíduos gerados no estado;

- seleção do resíduo a ser pesquisado. Para esta seleção deve ser investigado o risco de contaminação ambiental, aspectos sociais, quantidade produzida, custos de disposição e destinação, nível de envolvimento da empresa geradora e aspectos comerciais;
- conhecimento do processo de produção do resíduo, visando a verificação da uniformidade das características do resíduo gerado, pois afetarão no desenvolvimento do novo produto;
- a caracterização do resíduo. As empresas geradoras possuem um papel muito importante na caracterização preliminar e, que deve incluir aspectos físicos e análise química, análise da microestrutura e risco ambiental;
- busca de possíveis aplicações dentro da construção civil, considerando as características físicas e químicas do resíduo. Esta busca deverá ser analisada por uma equipe multidisciplinar, para um maior aproveitamento do potencial de reciclagem do resíduo;
- desenvolvimento de aplicações técnica e economicamente viáveis, incluindo seu processo de produção. Dentre estas aplicações podem ser desenvolvidas as tecnicamente viáveis e economicamente inviáveis, considerando os danos que o resíduo está causando ao meio ambiente. A seleção e desenvolvimento da aplicação ideal engloba os aspectos técnicos, econômicos e ambientais;
- desenvolvimento do produto. Este desenvolvimento envolve pesquisa laboratorial para o desenvolvimento da tecnologia básica e o desenvolvimento da tecnologia aplicada, processo de produção e controle da qualidade;

¹ Rede Reciclar Bahia – Rede Cooperativa para Aproveitamento de Resíduos Sólidos como Materiais de Construção. Estão envolvidos na Rede, a UEFS, UFBA, CEPED, CRA, CAIXA, etc.

- análise do desempenho do novo produto frente às diferentes necessidades dos usuários para cada aplicação específica. Segundo CALVACANTE e CHERIAF (1996), na análise do desempenho do novo produto com a incorporação de resíduos deve ser avaliado também o potencial poluente e não apenas o desempenho estrutural;
- análise do impacto ambiental do novo produto, ou seja, o acompanhamento do ciclo de vida total do produto, que necessariamente deve envolver avaliação de riscos à saúde dos trabalhadores e usuários. Segundo KIPERSTOK et al. (1999), uma valiosa ferramenta utilizada para auxiliar esta abordagem é a LCA² - Análise do Ciclo de Vida, desenvolvida como um instrumento para apoiar as decisões para o desenvolvimento sustentável. Os componentes da LCA são quatro: definição de metas e escopo; análise para inventário; análise de impacto e análise para melhoria, conforme figura 2.2. Dentro de cada componente encontram-se como principais diretrizes:
 - a) definição das metas: observa-se os limites de abrangência, necessidades de dados e limitações;
 - b) análise de inventário: motivo e escopo do inventário, coleta de dados, apresentação de resultados, entre outros;
 - c) análise de Impacto: avalia os impactos e riscos associados com as transformações e transferências de energia e materiais quantificados na etapa de inventário;
 - d) análise para melhoria: análise dos encargos ambientais relativos a cada processo ou atividade, entre outros.

² LCA "*life cycle analysis*" - é um processo objetivo para avaliar os encargos ambientais associados com um produto, processo ou atividade a partir da identificação e quantificação da energia e materiais usados e os resíduos emitidos para o meio ambiente, de forma a avaliar o impacto do uso desta energia e materiais e as emissões para o meio ambiente, assim como avaliar e implementar oportunidades que redundem em melhorias ambientais (SHEN *apud* KIPERSTOK et al., 1999).



Figura 2.2 Componentes da análise do ciclo de vida (SHEN *apud* KIPERSTOK et al., 1999).

- transferência de tecnologia. Para um melhor desempenho do novo produto é necessário o envolvimento de toda cadeia participativa, o envolvimento da empresa geradora, das instituições responsáveis pelo estudos científicos e tecnológicos, dos clientes e dos órgãos de fiscalização ambiental;
- retroalimentação do sistema. Esta fase está relacionada com o aperfeiçoamento dos produtos desenvolvidos e coleta de dados para desenvolvimento de novas aplicações.

CAPÍTULO 3 RESÍDUO DE CORTE DE GRANITO – RCG

Diversos processos industriais são fontes geradoras de resíduos sólidos, com grande potencial de reciclagem como materiais de construção. Dentre estes processos encontra-se o beneficiamento (serragem) de rochas ornamentais, ou melhor, o beneficiamento de mármore e granitos.

O processo de serragem ocorre pela ação da polpa abrasiva (constituída de granalha, água, cal e pó de rocha), conduzida por um conjunto de lâminas movimentadas pelo tear³. Neste processo ocorre o desgaste da rocha, transformando-a em pó, porém em conjunto com a água, granalha e cal forma-se o resíduo de corte de granito(RCG).

O RCG, em algumas indústrias, é colocado diretamente nos pátios, mas em outras, passa por um equipamento chamado filtro prensa, onde é reaproveitada parte da água e o resíduo também condicionado nos pátios, mas com um teor de umidade menor, em torno de 24%.

Neste capítulo será enfocada a distribuição das reservas de granitos no país, processo de geração, quantidade gerada e os estudos desenvolvidos e os que estão em desenvolvimento.

3.1 RESERVAS DE GRANITO E PANORAMA DO SETOR DE ROCHAS ORNAMENTAIS

Os minerais possuem fundamental importância, do ponto de vista econômico da sociedade, sendo de interesse ornamental⁴, como material para abrasivo, refratário, cerâmico, vítreo, fertilizantes, para aparelhos óticos e científicos (DANA *apud* SILVA, 1998).

No mundo os recursos geológicos, com enfoque ornamental, encontram-se distribuídos na Itália, China, Espanha, Índia, Brasil, Portugal, Grécia e Coreia do Sul, que são os grandes produtores, conforme a figura 3.1. Existem, ainda, Estados

³ Tear : Segundo STELLIN Jr. (1998), equipamento constituído de uma estrutura de sustentação formada por quatro colunas que suportam o quadro porta lâminas, estas são dispostas no sentido longitudinal do maior comprimento do bloco e tensionadas para manter o perfeito nivelamento, alinhamento e paralelismo entre si. O quadro imprime um movimento alternado, responsável pelo atrito entre as lâminas, o elemento abrasivo e o bloco a ser cortado.

⁴ Considera-se rocha ornamental aquela produzida através de sua extração, na forma de blocos paralelepípedicos de granito, sienito, migmatito, quartizito, arenito, ardósia, serpentinito, mármore, calcário, que serão serrados em placas e que tenham interesse comercial.

Unidos da América, França, África do Sul, Japão, Cuba, Canadá, México, Itália, Suécia, Noruega, Alemanha, Bélgica, com pequena produção.

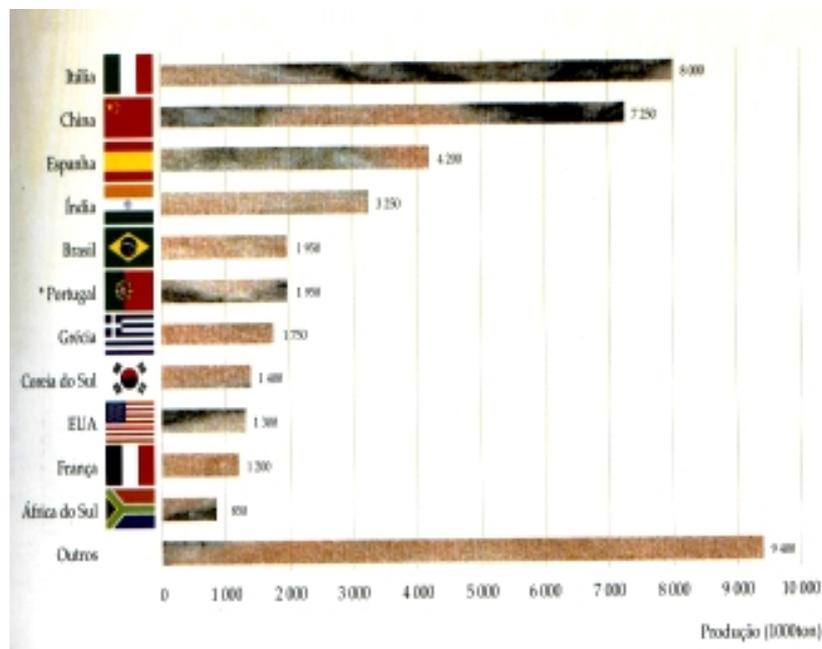


Figura 3.1 Produção mundial de Rochas ornamentais em 1995 (Stone 96 – World Marketing Handbook *apud* Rochas Ornamentais – Informações Estatística 1986-1995, Instituto Geológico e Mineiro, Ministério da Economia, 1995).

O Brasil é um dos cinco maiores produtores de rochas ornamentais, onde são extraídos mais de 450 tipos de rocha de vários padrões e tonalidades (BAHIA - ROCHAS ORNAMENTAIS, 1993-1996).

O Brasil é o maior detentor das reservas mundiais de granito, as maiores encontram-se no Espírito Santo, Minas Gerais e estados do Nordeste, sendo que os maiores produtores são Espírito Santo, Minas Gerais, Bahia e Ceará.

A Bahia é um dos mais conhecidos estados brasileiros, com trabalhos de mapeamento geológico sistemático. Segundo SILVEIRA e NETO (1996) o território baiano encontra-se inteiramente contido numa zona estável da crosta, onde este núcleo estável é envolvido por rochas sedimentares e metamorfas (com baixo, médio e alto grau de metamorfismo). As rochas com alto e médio grau de metamorfismo, principalmente granulitos e gnaisses, com corpos intrusivos de

granitos, possuem o alto potencial de ocorrência de rochas ornamentais. A figura 3.2 mostra a distribuição da produção dos granitos na Bahia.



Figura 3.2 Mapa da distribuição dos granitos na Bahia, (CBPM – Companhia Baiana de Produção Mineral, <http://www.cbpm.com.br/index.html>, 2000)

Dentre as rochas ornamentais têm-se o granito, mármore, quartizitos, arenitos, entre outros. Porém, para efeito comercial, todas as rochas com alta resistência ao desgaste e beleza são generalizadas como granito.

Segundo PANORAMA DE ROCHAS ORNAMENTAIS NA BAHIA (1994) o granito, em termos geológicos, é uma rocha ígnea, uniforme, de textura granular, constituída predominantemente dos minerais de quartzo, feldspato e mica.

O quartzo é um dos minerais mais abundantes na crosta terrestre. Apresenta muitas variedades, tais como o cristal de rocha ou quartzo hialino, que é incolor e transparente; o quartzo de ametista, de cor roxa; o quartzo citrino, de cor amarela, também conhecido como falso topázio. O quartzo hialino é usado na fabricação de lentes. O quartzo pulverizado é matéria prima para fabricação do vidro.

O feldspato é o mineral predominante no granito. Existem feldspatos brancos, leitosos, róseos, amarelados ou cinzentos. Sua decomposição pela água das chuvas e pelo gás carbônico do ar forma a argila (barro), um dos componentes do solo.

A mica é o mineral que aparece no granito como pequenas lâminas brilhantes. Dentro das variedades de mica, a mais conhecida é a mica branca (moscovita). É empregada como isolante elétrico e térmico.

Segundo SILVEIRA e NETO (1996) dos métodos extrativos ou técnicas de corte aplicados nas pedreiras em atividade, 33% empregam desmonte por explosivos, 24,7% utilizam disco helicoidal, 15,9% corte contínuo, 14,5% são lavradas manualmente, 8,7% usam divisão mecânica por cunhas e 2,9% fazem uso do fio adiamantado.

Após a extração dos blocos, estes são transportados até as beneficiadoras, onde se procede o processo de desdobramento (serragem). Este processo aplica-se para todas as rochas ornamentais (granitos, mármore, entre outras).

3.2 DESDOBRAMENTOS DOS BLOCOS DE GRANITO

O processo de produção de pedras ornamentais, na maioria das empresas brasileiras, obedece as fases, conforme descrito a seguir.

3.2.1 Pesquisa e Definição dos Locais de Extração dos Blocos

A pesquisa para definição dos locais de extração dos blocos envolve a qualidade da rocha e seu valor comercial. Devem ser levados em conta os seguintes aspectos: exame da bibliografia e da documentação geológica sobre a área a ser explorada, exame de coleções existentes de rochas, fotos aéreas identificando afloramentos e autorizações dos órgãos competentes.

3.2.2 A Extração dos Blocos das Pedreiras

As principais técnicas utilizadas hoje na lavra de rochas ornamentais são:

- corte com fio helicoidal - três arames de aço trançados, operando com uma, duas ou mais redes simultaneamente e fazendo cortes horizontais, verticais ou inclinados;
- corte a fio diamantado - cabo de aço com 16 metros de perímetro, onde são distribuídos pérolas adiamantadas, anilhas, molas separadores e uniões;

- corte contínuo - perfuratrix hidráulica ou pneumática, acoplada a compressor, montada sobre macacos hidráulicos e trilhos reguláveis ou sobre plataforma móvel, conforme figura 3.3;
- **jet flame** - aquecimento e brusco resfriamento da zona de corte delimitada, na rocha; desmonte de grandes volumes com explosivos; corte de matacões e sistema manual.

Na extração é gerado um resíduo de lavra, conforme figura 3.4, que são pedaços de rochas que não foram aproveitados ou de rochas que fissuraram (as fissuras se tornam planos preferenciais para a execução do corte dos blocos, o que inviabiliza o uso desta).

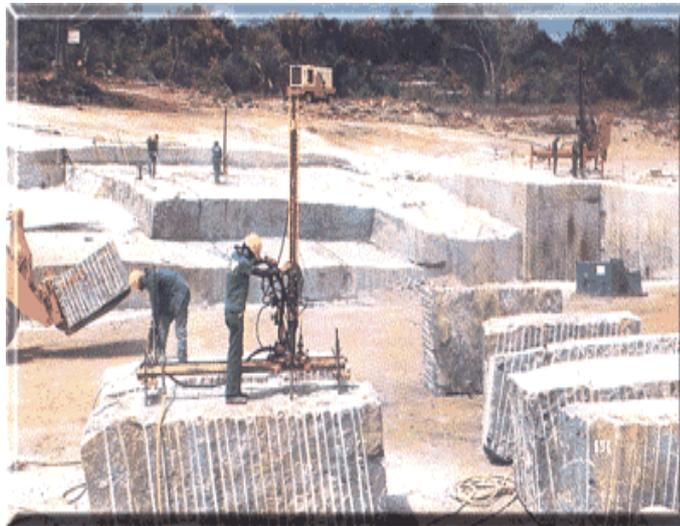


Figura 3.3 Perfuratrix utilizada para corte dos blocos (Foto cortesia da empresa Peval Ltda. - beneficiadora de granitos)



Figura 3.4 Resíduo gerado na lavra das rochas

3.2.3 Transporte dos Blocos para a Beneficiadora

Após a extração, os blocos são transportados até as empresas para seu desdobramento, conforme figura 3.5. Os blocos são definidos em dimensões padronizadas (3,0x2,0x1,5)m pelos equipamentos que irão serrá-los. Neste processo ainda pode ser gerado um outro resíduo de rocha, chamado de costaneira, são os pedaços que são serrados para que os blocos fiquem com as dimensões padrão dos equipamentos. O processo de colocação e fixação do bloco ou blocos a serem serrados sobre um carro porta-bloco, que serve de apoio e condução do bloco à posição de corte sobre o quadro de lâminas do tear é chamada de preparação da carga (STELLIN Jr., 1998).



Figura 3.5 Armazenamento dos blocos nos pátios das serrarias (Foto cortesia da empresa Peval Ltda. - beneficiadora de granitos)

3.2.4 Carregamento e Preparação do Tear

Segundo STELLIN Jr. (1998), são atividades relacionadas com a colocação e fixação do carro porta-bloco na posição de corte, no interior do tear e atividades de ajustes, regulagens e lubrificação, necessárias para iniciar uma nova operação de corte.

3.2.5 Desdobramento dos Blocos

O desdobramento é feito a partir da serragem, em chapas, dos blocos, em equipamentos chamados teares. Segundo STELLIN Jr. (1998), o corte dos blocos realizados com teares é o mais amplamente difundido, porque conjuga alguns fatores como: maior flexibilidade, elevada produtividade, custo relativamente mais reduzido, além de uma boa relação custo/benefício do investimento inicial. A Bahia possui atualmente 45 teares em atividade plena. O processo de corte se dá pela ação do elemento abrasivo (polpa abrasiva) conduzido pelo conjunto de lâminas movimentadas pelo tear. Neste movimento a lâmina funciona como um pistão em um cilindro provocando alternadamente compressão e depressão que geram desagregação dos cristais de granito (STELLIN Jr., 1998).

Durante a serragem, gera-se uma lama proveniente de uma polpa abrasiva utilizada no tear com os objetivos de lubrificar e esfriar as lâminas de serragem, evitar a oxidação das mesmas, limpar os canais entre chapas e servir como abrasivo para facilitar a serragem. Essa polpa é composta basicamente de água, gralha, cal e rocha moída. A circulação da polpa em cada tear é feita por uma bomba submersa de eixo vertical, situada num poço de recolhimento e que cria uma chuva abrasiva que se distribui nas lâminas e nos blocos.

Após passar pelos teares, a lama é drenada por um sistema de esgotamento, seguindo para tanques de decantação, onde a água é reaproveitada e o material sólido é retirado e depositado nos pátios das empresas. O desgaste das lâminas poderá produzir pequenos fragmentos metálicos que será incorporado ao resíduo. A quantidade de resíduo gerado por cada processo depende da serrabilidade de cada material. Por exemplo, o mármore possui uma serrabilidade maior que a dos granitos. Permite ser desgastado com maior eficiência do equipamento, gerando uma quantidade de resíduo bem menor, que está diretamente ligado com as estruturas com que os elementos químicos estão arranjados. STELLIN Jr. (1998) e REY *et al.* (1998) enfocam que a serrabilidade dos granitos não depende de sua

composição química, mas da compacidade do seus materiais, textura, sendo mais fácil serrar os materiais porosos, os alterados física ou quimicamente e os que apresentam microfissuras no interior dos cristais, debilitando sua estrutura.

3.2.6 Descarregamento e Acabamento das Chapas

Depois da serragem ocorre o descarregamento do tear, tendo como produto a chapa bruta serrada em espessura de 20mm. Estas são encaminhadas ao processo de acabamento, onde a chapa é colocada numa máquina polidora, chamada de politriz dando um nível de acabamento desejado. Neste processo também é gerado um resíduo, em quantidade bem menor, chamado resíduo do processo de acabamento.

3.2.7 Armazenamento e Comercialização

Após o acabamento a rocha está pronta para ser comercializada conforme figura 3.6.

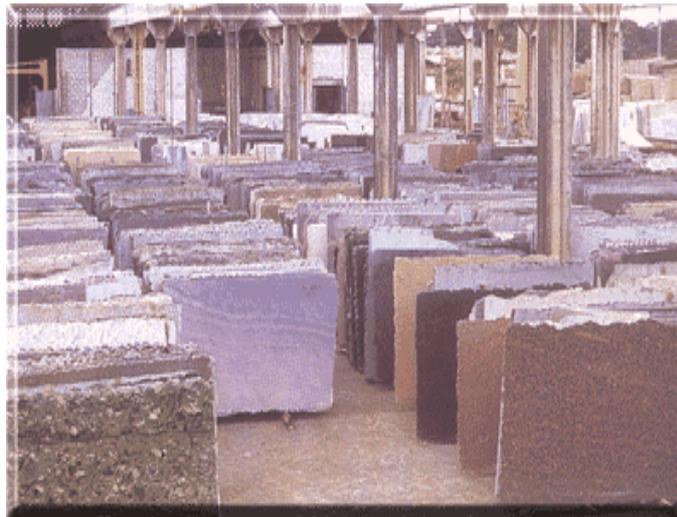


Figura 3.6 Placas polidas e armazenadas para comercialização (Foto cortesia da empresa Peval Ltda. - beneficiadora de granitos)

A figura 3.7 mostra todo o processo que envolve o beneficiamento de rochas ornamentais, inclusive com a geração dos resíduos.

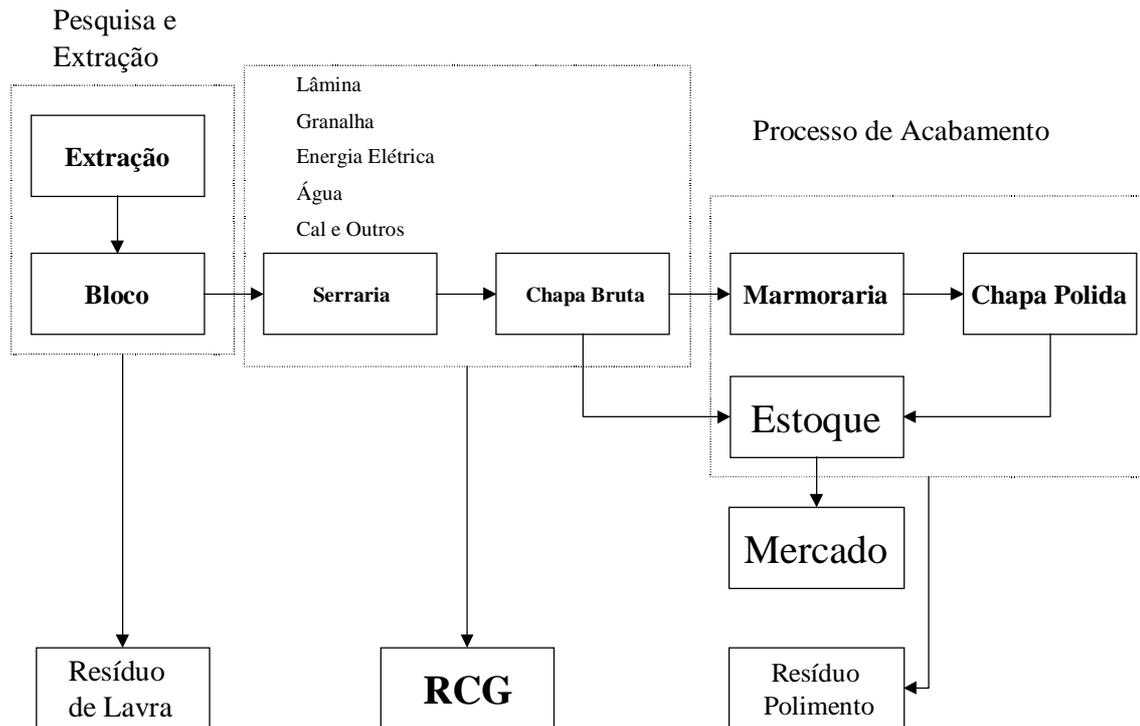


Figura 3.7 Operações realizadas na industrialização de rochas ornamentais NITES *apud* SILVA (1998), adaptado com a geração dos resíduos.

Resumidamente, observa-se na figura 3.7 que no processo de beneficiamento das rochas ornamentais são gerados vários tipos de resíduos, que são: os resíduos da extração do bloco; resíduos da serragem para enquadrá-los nas dimensões padrão; do processo de serragem e resíduo de polimento. Este trabalho focaliza apenas o resíduo gerado no processo de serragem (RCG), que é gerado em maior quantidade.

3.3 VOLUME DO RESÍDUO DE RCG GERADO

Segundo a FluxGeo⁵, 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 granito) 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 (foco principal deste trabalho) e um terceiro que é a mistura do resíduo de mármore com resíduos de granito.

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 *silicose*⁶. 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.

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.

⁵FluxGeo- Revista especializada em rochas ornamentais, equipamentos, etc. www.fluxgeo.com.br.

⁶ Segundo o **U.S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES**, durante os anos de 1968 a 1994 houve 14.824 mortes devido à silicose, nos E. Unidos (<http://uol.com.br/intramed/revistas/mmwr/morte3.htm>, 2000). Esta doença pode ser causada, também, por todos os resíduos muito finos e com altos teores de sílica, que são a maioria das pozolanas, inclusive o resíduo de corte de granito, que possui 59,62% de sílica.

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.

3.4 HISTÓRICO SOBRE OS ESTUDOS COM RCG

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 (RCG).

Informações fornecidas pelas empresas produtoras e por FluxGeo, o 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. Porém, já se encontram em desenvolvimento trabalhos como o da NEVES *et al.*(1999), utilizando o resíduo da serragem e/ou polimento de granito em tijolos de cerâmica vermelha. Um outro estudo sobre o resíduo também está sendo realizado na Universidade Federal do Ceará, por LIMA FILHO *et al.* (2000 - b), onde é constatada a viabilidade técnica da substituição dos pós cerâmicos convencionais por pó de granito na injeção de peças cerâmicas à baixa pressão.

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 “fíler”. 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.

Em nov/99 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.

LIMA FILHO *et al.* (2000 - b) estão desenvolvendo, também, um outro estudo semelhante ao da Universidade Federal da Paraíba, que é o "*Estudo da Viabilidade Técnica da Substituição dos pós cerâmicos convencionais por pó de granito na injeção de peças cerâmicas à baixa pressão*". Neste estudo ficou demonstrada a viabilidade técnica da substituição, sendo uma fonte de renda alternativa para a indústria de rochas ornamentais, além da redução dos impactos ambientais causados pela deposição do resíduo.

CAPÍTULO 4 EFEITO DAS ADIÇÕES MINERAIS EM CONCRETOS

O concreto é um dos materiais mais utilizados mundialmente na Construção Civil. Ao longo do tempo, tem-se notado uma grande preocupação com o aumento de seu desempenho para as diversas aplicações. Este aumento de desempenho, aliado com o desenvolvimento sustentável, faz do uso das adições uma excelente alternativa.

O processo de deterioração do concreto é resultado de ações químicas e físicas, como o ataque por sulfatos, ácidos, reação álcali-agregado, gelo e degelo, corrosão das armaduras, entre outros. Todos esses processos envolvem o fenômeno de transporte pela estruturas de poros, o ambiente em que a estrutura está inserida, a qualidade e a proporção dos materiais utilizados.

A utilização de adições minerais no concreto tem proporcionado ganho no seu desempenho, tanto no estado fresco como no estado endurecido, quanto as propriedades mecânicas e durabilidade. FARIAS e TESUKA (1992) colocam que entre as medidas preventivas para minimizar o processo de corrosão das armaduras, encontra-se a modificação da característica dos concretos, tendo como principais aspectos a baixa permeabilidade e a elevada resistividade elétrica.

Além do aumento do desempenho dos concretos produzidos com adições, ocorre também uma contribuição efetiva para um maior desenvolvimento sustentável. Como afirma BILODEAU e MALHOTRA (2000), uma das contribuições da indústria concreteira para o desenvolvimento sustentável é a substituição do cimento por cinza volante em largas proporções.

Dentre as adições utilizadas atualmente, encontram-se as que possuem atividade pozolânica (sílica ativa, cinza de casca de arroz, cinza volante - Classe F), as que possuem atividade cimentante (escória de alto forno, cinza volante - Classe C) e as que não possuem atividade, que são os fílers (material carbonático, pó de quartzo, pó de pedra, entre outros).

Neste capítulo, abordar-se-á a influência das adições minerais, com e sem atividade química, nas propriedades do concreto no estado fresco e no estado endurecido.

4.1 ADIÇÕES MINERAIS

Dentre as propriedades dos concretos no estado fresco que as adições influem estão a consistência e exsudação. Já nos concretos no estado endurecido, as adições influem na resistência mecânica, permeabilidade, porosidade, resistência a íons agressivos, reação álcali-agregado, entre outras. PRICE (1975) já apontava as vantagens do uso das adições minerais nos concretos, como o uso da cinza volante.

Segundo MASSAZZA e COSTA, p. 4), *as adições com habilidade para reagir com o hidróxido de cálcio na presença de água em temperaturas ambientes e habilidade para formar produtos hidratados com propriedades aglomerantes são consideradas pozolanas*. Estas adições podem conter componentes ativos na fase vítrea, componentes inertes sem atividade pozolânica e prejudiciais, contendo substâncias nocivas como as orgânicas. O nome pozolana deu-se por existir próximo a Pozzouli, na Itália, materiais de origem vulcânica de excelente atividade pozolânica (MASSAZZA *et al.*, 1977, KYHARA, 1981).

Para LEA e SOUZA SANTOS *apud* KYHARA (1981, p. 15), *pozolanas são materiais naturais ou artificiais, silicosos e aluminosos que por si só não possuem poder aglomerante, mas que em presença de água à temperatura ambiente, reagem com hidróxido de cálcio, dando compostos de poder aglomerante*.

A reação pozolânica entre o hidróxido de cálcio e a sílica, resultando em silicato de cálcio hidratado, pode ser expressa de acordo a reação abaixo (NELSO e YUONG *apud* COHEN e BENTUR, 1988) :



onde, C = CaO – óxido de cálcio; H = H₂O - água; S=SiO₂ – óxido de silício

Segundo METHA e MONTEIRO (1994), *adições minerais são materiais silicosos finamente moídos, que podem ser naturais ou sub-produtos industriais, podendo ter atividade pozolânica ou cimentante*. Segundo a ASTM 618-94 *apud* NEVILLE (1997), NBR 12653 (ABNT, 1992), *pozolana é um material silicoso ou sílico-aluminoso que, por si só, tem pouco ou nenhum valor cimentício, mas, quando finamente subdividido e na presença de umidade, reage quimicamente com o*

hidróxido de cálcio à temperatura ambiente formando compostos com propriedades cimentícias.

Para METHA e MONTEIRO (1994), os materiais considerados naturais podem sofrer algum processo, como britagem, moagem, classificação por tamanho, com o objetivo de produzir uma pozolana. Já os subprodutos industriais “*são aqueles em que não são os produtos primários das respectivas indústrias*”. METHA e MONTEIRO (1994, p. 292)

Dentre as adições naturais, têm-se os materiais de origem piroclástica (vulcânica), formados a partir de erupções vulcânicas, cujo resfriamento brusco do magma dá origem a minúsculas partículas vitrificadas bastante reativas, (KYHARA, 1981).

Os subprodutos industriais ou adições artificiais são gerados em processos industriais. Estes processos, devido principalmente à temperatura, alteram a estrutura cristalina, causando um rearranjo de maneira que fiquem instáveis energeticamente. Ou seja, possuam um desarranjo na estrutura cristalina de forma que, quando submetidos à difração de raios X, não apresentem os ângulos de difrações que sua estrutura cristalina estável apresentaria, resultando em alos.

As pozolanas artificiais mais difundidas são a cinza volante, escória de alto forno, sílica ativa e cinza de casca de arroz; as menos conhecidas ou em estudo são a escória de aciaria finamente moída, assim como a escória de cobre e o metacaulim.

No Brasil, a atividade de uma pozolana é determinada pelo índice de atividade pozolânica com cimento (NBR 5752, ABNT 1992) ou com cal (NBR 5751, ABNT 1992). A definição é feita através da comparação entre duas argamassas, uma de referência e uma outra com a substituição de 35% do volume do cimento ou da cal pela suposta pozolana. O índice de atividade é relação entre a resistência à compressão axial aos 28 dias da argamassa com e sem pozolana. Pode-se verificar também através da determinação da pozolanicidade baseada no método químico de determinação da pozolanicidade de cimento pozolânico, conforme a NBR 5753 (ABNT, 1991).

Dentre as adições minerais que não possuem atividade pozolânica, encontram-se os filers que possuem apenas o efeito físico dentro do concreto.

Segundo PETRUCCI (1993), os *fílers* são agregados muito finos, compreendidos entre 5 a 75 μm , que podem ser utilizados em concreto asfáltico, adição a cimentos, adição a concretos, entre outros. Para NEVILLE (1997, p. 105), um *fíler* é um material finamente moído, com aproximadamente a mesma finura do cimento Portland que, devido as suas propriedades físicas, tem um efeito benéfico sobre as propriedades do concreto, como trabalhabilidade, densidade, segregação, permeabilidade, capilaridade, exsudação ou tendência à fissuração.

A partir das referências bibliográficas consultadas sobre as adições sem atividade química, é bastante pertinente diferenciar um agregado muito fino de uma adição. Esta diferenciação leva a classificação dos agregados muito finos em adição *fíler* e agregado *fíler*, em que:

- a) adição *fíler* - também chamadas apenas de *fíler*, são partículas muito finas ou moídas, que apresentam diâmetro médio $< 50\mu\text{m}$, e contribuem, principalmente, para um melhoramento da matriz cimentícia, para um maior preenchimento dos vazios deixados pelos produtos de hidratação do cimento ou pela não hidratação do cimento;
- b) agregado *fíler* - são partículas finas, que apresentam diâmetro médio entre 50 e 150 μm , e contribuem, principalmente, para o preenchimento dos vazios deixados pela descontinuidade da curva granulométrica do agregado miúdo, ou seja, preenchimento dos vazios deixados pelo desajuste, desarrumação dos agregados.

Dentre os *fílers* mais utilizados, encontram-se o material carbonático, pó de quartzo e pó de pedra.

4.2 EFEITO DAS ADIÇÕES COM ATIVIDADE POZOLÂNICA NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

Diversos estudos foram e estão sendo realizados com diversas adições minerais em concretos.

METHA e MONTEIRO (1994) enfatizam que o emprego de aditivos minerais no concreto promove um aumento no seu desempenho. Que inclui a melhora da resistência à fissuração térmica devido ao baixo calor de hidratação, aumento das resistências e redução da permeabilidade por refinamento dos poros, e uma

durabilidade maior a ataques químicos, tais como águas sulfatadas e expansão álcali-agregado.

Para melhoria das características citadas, as adições promovem influências nas características do concreto no estado fresco e no estado endurecido.

A seguir serão abordadas as influências das adições com atividade nos concretos, no estado fresco e no estado endurecido. No estado endurecido serão avaliadas a resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e tração na flexão.

4.2.1 Efeito nas Propriedades do Concreto Fresco

4.2.1.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade define a capacidade e facilidade com que os concretos possam ser lançados e moldados. Segundo METHA e MONTEIRO (1994), a trabalhabilidade representa características do concreto fresco, de difícil avaliação quantitativa. Está completamente relacionada com a consistência, coesão, exsudação e segregação.

A consistência, coesão e segregação dependem do efeito sinérgico entre a relação a/c, o teor de finos e da continuidade da granulometria do agregado miúdo e graúdo na mistura. A incorporação de adições tende a aumentar a coesão.

A segregação pode ser definida como *a separação dos constituintes de uma mistura heterogênea, de modo que sua distribuição deixe de ser uniforme* (NEVILLE, 1997, p. 214). A exsudação é *uma forma de segregação em que uma parte da água da mistura tende a subir para a superfície de um concreto recém-aplicado* (NEVILLE, 1997, p. 215). A incorporação de adições aumenta a viscosidade do concreto no estado fresco, opondo-se ao movimento descendente das partículas mais pesadas e ascendente da água.

As adições minerais exercem grandes influências nestas propriedades, devido às características físicas e à reatividade química. A alta finura das adições, quando incorporadas aos concretos, reduzem o tamanho e o volume de vazios, dando uma melhoria na coesão, diminuindo a segregação e exsudação. As pozolanas aumentam a plasticidade do concreto no estado fresco e diminuem a exsudação e a segregação (KYHARA, 1981).

Devido a sua finura e forma esférica, a cinza volante geralmente promove uma maior coesão e trabalhabilidade, contribuindo para uma menor segregação. Além disso, a substituição de parte do cimento por cinza volante 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). Esta redução pode variar de 5 a 15% (CUR Report *apud* NEVILLE, 1997). A redução da quantidade de água aumenta a relação sólido/líquido, promovendo benefícios ao concreto (ACI 226, 1987).

A presença da escória de alto forno nos concretos melhora a trabalhabilidade e coesão. Esta melhoria na trabalhabilidade é atribuída à forma esférica de suas partículas (NEVILLE, 1997).

4.2.1.2 Demanda de água

Devido à alta finura das adições e elevada superfície específica, quando incorporadas ao concreto provocam um aumento na demanda de água para manter a mesma consistência. Porém, em alguns casos, dependendo das características da adição, este efeito pode ser adverso.

A demanda de água em concretos contendo sílica ativa é cerca de 5% maior, em relação à massa de cimento, do que em concretos sem sílica ativa, devido a sua elevada área específica. A superfície específica da sílica ativa é aproximadamente 20.000 m²/kg (KULAKOWSKI *et al.*, 1996). Mas são concretos mais coesivos e com baixíssima segregação (ACI 226, 1987; ACI 234, 1995), e exsudação bastante minimizada (NEVILLE, 1997).

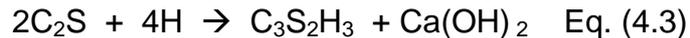
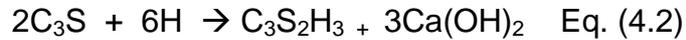
YOGENDRAN *et al.* (1987), na confecção de concretos com substituição de 5% até 30% de sílica ativa, constataram que, para uma mesma trabalhabilidade (mesmo abatimento), houve um acréscimo de 5% de água do percentual substituído.

Segundo NEVILLE (1997), para um mesmo teor de material cimentício, a inclusão de cinza volante ou escória de alto forno geralmente reduz a demanda de água e melhora a trabalhabilidade.

Para BATTAGIN *apud* METHA e MONTEIRO (1994), a distribuição granulométrica e morfologia da cinza volante exercem uma influência considerável sobre o consumo de água, a trabalhabilidade do concreto fresco e a velocidade de desenvolvimento da resistência no concreto endurecido.

4.2.1.3 Hidratação

De acordo com NEVILLE (1997), a hidratação do cimento depende principalmente de sua finura. Na hidratação do C_2S e C_3S , há a suposição que o $C_3S_2H_3$ seja formado como o produto final, conforme as equações abaixo:



onde, C_2S – silicato dicálcico; C_3S – silicato tricálcico, $C_3S_2H_3$ – silicato de cálcio hidratado

A presença de adições minerais pode acelerar o processo de hidratação, pois as partículas da adição servem como pontos de nucleação dentro da mistura.

A sílica ativa acelera a hidratação do cimento durante as primeiras idades, porém este efeito pode ser produzido por fíler inerte, devido a sua finura e à presença do número de partículas, catalisando a hidratação do cimento (ACI 234, 1995).

Os produtos de hidratação da matriz cimentícia com adição mineral é semelhante ao da matriz sem adição, exceto para sílica ativa (ACI 226, 1987).

Os silicatos de cálcio hidratados produzidos pela sílica ativa podem ser ligeiramente diferentes dos produzidos pela hidratação do cimento Portland, com uma densidade mais baixa. Mas, apesar da baixa densidade o C-S-H promove uma baixa permeabilidade (CHENG-YI e FELDMAN, FELDMAN e CHENG-Y *apud* ACI 226 1987). O C-S-H produzido com sílica ativa tem uma relação C/S menor do que a do C-S-H semelhante na hidratação do cimento Portland sem adições (NEVILLE, 1997). ROY *apud* NEVILLE (1997) encontrou valores de 1,0 para a relação C/S dos produtos de hidratação com sílica ativa.

Os produtos de hidratação da cinza volante com o hidróxido de cálcio é semelhante ao C-S-H resultante da hidratação do cimento. Sua ação física principal é densificação da microestrutura da pasta de cimento hidratada e na interface com as partículas do agregado graúdo, reduzindo também o teor de ar aprisionado (NEVILLE, 1997).

De acordo com NEVILLE (1997), o calor de hidratação é a quantidade de calor, em joules por grama de cimento não hidratado, que se desprende até a hidratação completa a uma temperatura estabelecida. A hidratação dos compostos de cimento Portland é exotérmica, chegando a liberar até 500J/g de cimento.

Com a inclusão de adições minerais na mistura de concreto ocorrerá uma diminuição do calor de hidratação, pois ocorre uma diminuição do consumo de cimento.

Segundo METHA e MONTEIRO (1994), o calor de hidratação total produzido pelas reações pozolânicas envolvendo aditivos minerais é considerado a metade do valor médio produzido pela hidratação do cimento Portland. O emprego de aditivos minerais, como cinza volante ou escória, em concreto massa podem reduzir o calor de hidratação quase que em razão direta com a quantidade de cimento Portland substituído.

Além das razões econômicas, a cinza volante está sendo usada em concretos, por reduzir a temperatura do concreto fresco, melhorar a trabalhabilidade e contribuir para a resistência e durabilidade do concreto no estado endurecido (ACI 226, 1987). De acordo com ROY *et al.* (1982), cimentos com altas percentagens de escória de alto forno podem ser caracterizados por apresentar baixo calor de hidratação e um lento desenvolvimento da resistência, comparados com o cimento Portland sem adições. Para NEVILLE (1997), a hidratação inicial e o desenvolvimento lento da resistência ocorre porque depende da decomposição da fase vítrea pelos íons hidroxila liberados durante a hidratação do cimento Portland. A presença de escória de alto forno promove também o desenvolvimento de uma microestrutura mais densa e uma fina estrutura de poros (SMOLCZYK e BAKKER *apud* MANGAT *et al.*, 1995).

4.2.1.4 Tempos de pega e cura

O início e fim de pega dos concretos definem o limite de manuseio e o início do desenvolvimento da resistência (METHA *et al.* 1994).

Como a hidratação está relacionada com o intertravamento dos produtos de hidratação e o preenchimento de espaços vazios e um conseqüente aumento da resistência, as pequenas partículas das adições influenciam bastante nos tempo de pega e cura dos concretos. Podem provocar uma diminuição dos tempos de pega

devido à aceleração da hidratação provocada pelo efeito fíler, no concreto recém misturado.

Em concretos com adição de escória de alto forno o retardamento de pega a temperaturas normais, em torno de 30 minutos a 1 hora (ACI 226.IR-87 apud NEVILLE, 1997).

Por outro lado, as características químicas da adição, como nível de atividade pozolânica, associadas à finura, e ao teor adicionado ou substituído, podem requerer um aumento no tempo de cura do concreto. Este aumento pode ser atribuído à baixa cinética das reações pozolânicas (METHA e MONTEIRO, 1994),

Com relação ao tempo de cura, a cinza volante pode retardar este tempo. As cinzas Classe F geralmente estendem, enquanto que as Classe C podem estender ou reduzir. Dependerá das condições ambientais, temperatura do concreto, tipo de cimento, quantidade de água, finura e composição química da cinza, entre outros (PLOWMAN e CABRERA *apud* ACI 226, 1987). Para NEVILLE (1997), a cinza volante tem um efeito retardador sobre o concreto em torno de 1 hora, provavelmente devido à liberação de SO_3^- presente na superfície das suas partículas.

4.2.2 Efeito nas Propriedades do Concreto no Estado Endurecido

A adequada proporção dos materiais, o controle das características do concreto fresco bem como os cuidados com a lançamento e cura dos concretos definem as propriedades do concreto endurecido.

Até meados da década de 90, dentre as propriedades do concreto endurecido, a resistência à compressão axial era a principal preocupação entre engenheiros civis (METHA e MONTEIRO, 1994). As outras propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto não eram levadas em consideração, exceto em obras especiais. Atualmente este panorama está mudando, e além de uma preocupação com a durabilidade dos concretos em cada ambiente, há uma tendência de produção de projetos de concretos específicos para ambientes específicos, além da preocupação ambiental.

Segundo METHA e MONTEIRO (1994), no concreto, a resistência é relacionada com a tensão requerida para causar a fratura, que possui uma relação inversa com a porosidade. Diversos fatores influenciam, como a relação

água/cimento, teor de ar incorporado, tipo de cimento, agregados, água de amassamento, aditivos e adições minerais. Este nível de tensão é fortemente influenciado pela zona de transição do concreto. Como a adesão entre os produtos de hidratação e as partículas de agregado são provenientes principalmente das forças de Wan der Walls, então serão o volume de vazios, os tamanhos de vazios, os tipos e tamanhos dos cristais presentes na zona de transição que determinarão a resistência desta zona.

A incorporação de adições minerais nos concretos influencia bastante na sua resistência final, devido à formação de uma maior quantidade de silicato de cálcio hidratado, podendo levar a uma redução da porosidade da matriz e da zona de transição (METHA e MONTEIRO, 1994).

Devido à alta finura e aos produtos de hidratação formados, as pozolanas contribuem muito para a redução do volume de vazios e difusividade e, conseqüentemente, para a permeabilidade do concreto (KYHARA, 1981). Desta forma a possibilidade de ingressos de íons agressivos é reduzida.

4.2.2.1 Resistência à compressão axial e resistência à tração

A resistência à compressão depende de diversos fatores, como: tipo e proporção dos materiais, relação água/cimento, condições de lançamento, adensamento e cura, teor de ar incorporado, do uso de aditivos ou adições, etc. A razão entre a resistência à tração uniaxial e a resistência à compressão varia em torno de 0,07 a 0,11 (METHA e MONTEIRO, 1994). Ainda de acordo com o autor, “as adições minerais são particularmente mais eficazes para aumentar a resistência à tração dos concretos”, p. 71. As misturas com adições pozolânicas reduzem a velocidade de desenvolvimento da resistência, porque as reações ocorrem de forma lenta. Porém, devido ao aumento da quantidade de produtos de hidratação, pode reduzir a porosidade da matriz e da zona de transição e, conseqüentemente, causar uma elevação na resistência final do concreto

Com relação a sílica ativa, a maior contribuição para a resistência dos concretos, em condições normais de cura (excluindo a cura acelerada), está entre 3 e 28 dias. Após os 28 dias este incremento é mínimo (ACI 234, 1995).

A contribuição da sílica ativa para o desenvolvimento da resistência até aos 7 dias provavelmente é devido à alta finura, contribuindo para um melhor arranjo,

atuando como fíler e densificando a região da interface do agregado (NEVILLE, 1997). A partir dos 7 dias como este arranjo e a zona de transição permanecem invariáveis (NEVILLE, 1997), há um prosseguimento da evolução da resistência devido à reação pozolânica.

BARATA e DAL MOLIN (1998), estudando a influência do metacaulim nas propriedades do concreto, verificaram que a resistência à compressão simples dos concretos com adição de metacaulim foi superior a dos concretos de referência e a contribuição desta adição para o acréscimo da resistência ocorreu até aos 14 dias. Segundo WILD *et al. apud* BARATA e DAL MOLIN (1998), a contribuição do metacaulim para a elevação da resistência ocorre inicialmente pelo efeito fíler, seguido do efeito pozolânico. Este fato do efeito fíler das adições com atividade química contribuir inicialmente para a elevação da resistência é abordado por vários pesquisadores. O aumento da resistência ocorre em função da disseminação das partículas na mistura, contribuindo como dispersor das partículas de cimento e para uma aceleração do processo de hidratação.

A adição de sílica ativa reduz o tamanho dos poros capilares, com a possibilidade de transformar poros contínuos em descontínuos, reduzindo a permeabilidade (ACI 226, 1987, ACI 234, 1995). O principal efeito da sílica ativa é a redução da permeabilidade do cimento hidratado, mas não necessariamente a redução da porosidade total (NEVILLE, 1997).

Devido à reação pozolânica, há um incremento da resistência dos concreto em idades mais avançadas, reduzindo o tamanho dos poros e a permeabilidade (ACI 226, 1987, TIKALSKY *et al.*, 1988).

A finura da cinza volante apresenta grande influência no desempenho dos concretos. LANE e BEST *apud* ACI 226 (1987) afirmam que a finura é o maior indicador do desempenho da cinza no concreto. Em características como resistência à compressão, resistência à abrasão e resistência ao gelo e degelo, a proporção e a finura da cinza são os parâmetros principais.

A melhoria da resistência do concreto pela cinza volante é atribuída, também, à capacidade de suas pequenas partículas se acomodarem entre as partículas de cimento (NEVILLE, 1997).

Nas primeiras idades as partículas de cinza volante podem ser consideradas

como inertes, sem formação dos produtos de hidratação. A relação água/aglomerante na pasta neste período pode ser considerada como a massa total de água dividida pelo total de cimento, fazendo com que haja um aumento na relação a/c. Aos sete dias, pode ser observado a diminuição do consumo de C-H, devido à reação pozolânica da cinza. Porém, isso só é possível em pastas de cimento com altos teores de cinza volante (55%), conforme FELDMAN et al. (1990). BABU e RAO (1995) constataram que a eficiência da cinza volante nas primeiras idades é devida a sua finura, funcionando como um agregado fino (fíler), e em longas idades há um acréscimo na resistência devido à reação pozolânica. Constataram, também, que a eficiência aglomerante da cinza volante depende da idade e da reatividade pozolânica.

TIKALSKY *et al.* (1988), substituindo de 5 a 35% de cimento por cinza volante, em massa, encontraram que a resistência à flexão dos concretos alcançou um pequeno aumento aos sete dias, para todas as relações a/c+f (f significa *fly ash* – cinza volante). Já a resistência à compressão foi menor que o de referência. Mas, neste estudo, os percentuais substituídos, ao longo do tempo (até 91 dias), promoveu um crescimento significativo tanto na resistência à compressão, quanto na resistência à flexão.

A resistência à compressão e o ganho de resistência do concretos com cinza volante são afetadas pelas características da cinza (BOUZOUBAË *et al.*, 1999), pelo tipo de cimento e suas proporções no concreto (BERRY *et al.*, 1980, ACI 226, 1987).

A adição de escória de alto forno também proporciona melhorias nas propriedades do concreto. Os efeitos benéficos da adição de escória de alto forno são devidos à microestrutura mais densa da pasta de cimento hidratada. Mais espaços dos poros são preenchidos com C-S-H, o que diminui a permeabilidade e causa um aumento das resistência a longas idades (NEVILLE, 1997). Porém, não altera significativamente a relação entre resistência à compressão e resistência à tração na flexão (JSCE *apud* NEVILLE, 1997).

A substituição de 30%, em massa, de cimento por cinza de casca de arroz, num concreto de relação a/c - água/cimento igual a 0,60, proporcionou um ganho de 5% de resistência aos 7 dias e 8% aos 28 dias em relação ao concreto de referência (METHA *et al.*, 1978). METHA (1977) já alertava para o uso desta pozolana, devido à grande quantidade de cinza produzida contendo sílica reativa na queima da casca

do arroz. O referido pesquisador propôs produzir cimento com cinza de casca de arroz devido às características apresentadas.

ZHANG *et al.* (1996) realizaram um estudo com substituição de 10% do cimento por cinza de casca de arroz, encontrando uma diminuição dos índices de Ca(OH)_2 devido à reação pozolânica e uma redução da porosidade na zona de transição, que contribuíram para a redução da zona de interface entre pasta e agregados, com um conseqüente aumento da resistência.

A utilização de adição da escória de cobre moída (num tempo de moagem de 60 min.) proporcionou um aumento na resistência à compressão, na resistência à tração por compressão diametral e na tração na flexão em todas as idades. Com o aumento da relação a/c, a influência da adição foi mais significativa (MOURA, 2000),

4.3 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).

4.3.1 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 filer 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 fíler 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 fíler 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 fíler 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 fíler 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 filer calcáreo, há formação do carboaluminato monocálcico (SAWICZ e HENG, 1996).

4.3.2 Efeito nas Propriedades do Concreto no Estado Endurecido

Os filers 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 filers 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, porém o ganho na resistência à tração não será proporcional.

No concreto endurecido, a presença de materiais finos pode ser benéfico 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 filer 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.

Fílers 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)*⁷, 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.

Um aspecto que relaciona a sinergia do efeito físico e químico da adição na matriz cimentícia, é o fator de eficiência da adição. Segundo BABU e RAO (1993), BABU e RAO (1995, p. 466) o fator de eficiência de uma pozolana (K) “*é definida como o número de partes de cimento que pode ser substituída por uma parte de pozolana sem mudança na propriedade em estudo.*”

PERA (1996) também discute o fator de eficiência da cinza volante, inclusive mostrando valores para diversos países da Europa.

Para NEVILLE (1997), a tentativa de encontrar o “fator de eficácia” por diversos autores (*relação entre o teor de sílica ativa e os valores de resistência*) não foi considerada válida devido aos diversos fatores que diferem e interagem entre si. Por exemplo o efeito da sílica ativa é influenciado pelo tipo de cimento. Portanto, o fator de eficiência, não só da sílica ativa, mas também das outras adições, depende do tipo de cimento usado, analisando não só a resistência, como também as outras propriedades do concreto.

No entanto, este fator de eficiência pode ser calculado para qualquer adição, seja ela com ou sem reatividade, levando em consideração fatores que agem em blocos, conforme apresentados a seguir.

a) Num bloco são levados em consideração as características da adição: composição química, a atividade, o teor a ser adicionado (quantidade), a finura (diâmetro médio das partículas) , a forma e a massa específica.

O negro de fumo é utilizado como fíler na indústria de plásticos.

- b) Num outro são considerados as características da mistura e o tempo relação água/cimento, tipo de cimento, tipo de agregados, aditivos, e o intervalo de tempo (idade).
- c) O outro bloco está relacionado com as propriedades de engenharia. Nestas propriedades, estão envolvidas as características de cada concreto em função de cada ambiente e do tipo de estrutura.

Levando em consideração todos estes fatores para cada adição, apresentados em vários trabalhos experimentais, poder-se-ia determinar este fator. Esta determinação facilitaria o uso das adições para os concretos nos ambientes desejados.

4.4 PARÂMETROS PARA AVALIAÇÃO DO USO DO RCG COMO ADIÇÃO EM CONCRETOS

Neste trabalho, para a verificação da influência da adição de RCG nos concretos foram determinados parâmetros relacionados ao desempenho do concreto no estado fresco e no estado endurecido.

4.4.1 Para o Concreto Fresco

No estado fresco foi avaliada a influência da adição do RCG na consistência dos concretos através do método do abatimento de tronco de cone, normalizado pela NBR 7223 (ABNT, 1992).

4.4.2 Para o Concreto Endurecido

No estado endurecido dos concretos foram definidos como parâmetros para avaliação propriedades mecânicas e aspectos relacionados à durabilidade.

- Propriedades Mecânicas

Para verificação das propriedades mecânicas foram utilizados também os métodos normalizados pela ABNT:

- Resistência à compressão axial, determinada de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 1994);
- Resistência à tração por compressão diametral, determinada de acordo a NBR 7222 (ABNT, 1994);

- Resistência à tração na flexão, determinada de acordo a NBR 12 142 (ABNT, 1991);
- Aspectos de Durabilidade

A incorporação de adições minerais nos concretos influencia bastante no seu desempenho final, contribuindo para um maior refinamento da estrutura de poros, aumentando a dificuldade de penetração de água e/ou agentes agressivos e podendo diminuir a absorção.

Conforme HELENE (1993), existem como mecanismos para penetração de água no concreto endurecido: a permeabilidade (diferença de pressão com o meio externo), a absorção capilar (diferença de pressão interna), a migração e difusão.

Para avaliação da penetração de água nos concretos com e sem adição de RCG, foram realizados os ensaio de absorção por sucção capilar e absorção por imersão.

Segundo KELHAM (1988), a absorvidade é a penetração de água num concreto não saturado em função da raiz quadrada do tempo. Para BAUER(1995), esta característica avalia um maior ou menor grau de absorção em um determinado tempo. A absorvidade apresenta-se como uma característica muito importante para a verificação da influência de uma adição no concreto, pois os efeitos causados são refletidos nesta característica, ou seja, através da absorvidade pode-se constatar o ganho no refinamento da estrutura de poros promovido pela incorporação da adição. Para GOPALAN (1996), a determinação da absorvidade é de grande importância para a verificação da durabilidade dos concretos. Concretos com baixos valores de absorvidade representam concretos de melhor qualidade, conforme HO *et al.* (1986).

Para avaliação desta característica, utilizou-se o ensaio de absorção por sucção capilar, desenvolvido por KELHAM (1988), o qual baseia-se no monitoramento, ao longo do tempo, do acréscimo na massa aparente de um corpo-de-prova submerso em água e devidamente condicionado. Foram realizados ensaios em concreto com e sem adição de RCG.

Os acréscimos de massa aparente são plotados num gráfico em função da raiz quadrada do tempo, onde após o ajuste das retas, verifica-se as duas fases distintas de absorção de água. A primeira fase é caracterizada pelo período de

absorção e a segunda pelo período de saturação. O ponto exato da passagem do estágio de absorção para o estágio de saturação pode ser chamado de "*ponto de saturação*", onde ocorre uma diminuição da velocidade de absorção, e o acréscimo de massa aparente é muito pequeno em relação à raiz quadrada do tempo. Portanto, para uma mesma amostra ensaiada uma taxa de absorção para a fase de absorção e uma outra taxa de absorção bem menor para a fase de saturação.

A partir dos gráficos de ganho de massa em função da raiz quadrada do tempo, calcula-se a taxa de absorção, resistência capilar e porosidade efetiva. A taxa de absorção, em $g/h^{1/2}$, é obtida através da inclinação da reta ajustada na fase inicial de absorção.

A resistência capilar é obtida através do ponto de interseção entre as duas retas, chamado de ponto de saturação, para GJORV(1994) o "*nick point*". Calcula-se a resistência capilar, em h/m^2 , utilizando a seguinte fórmula (GJORV, 1994):

$$M = t s / e^2 \quad (\text{Eq. 4.4})$$

onde:

M - Resistência capilar (h/m^2)

ts - abcissa do ponto de saturação ($h^{1/2}$)

e - espessura do corpo-de-prova (m)

Como as adições influenciam bastante nas propriedades do concreto endurecido, foi verificada também a influência da adição de RCG na porosidade efetiva dos concretos. Como a porosidade absoluta não se pode medir, pois nem todos os poros estão acessíveis, calcula-se o valor da porosidade efetiva, representam a porosidade aberta dos concretos em avaliação.

Para o cálculo da porosidade efetiva utilizou-se a seguinte fórmula, proposta por KELHAM(1988):

$$P_{\text{efet.}} = (\text{Ganho de Massa} / A \cdot L \cdot \gamma_a) \times 100 \quad (\text{Eq. 4.5})$$

onde:

P_{efet.} -- porosidade efetiva em %;

A - área da seção transversal do corpo-de-prova (cm^2);

L - espessura (cm);

γ_a - massa específica da água (g/cm^3).

Diferente do ensaio de absorção por sucção capilar, o ensaio de absorção por imersão mostra a absorção de um determinado concreto num tempo e seu índice de vazios, através da relação entre a massa seca e saturada da amostra, sem levar em consideração a velocidade desta absorção. Este ensaio foi realizado a frio, conforme a NBR 9778 (ABNT, 1987), com o tempo de permanência de imersão de 96 horas.

CAPÍTULO 5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo será apresentado o programa experimental desenvolvido, que compreende a caracterização do RCG (Resíduo de Corte de Granito) e avaliação da viabilidade técnica do seu uso como adição em concretos. Na caracterização do RCG, foram realizadas análise química, difração de raios X, granulometria laser, MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura), avaliação do potencial de oxidação e risco ambiental. A viabilidade de utilização da adição do RCG nos concretos foi verificada através das propriedades mecânicas (resistência à compressão axial, resistência à tração na flexão e resistência à tração por compressão diametral) e parâmetros de durabilidade (absorção por sucção capilar e absorção por imersão).

Para uma melhor verificação da influência do RCG nos concretos e da interação entre as variáveis relacionadas, foi realizada a análise estatística pela ANOVA para todos os resultados encontrados referentes às propriedades do concreto no estado endurecido. Segundo RIBEIRO (1995), a ANOVA permite verificar a influência das variáveis dentro de seu grupo e entre os grupos, através da média geral e os erros envolvidos. A verificação da significância de uma determinada variável ou grupo de variáveis sobre uma variável dependente é comprovada através da comparação entre um valor calculado ($F_{\text{calculado}}$) e valores tabelados (F_{tabelado}) (distribuição de probabilidades de Fischer). Para que a influência seja considerada significativa, o $F_{\text{calculado}}$ deverá ser maior que o F_{tabelado} . Os valores de F_{tabelado} são em função dos graus de liberdade do grupo e/ou entre grupos e o grau de liberdade do erro, que traduz num determinado nível de significância. Para estas análises, o nível de significância adotado foi de 5%. A ANOVA foi realizada através do **software *Statística***.

O trabalho experimental realizado foi desenvolvido nos Laboratórios de Tecnologia da UEFS e no NORIE - UFRGS.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE CORTE DE GRANITO (RCG)

O RCG utilizado foi fornecido por uma empresa que em seu processo de beneficiamento (serragem de rochas ornamentais) utiliza apenas granitos.

A coleta do material foi realizada segundo a NBR 10007 (ABNT, 1987) - Amostragem de Resíduos, conforme o item 5.1.6, sobre amostragem em montes ou

pilhas de resíduos, numa amostra representativa e com quantidade suficiente para todo o estudo, em torno de 5 m³.

Para caracterização do RCG foram avaliadas suas propriedades químicas, físicas, seu risco ambiental e avaliação da oxidação do Fe presente.

5.1.1 Características Químicas

O conhecimento das características químicas é de fundamental importância para o conhecimento do resíduo e avaliação do desempenho da aplicação em que este foi utilizado. A composição química do RCG, bem como os valores encontrados por outros pesquisadores, estão apresentados na tabela 5.1.

Tabela 5.1 Análise química do RCG utilizado no estudo e resultados encontrados por outros pesquisadores

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO RCG			
TEOR (%)	RCG*	NEVES <i>et al.</i> (1999)	SILVA <i>et al.</i> (1998)
SiO ₂	59,62	68,88	59,95
Fe ₂ O ₃	9,49	3,59	6,05
Al ₂ O ₃	12,77	15,98	10,28
CaO	4,83	1,54	6,51
MgO	1,96	-	3,25
N ₂ O	-	2,42	-
K ₂ O	5,30	4,82	4,48
TiO ₂	-	-	0,92
SO ₃	0,03	-	-
Na ₂ O	2,72	-	3,39
Perda ao Fogo	1,92	-	-

* A análise química foi realizada na ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland.

A partir da tabela 5.1, pode-se afirmar que os diferentes RCG não apresentam muita variação em suas composições químicas, e que os valores encontrados, para o RCG estudado, estão próximos dos encontrados por outros pesquisadores.

Visando identificar a estrutura dos compostos encontrados na análise química, foi realizada análise através da difração de raios X, nos Laboratórios de

Geociências, do curso de Geologia- UFRGS. Os resultados encontrados estão apresentados na figura 5.1.

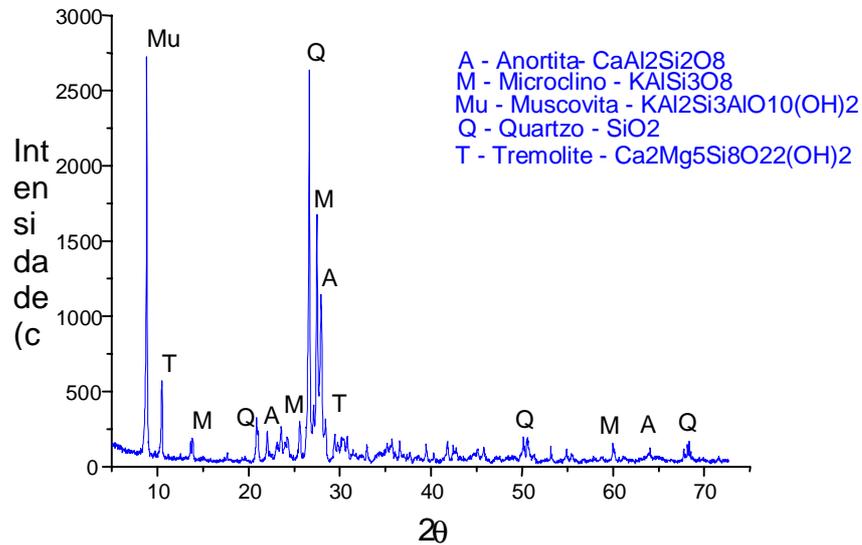


Figura 5.1 – Difratoograma de uma amostra de RCG

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 no difratograma mostra que os compostos químicos presentes no RCG se apresentam tipicamente na forma cristalina.

5.1.2 Características Físicas

As características físicas estudadas foram a massa específica, granulometria e forma dos grãos.

A massa específica, determinada segundo NBR 6474 (ABNT, 1985), é de $2,78\text{g/cm}^3$.

Para utilização do RCG como adição em concretos é imprescindível que suas partículas possuam uma granulometria compatível com os microporos, preenchendo estes interstícios e contribuindo para um maior desempenho dos concretos, o que caracteriza seu efeito filer.

Para determinação da granulometria ótima para utilização do RCG como adição em concretos, foi realizado um estudo com a moagem em tempos diferentes, num moinho de bolas horizontal CT 242 Servitech. O parâmetro de definição foi o diâmetro médio das partículas, determinado através da granulometria a laser. Antes da moagem, há necessidade de secagem do RCG. Esta secagem foi realizada durante 48 horas a uma temperatura de 65°C. O RCG foi moído nos seguintes tempos: 2,5 min. (apenas destorroando); 40min; 50min; 60min; 70min e 80min, constatando-se que o diâmetro médio, em cada tempo moído, não variava muito, de 6,74 a 3,92 μm , conforme a tabela 5.2.

Os resultados de moagem apresentados na tabela 5.2 mostram que com o destorroamento (num tempo de 2,5min) o RCG apresentou um diâmetro médio de 6,74 μm . Conforme análise dos resultados verifica-se que a etapa de moagem, prevista inicialmente, torna-se desnecessária sendo, portanto, eliminada. O destorroamento evita, também, os efeitos negativos causados pela presença de grumos que podem se formar no momento da estocagem e perda de umidade do resíduo.

Tabela 5.2 Diâmetro médio do RCG, por Granulometria laser, em função do tempo de moagem

TEMPO DE MOAGEM (min.)	DIÂMETRO MÉDIO DO RCG(μm)
2,5 (destorroando)	6,74
40	4,50
50	4,36
60	4,24
80	3,92

Visando identificar a forma dos grãos do RCG, foram realizadas na UFRGS(Centro de Microscopia Eletrônica), microscopias com MEV por elétrons secundários, conforme ilustram as figuras 5.2 e 5.3.

A figura 5.2 mostra os grãos de RCG agrupados, fato ocorrido em função da colocação no esmalte durante a preparação.

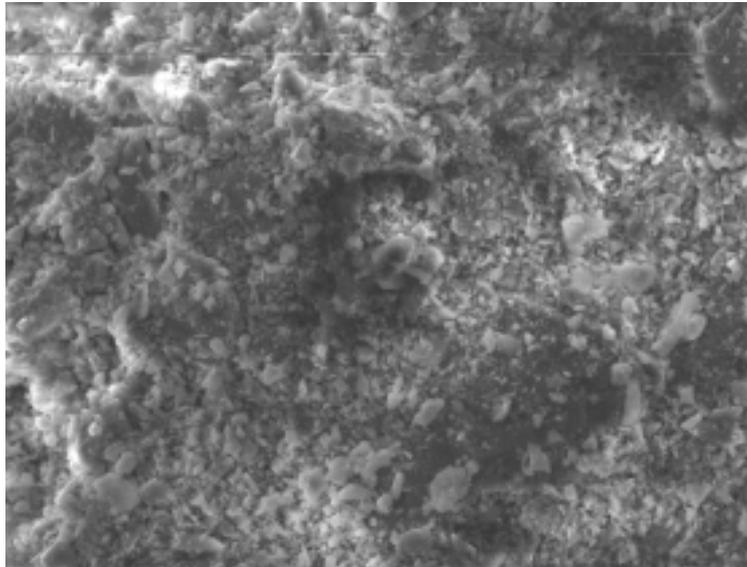


Figura 5.2 MEV por elétron secundário: grãos de RCG agrupados.

Aumento de 100x

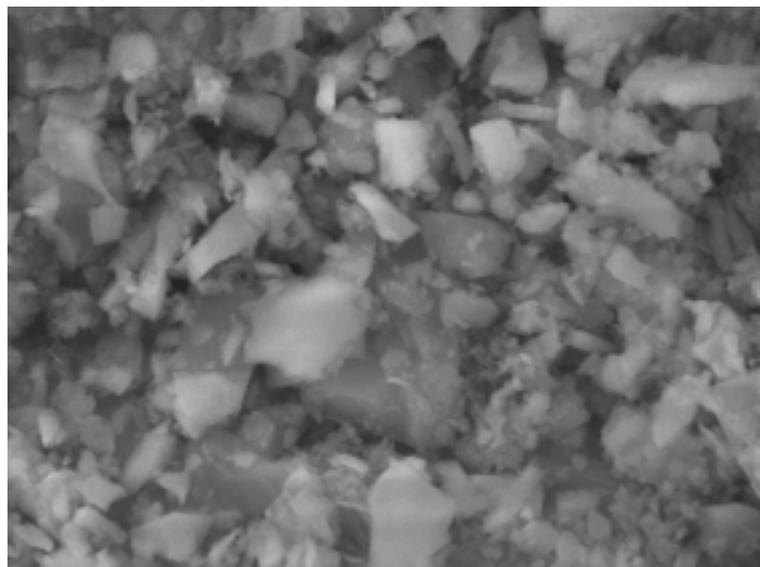


Figura 5.3 MEV por elétron secundário: grãos de RCG separados.

Aumento de 5000x

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, seguramente, ao processo de serragem dos blocos.

5.1.3 Avaliação do Risco Ambiental do RCG

Para avaliação do risco ambiental do RCG foram realizados, na ABCP, os ensaios de lixiviação e solubilização do resíduo de acordo com a NBR 10005 (ABNT, 1987) e NBR 10006 (ABNT, 1987), respectivamente. Os resultados são apresentados na tabela 5.3.

Tabela 5.3 Resultados do ensaio de lixiviação (NBR 10005, ABNT - 1987) e solubilização (NBR 10006, ABNT - 1987) do RCG

Metais Solubilizados			Metais Lixiviados		
Elemento(ppm)	RCG	NBR 10004 (ppm)	Elemento(ppm)	RCG	NBR 10004 (ppm)
		Limites máximos			Limites máximos
Ba	N.D.	1	Ba	0,637	100
Cd (ppb)	N.D.	0,005	Cd	0,16	0,5
Pb (ppb)	N.D.	0,05	Pb (ppb)	N.D.	5
Cr	N.D.	0,05	Cr	0,29	5
Ag (ppb)	N.D.	0,05	Ag	0,0007	5
Cu	0,0024	1	As	N.D.	5
Al	N.D.	0,2	Hg	N.D.	0,1
Fe	0,07	0,3	F	0,391	150
Mn	N.D.	0,1	Se	N.D.	1
Zn	0,011	5	-	-	-
As (ppb)	0,0069	0,05	-	-	-
Hg (ppb)	N.D.	0,001	-	-	-
Se (ppb)	N.D.	0,01	-	-	-
Na	32	200	-	-	-
SO4	8,23	400	-	-	-
Cl	33,7	250	-	-	-
F	3,2	1,5	-	-	-
Fenol	N.D.	0,001	-	-	-
Nitrato	N.D.	10	-	-	-
Cianeto	N.D.	0,1	-	-	-

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.

5.1.4 Avaliação do Potencial de Oxidação

Devido à presença da gralha no processo de serragem dos blocos e a constatação visual da oxidação do ferro contido, foi investigado o potencial de oxidação do Fe presente no resíduo através de DRX em amostras do resíduo recém coletadas e após quatro meses da coleta. Foi verificada, também, a influência do Fe quando adicionado 20% de RCG, em relação a massa de cimento, em argamassas submetidas a ciclos de imersão em solução contendo cloretos e secagem.

5.1.4.1 Avaliação do potencial de oxidação do RCG por difração de raios X

A seguir são mostrados, na figura 5.4 (a) e (b), os resultados das DRX realizadas.

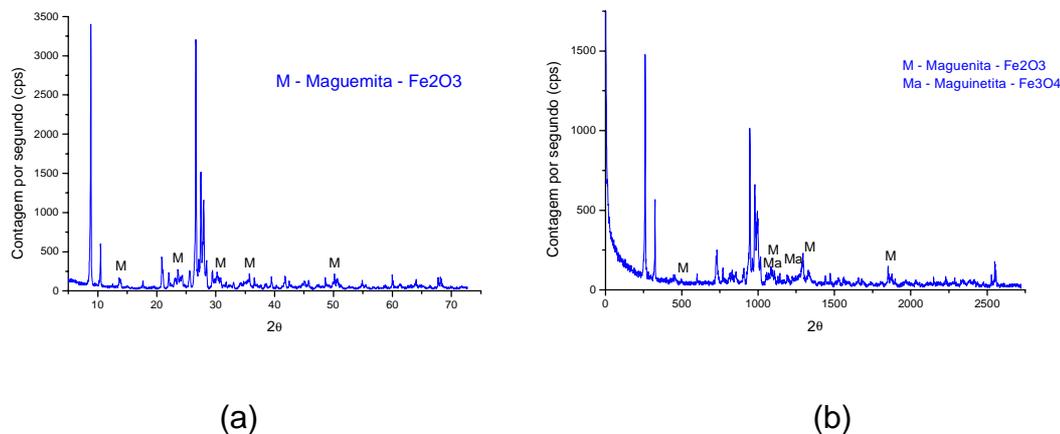
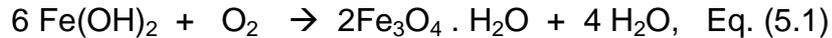


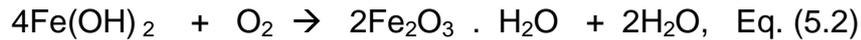
Figura 5.4 Difração de raios X de amostras de RCG: (a) em março/2000 e (b) julho/2000.

A partir dos resultados apresentados nas DRX pode-se observar que o resíduo apresenta uma fração metálica de íons ferro que estão passando de um estado menos oxidado para um estado mais oxidado. No caso, há a formação da maguemita em proporções pouco maiores que a verificada em março, e a formação da maguinetita. Fato comprovado por KOTZ e TREICHEL (1998), ao afirmarem que a química da corrosão do ferro na presença da água e oxigênio é 100 vezes mais rápida que na ausência de oxigênio, e que se não houver oxigênio em abundância, a

continuação da oxidação do hidróxido de ferro II fica limitada pela formação de óxido magnético (óxido misto de FeO e Fe₂O₃), conforme equação 5.1.



Mas, se houver acesso facilitado à penetração do oxigênio e da água, forma-se o óxido de ferro III, conforme equação 5.2.



5.1.4.2 Avaliação do potencial de oxidação do RCG por ciclos de imersão e secagem

A avaliação do potencial de oxidação do Fe contido no RCG em argamassas, foi realizada através da comparação do desempenho entre argamassas sem adição de RCG (referência) e com adição de 20% de RCG, submetidas a ciclos de imersão, em solução contendo 3% de cloretos, e secagem.

5.1.4.2.1 Materiais utilizados

Para confecção das argamassas foram utilizados os seguintes materiais:

a) Cimento

O cimento utilizado foi o Portland comum CP I, sem nenhum tipo de adição, para uma melhor avaliação do desempenho do RCG.

As análises do cimento foram realizadas pelo fabricante, com exceção da massa específica, realizada no LABOTEC – Laboratórios de Tecnologia da UEFS, conforme consta na tabela 5.4.

Tabela 5.4 Composição química, resistência e índices físicos do cimento CP I

Compostos	Teor (%)	Resistência fc(MPa)	
SiO ₂	20,17	Idade(dias)	
Al ₂ O ₃	4,06	1	23,8
Fe ₂ O ₃	3,33	3	29,2
CaO	60,96	7	35,0
MgO	3,54	28	40,2
SiO ₃	3,43	Ensaio Físicos	
K ₂ O	1,1	Início de pega (min.)	100
Na ₂ O	0,09	Fim de Pega (min.)	180
Na ₂ O _{eq}	0,81	Finura #200 (%)	0,8
RI	0,28	Finura #325 (%)	5,3
CaO livre	2,15	Superfície específica (cm ² /g)	3460
		Expansão à quente (mm)	1
PF	0,99	Massa Específica(g/cm ³)	3,11

As análises químicas, físicas e propriedades mecânicas do Cimento CP I estão conforme o padrão da NBR 5732 (ABNT, 1991).

b) Agregado miúdo

Para execução do programa experimental em argamassas foi utilizada areia quartzosa proveniente do rio Guaíba/RS, conforme tabela 5.5

Tabela 5.5 Caracterização do agregado miúdo usado na produção das Argamassas

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA	
Peneira (ABNT)	
Abertura (mm)	% Média Acumulada
6,3	0
4,8	0
2,4	5
1,2	17
0,6	41
0,3	83
0,15	99
<0,15	100
Dimensão Máxima Característica	2,4 mm
Módulo de Finura (NBR 7217)	2,45
Graduação (NBR 7217)	Média
Massa Específica (NBR 9776)	2,624 g/cm ³

5.1.4.2.2 Produção da argamassas e Ensaio de Imersão e secagem

Foram produzidas sem adição de RCG (argamassa de referência) e argamassas com adição de 20% de RCG, em relação à massa de cimento, para cada traço. Como parâmetros de controle, fixou-se a consistência em 255+/- 10 mm, que foi determinada pela mesa de consistência padrão, conforme NBR 13276 (ABNT, 1995). Os traços e valores de consistência encontram-se na tabela 5.6.

Tabela 5.6 Traços de argamassa com respectivas relação a/c e consistência

Traços	a/c	Consistência (mm)
1 : 3	0,43	262
1 : 4	0,52	248
1 : 5	0,65	249
1 : 3 : 0,2	0,48	264
1 : 4 : 0,2	0,55	248
1 : 5 : 0,2	0,68	255

Foram moldados corpos-de-prova 4x4x16cm, sendo 3 para cada traço. A idade de referência para início do ensaio de imersão e secagem foi de 28 dias.

Para avaliação do potencial de oxidação foi realizado o ensaio de secagem e imersão em solução contendo 3% de NaCl (cloreto de sódio) e secagem em painel de lâmpadas. Neste ensaio é feita uma avaliação visual dos corpos-de-prova com vistas a identificar uma mudança de coloração devido à presença dos produtos de oxidação, avaliação do ganho de massa do corpo-de-prova e a sua resistência à tração na flexão após o último ciclo. Inicialmente, quanto maior for o ganho de massa, provavelmente, maior é a quantidade de cloretos retidos, formando o FeCl_3 , e posteriormente, por hidrólise forma o $\text{Fe}_2(\text{OH})_3$ (HELENE, 1986). Este composto pode aumentar até seis vezes de volume do ferro metálico inicial (METHA e MONTEIRO, 1994), podendo acarretar fissuras e desagregação provocando perda de massa.

A metodologia utilizada no ensaio é descrita a seguir:

- a) após os 28 dias de cura, em câmara úmida, os corpos-de-prova de (4x4x16)cm são colocados expostos ao painel, iniciando o ciclo com a secagem. O período de secagem são de seis dias. O painel é composto de lâmpadas com 100W de potência, e é mantido ligado durante 12 horas por dia, alternadas de 6 em 6 horas, a uma distância de aproximadamente 25 cm dos corpos-de-prova, conforme figura 5.5;

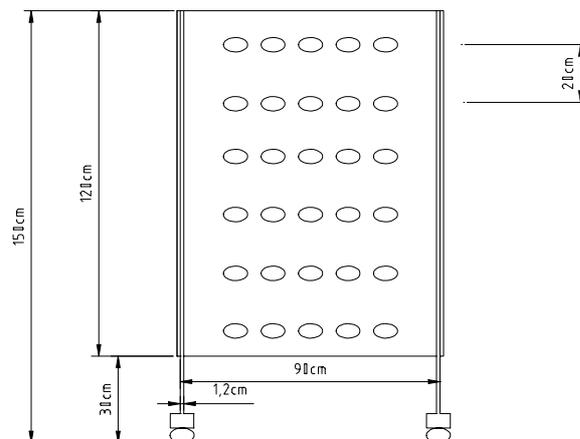


Figura 5.5 Esquema do painel de lâmpadas utilizado para secagem dos corpos-de-prova.

- b) após o sexto dia de secagem, ocorre a primeira pesagem, e em seguida são imersos durante 24 horas numa solução contendo 3% de NaCl. Após a imersão, procede-se todo o ciclo novamente (secagem, pesagem e imersão). Deve-se realizar a avaliação visual a cada início de ciclo e no final do período total do ensaio;
- c) após o último ciclo, os corpos-de-prova são submetidos ao ensaio de resistência à tração na flexão.

Com relação à avaliação visual não houveram diferenças no aspecto dos corpos-de-prova, nem foi percebido nenhum ponto específico com tonalidade característica dos produtos de oxidação do Fe.

Por outro lado, não houve variação nos resultados resistência à tração na flexão com a adição de 20% de RCG nos traços estudados, conforme tabela 5.7, onde cada valor representa a média da resistência de 3 corpos-de-prova.

Tabela 5.7 Resistência à tração na flexão das argamassas com e sem adição de RCG

MISTURA	ftf (Mpa)	CV (%)
1 : 3	5,01	2,0
1 : 4	4,93	1,7
1 : 5	4,07	3,0
1 : 3 : 0,2	4,95	1,5
1 : 4 : 0,2	4,87	2,0
1 : 5 : 0,2	4,11	2,4

A semelhança de comportamento das argamassas quanto à resistência à tração na flexão se explica pelo fato de a adição fíler melhorar muito pouco o empacotamento em argamassas devido a uma melhor uniformidade da matriz cimentícia. Com relação à influência da oxidação do Fe na resistência à tração na flexão, pode-se afirmar que não houve influência. Provavelmente devido aos seguintes fatores:

- pequena quantidade de RCG nas misturas (20% em relação a massa de cimento), sendo que do teor de RCG adicionado, 9,49% são de compostos que contém o Fe;

- dispersão dos produtos de oxidação na mistura, uma vez que o Fe encontra-se disperso;
- possível aumento do volume gerado pelos produtos de oxidação, foi muito pequeno, podendo até colmatar alguns pequenos poros adjacentes que por ventura venham a existir;
- maior dificuldade de penetração dos íons cloretos na matriz devido a uma maior barreira física causada pela presença do RCG.

Com relação à variação de massa, houve um ganho de massa dos corpos-de-prova causado, provavelmente, pela fixação dos cloretos na matriz e fixação de cloretos pelo Fe contido. Este ganho foi maior para relações agregado miúdo/cimento maiores, conforme figura 5.6. Nas argamassas com adição de RCG esse ganho foi menor, provavelmente devido à dificuldade de acesso dos íons cloretos

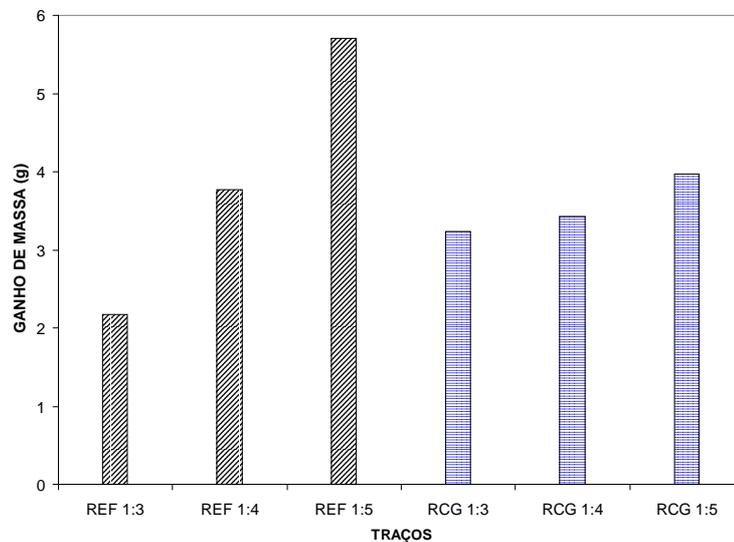


Figura 5.6 Ganho de massa das argamassas no ensaio de secagem e imersão em solução contendo cloretos

Portanto, pode-se afirmar que o Fe presente no RCG está se oxidando. Esta evidência foi comprovada pelas DRXs. Os outros parâmetros avaliados não apresentaram informações sobre o processo de oxidação do Fe contido no RCG.

5.2 AVALIAÇÃO DOS CONCRETOS COM ADIÇÃO DE RCG

5.2.1 Materiais Utilizados

As características dos materiais utilizados para a execução do programa experimental em concreto são descritas a seguir:

5.2.1.1 Cimento

O cimento utilizado foi o Portland comum CP I, conforme descrito no item 5.1.4.2.1.

5.2.1.2 Agregados

a) Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado foi areia média de rio, quartzosa, pouco angulosa, disponível comercialmente.

As características físicas e a distribuição granulométrica estão relacionadas na tabela 5.8.

Tabela 5.8 Caracterização do agregado miúdo usado na produção dos concretos

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA	
Peneira (ABNT)	
Abertura (mm)	% Média Acumulada
6,3	0
4,8	1
2,4	4
1,2	12
0,6	48
0,3	86
0,15	96
<0,15	100
Dimensão Máxima Característica	2,4 mm
Módulo de Finura (NBR 7217)	2,47
Graduação (NBR 7217)	Média
Massa Específica (NBR 9776)	2,630 g/cm ³
Material Pulverulento % (NBR 7219)	1,2

A distribuição granulométrica e índices de qualidade do agregado miúdo estão conforme a NBR 7211(ABNT, 1983).

b) Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado para a confecção dos concretos foi de origem granítica, com as características físicas e distribuição granulométrica apresentadas na tabela 5.9.

Tabela 5.9 Caracterização do agregado graúdo usado na produção dos concretos

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA	
Peneira (ABNT) Abertura (mm)	% Média Acumulada
19	0
	12,5
9,5	100
	6,3
4,8	100
<4,8	100
Dimensão Máxima Característica	19mm
Módulo de Finura (NBR 7217)	7,0
Massa Específica (NBR 9937)	2,710g/cm ³
Absorção (NBR 9777; 9937)	0,60%
Torrões de Argila (NBR 7218)	S/ Presença
Índice de Forma (NBR 7809)	2,64
Massa Unitária (NBR 7810)	1,47g/cm ³

5.2.1.3 Água

A água utilizada para a produção dos concretos foi proveniente dos poços artesianos da Universidade Estadual de Feira de Santana, cujas características atendem a NBR 6118 (ABNT, 1980).

5.2.1.4 Adição

Foi utilizado, como adição, o RCG destorroado em moinho de bolas horizontal, com características descritas no item 5.1.

5.3 DOSAGEM DOS CONCRETOS

Os traços utilizados foram determinados levando em consideração a relação água/cimento e o teor de RCG. Utilizou-se a metodologia de dosagem do IPT/EPUSP, descrita por HELENE e TERZIAN (1992), sendo que os parâmetros de dosagem definidos foram a obtenção de um abatimento de 60 +/- 10mm e do teor de argamassa seca ideal. Para o concreto de referência, cujos traços são apresentados na tabela 5.10, o teor de argamassa seca ideal foi de 50%. Para os concretos com adição, em consequência do aumento da quantidade de finos, a coesão e a consistência foram aumentadas, ocorrendo redução do abatimento. Para manter o abatimento na faixa adotada seria necessário aumentar a relação água / materiais secos, usar algum aditivo plastificante ou ajustar o teor de argamassa seca ideal. O uso de aditivos químicos foi descartado, para evitar a inclusão de mais uma variável. A melhor alternativa foi o ajuste do teor de argamassa seca ideal. Onde os concretos com 10% e 20% de adição ficaram com teores de 49% e 48%, respectivamente, mantendo-se constante a relação água/cimento.

A tabela 5.10 apresenta os traços, em massa, resultantes da dosagem.

Tabela 5.10 Proporcionamento (em massa) e parâmetros de dosagem dos concretos executados

Relação a/c	Teor de adição (%)	Cimento	Ag. Miúdo	Ag. Graúdo	Consumo de cimento (kg/m ³)	Teor de água/materiais secos (%)
0,4	0%	1	1,33	2,32	480	8,6
0,55			2,20	3,20	347	
0,7			3,07	4,07	271	
0,4	10%	1	1,12	2,32	491	8,8
0,55			1,96	3,19	360	
0,7			2,79	4,06	277	
0,4	20%	1	0,91	2,28	505	9,1
0,55			1,69	3,15	364	
0,7			2,49	4,00	284	

A moldagem dos corpos-de-prova de concreto, cilíndricos e prismáticos, foram de acordo as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 1994).

A ordem de colocação dos materiais na mistura, para confecção dos concretos, foi a seguinte:

- a) 100% do agregado graúdo;
- b) 100% da água

- c) 100% do cimento
- d) 100% da adição (quando havia);
- e) 100% do agregado miúdo;

Cada mistura foi confeccionada num tempo de quatro minutos. Porém, no concreto com a/c - 0,40 e com 20% de adição, este tempo se estendeu para 6 minutos, devido ao aumento da coesão e consistência, e uma maior dificuldade de homogeneização da mistura.

Os corpos-de-prova, após moldagem, foram mantidos em câmara úmida até a idade de cada ensaio, com temperatura (23°C +/- 2°C) e umidade relativa (>95%) controladas.

A partir dos resultados de resistência à compressão axial aos 28 dias dos corpos-de-prova moldados, de acordo com os traços mostrados na tabela 5.10, elaborou-se o diagrama da figura 5.7, que mostra as curvas de comportamento dos concretos estudados.

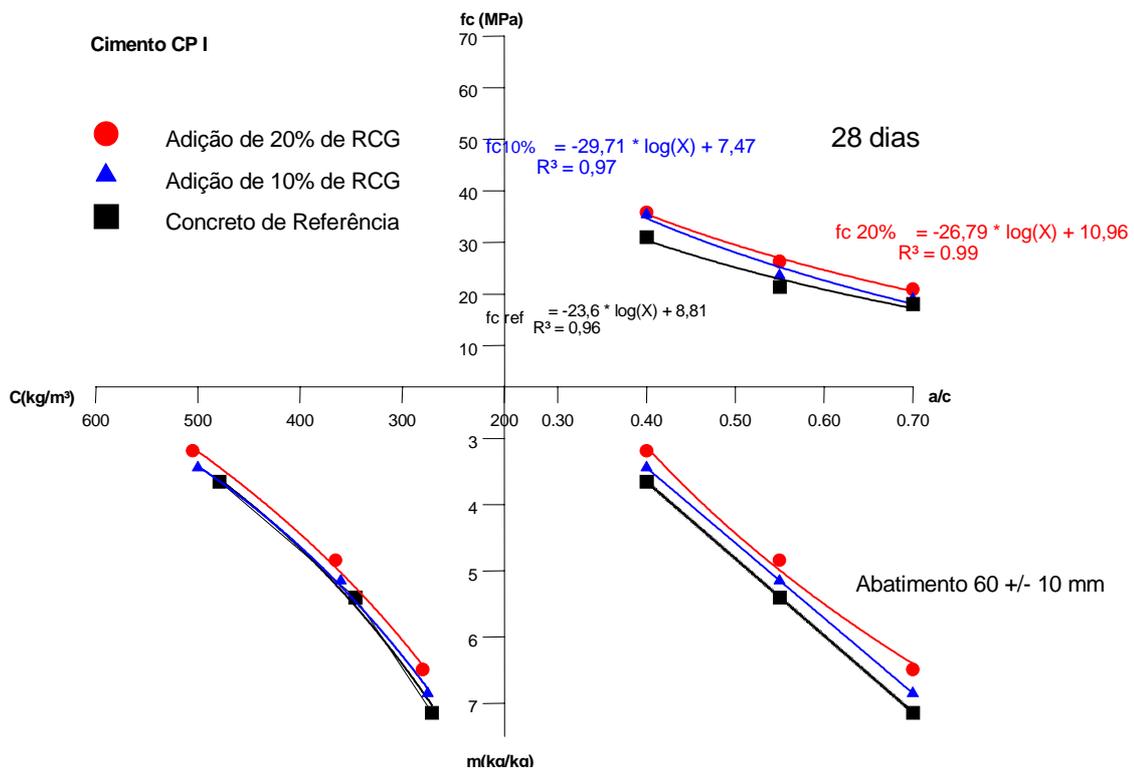


Figura 5.7 Curvas de comportamento dos concretos com e sem adição de RCG

Vale ressaltar, com relação aos consumos de cimento dos concretos produzidos, os de referência apresentaram valores maiores que os concretos com adição de RCG, conforme tabela 5.10. Isto ocorre porque para confecção dos concretos foram fixados alguns parâmetros, como relação a/c, abatimento, teor de argamassa ideal para cada teor, de forma que os consumos de cimento ficaram dependentes destes parâmetros. Não foram fixados níveis de resistência à compressão axial para os concretos estudados. Porém, pode-se observar que a partir das curvas de comportamento dos concretos confeccionados, representadas pela figura 5.7, para níveis de resistência de 15 a 30 MPa, os concretos com adição de RCG apresentaram menores consumos de cimento.

5.4 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

A trabalhabilidade dos concretos foi avaliada através do ensaio de abatimento de troco de cone, conforme NBR 7223 (ABNT, 1992). O abatimento foi estabelecido como uma variável controlada, fixado na faixa de 60 +/- 10 mm. A tabela 5.11 apresenta os resultados dos abatimentos para os concretos.

Tabela 5.11 Abatimentos dos concretos executados

MISTURA		Abatimento (mm)
Teor	a/c	
REFERÊNCIA	0,40	50
	0,55	60
	0,70	55
10% RCG	0,40	50
	0,55	65
	0,70	60
20% RCG	0,40	50
	0,55	65
	0,70	65

Com a adição de RCG nos concretos houve um incremento na coesão e consistência, proporcional ao teor e, conseqüentemente, uma diminuição da exsudação. Este efeito deve-se, principalmente, ao efeito das pequenas partículas

de RCG difundidas pela mistura, que atuam como uma barreira física para o movimento ascendente da água. Este fato pode ser comprovado pela dificuldade de homogeneização da mistura. O comportamento foi conforme esperado. Porque todo material com pequeno diâmetro tem este efeito, conforme abordado por muitos pesquisadores. Por exemplo, CABRERA *et al.* (1998), em seu estudo sobre concretos de alta resistência com cimento com fíler calcário, também encontrou misturas de concretos coesivas e sem indícios de exsudação.

5.5 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

5.5.1 Fatores Avaliados

A partir da caracterização do RCG, foram determinados os fatores a serem avaliados para a viabilidade técnica do uso do RCG, como adição, em concretos.

A avaliação do comportamento mecânico e de durabilidade dos concretos com adição de RCG foi realizado de acordo o programa experimental exposto na tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Resumo do Programa experimental em concretos

CONCRETO							
	Ensaio	Idade	Tipo do CP	a/c			
				0,4	0,55	0,7	
REFERÊNCIA	Resistência à Compressão Axial (NBR 5739)	7	10x20cm	3	3	3	
		28		3	3	3	
		63		3	3	3	
	Resistência à Tração por Compressão Diametral (NBR 7222)	7	10x20cm	3	3	3	
		28		3	3	3	
		63		3	3	3	
	Resistência à Tração na Flexão (NBR 12142)	28	10x10x35cm	2	2	2	
	Absorção por Imersão (NBR 9978)	35	10x20cm	3	3	3	
	Absorção por sucção capilar	28	10x10x2,5cm	2	2	2	
		Ensaio	Idade	Tipo do CP	0,4	0,55	0,7
	10% DE RCG	Resistência à Compressão Axial (NBR 5739)	7	10x20cm	3	3	3
			28		3	3	3
63			3		3	3	
Resistência à Tração por Compressão Diametral (NBR 7222)		7	10x20cm	3	3	3	
		28		3	3	3	
		63		3	3	3	
Resistência à Tração na Flexão (NBR 12142)		28	10x10x35cm	2	2	2	
Absorção por Imersão (NBR 9978)		35	10x20cm	3	3	3	
Absorção por sucção capilar		28	10x10x2,5cm	2	2	2	
		Ensaio	Idade	Tipo do CP	0,4	0,55	0,7
20% DE RCG		Resistência à Compressão Axial (NBR 5739)	7	10x20cm	3	3	3
			28		3	3	3
	63		3		3	3	
	Resistência à Tração por Compressão Diametral (NBR 7222)	7	10x20cm	3	3	3	
		28		3	3	3	
		63		3	3	3	
	Resistência à Tração na Flexão (NBR 12142)	28	10x10x35cm	2	2	2	
	Absorção por Imersão (NBR 9978)	35	10x20cm	3	3	3	
	Absorção por sucção capilar	28	10x10x2,5cm	2	2	2	

5.5.2 Resistência à Compressão Axial

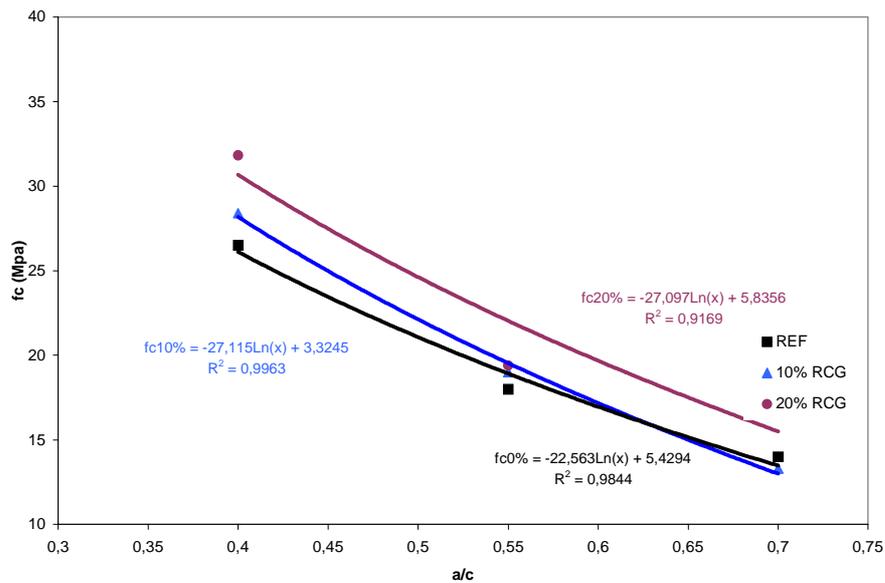
Para a verificação do efeito da adição de RCG na resistência à compressão axial foram moldados três corpos-de-prova cilíndricos por idade. As resistências à compressão foram avaliadas nas idades de 7, 28 e 63 dias, de acordo com a NBR 5739 (1994).

Os resultados de resistência à compressão axial estão apresentados na tabela 5.13.

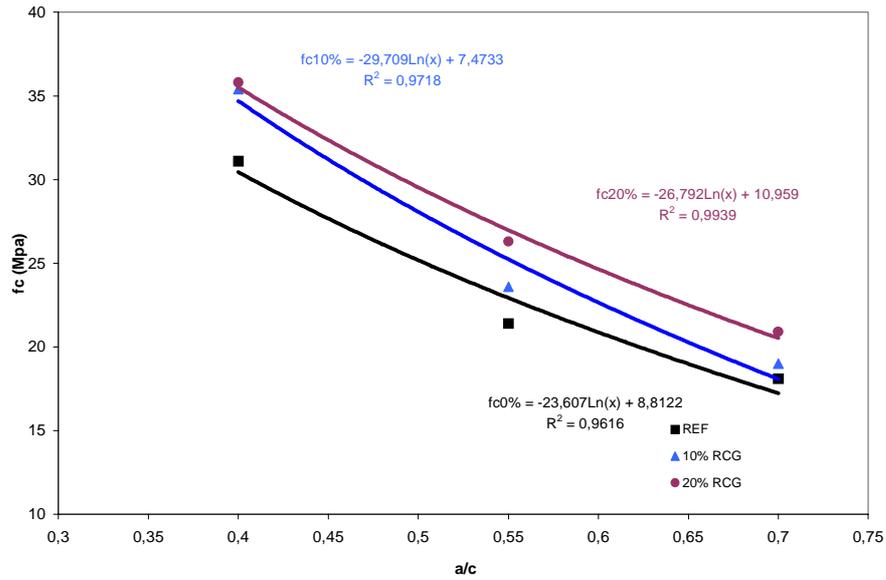
Tabela 5.13 Resistência à Compressão Axial dos concretos

		IDADE (dias)								
		7			28			63		
MISTURA	a/c	fc(MPa)	fcm(MPa)	C.V.(%)	fc(MPa)	fcm(MPa)	C.V.(%)	fc(MPa)	fcm(MPa)	C.V.(%)
REFERÊNCIA	0,40	29,0	26,5	8,4	30,4	31,1	3,1	32,4	33,4	3,7
		24,9			30,7			33,1		
		25,5			32,2			34,8		
	0,55	18,2	18,0	1,1	19,0	21,4	10,2	23,6	23,5	1,5
		17,8			23,2			23,8		
		18,0			22,1			23,1		
0,70	12,2	14,0	11,6	16,9	18,1	6,2	19,3	18,3	5,8	
	15,4			19,1			18,5			
	14,3			18,4			17,2			
10% RCG	0,40	27,9	28,4	5,1	35,4	35,4	1,3	36,4	36,1	2,4
		30,0			35,0			36,7		
		27,2			35,9			35,1		
	0,55	18,3	19,0	6,4	21,8	23,6	6,7	26,1	25,6	5,9
		18,3			24,7			23,9		
		20,4			24,4			26,8		
0,70	14,8	13,3	12,6	18,4	19,0	3,2	19,8	20,3	2,3	
	11,5			19,6			20,7			
	13,7			19,1			20,4			
20% RCG	0,40	32,8	31,8	4,5	35,3	35,8	2,8	39,8	39,4	1,0
		32,5			36,9			39		
		30,2			35,1			39,5		
	0,55	18,7	19,4	4,3	26,0	26,3	1,0	26,3	27,0	2,8
		20,3			26,5			26,9		
		19,1			26,3			27,8		
0,70	16,7	17,0	2,9	20,7	20,9	5,1	22,1	22,1	1,4	
	16,8			22,0			22,4			
	17,6			19,9			21,8			

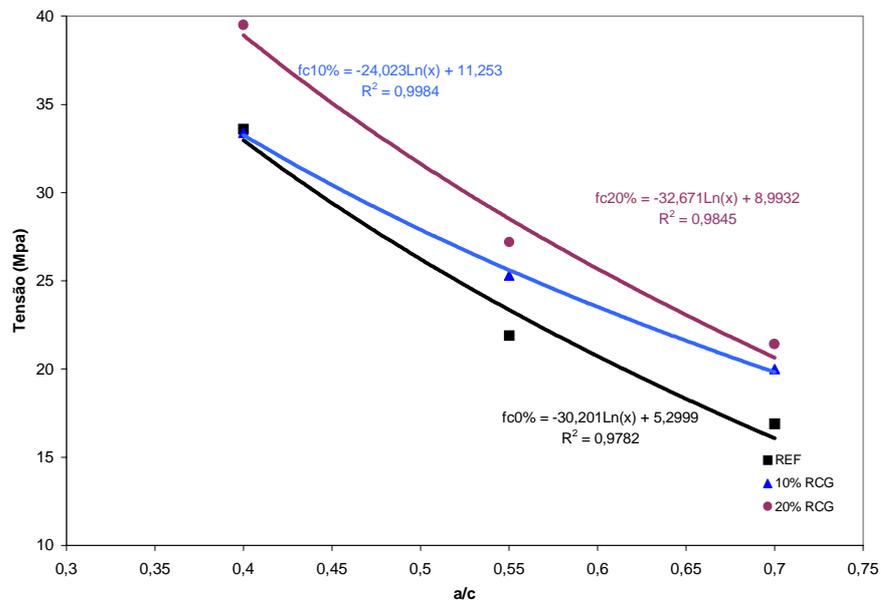
Na figura 5.8 (a), (b) e (c) estão apresentados os gráficos de resistência à compressão axial dos concretos produzidos.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.8 Resistência à compressão dos concretos aos (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 63 dias de idade

Análise dos Resultados

De acordo aos resultados apresentados na tabela 5.13, em relação à resistência à compressão axial, os concretos com adição de RCG apresentaram melhor desempenho.

Através da ANOVA foi constatado a significância estatística das variáveis relacionadas, que são a/c, teor de adição de RCG e idade na resistência à compressão axial. Na tabela 5.14 estão apresentadas a análise de influência dos fatores e suas possíveis interações.

Tabela 5.14 Resultados da ANOVA em relação à resistência à compressão axial dos concretos

Fator	GDL	MQ	Fcalc	F0,05	Significância
1 - Teor de adição	2	120,22	44,76	3,29	S
2 - a/c	2	1591,1	592,37	3,29	S
3 - Idade	2	260,78	97,08	3,29	S
12	4	3,04	1,13	2,66	NS
13	4	3,67	1,36	2,66	NS
23	4	2,44	0,9	2,66	NS
123	8	5,06	1,88	2,24	NS
ERRO	54	2,68	-	-	-

GDL – Graus de Liberdade MQ – Média Quadrada Fcalc – Valor de F calculado

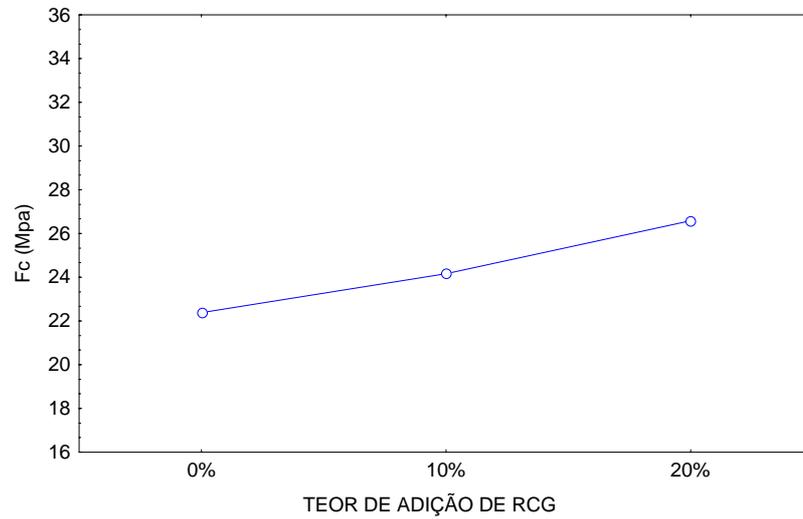
F0,05 – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5% S – Efeito significativo

NS – Efeito não significativo

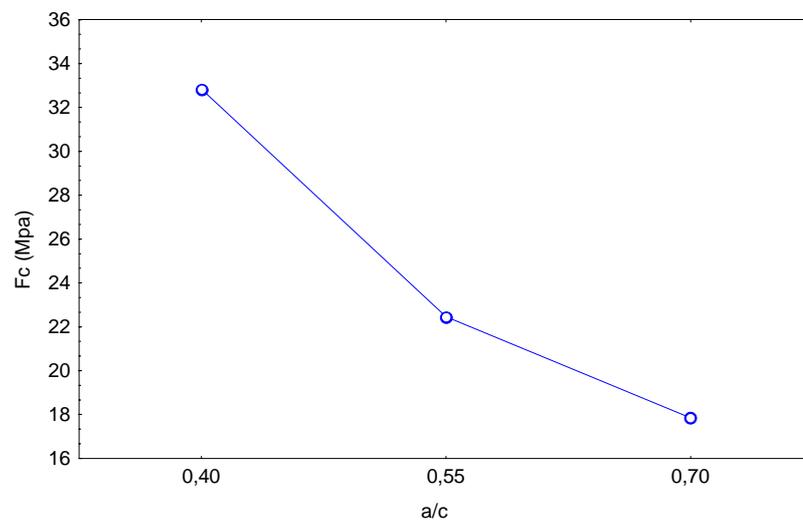
Na tabela 5.14 verifica-se que o teor de adição de RCG, a relação a/c e a idade analisados separadamente possuem efeito significativo sobre a resistência à compressão axial. Porém, não existe interação entre estes fatores, ou seja, não há influência significativa entre o teor de adição e a idade, entre o teor de adição e a relação a/c, entre a relação a/c e a idade.

A inexistência da interação entre o teor de adição e idade significa dizer que a adição não provoca aumentos significativos na resistência à compressão axial ao longo do tempo. Este comportamento é esperado em adições que não possuem atividade pozolânica. MORAES *et al.*(2000) em seu estudo visando identificar a influência da substituição da cinza volante, cinza de casca de arroz e fíler calcário sobre a resistência do concreto, onde o efeito fíler foi menor quanto maior a relação a/c, maior quantidade substituída e não apresentando variação significativa com a idade.

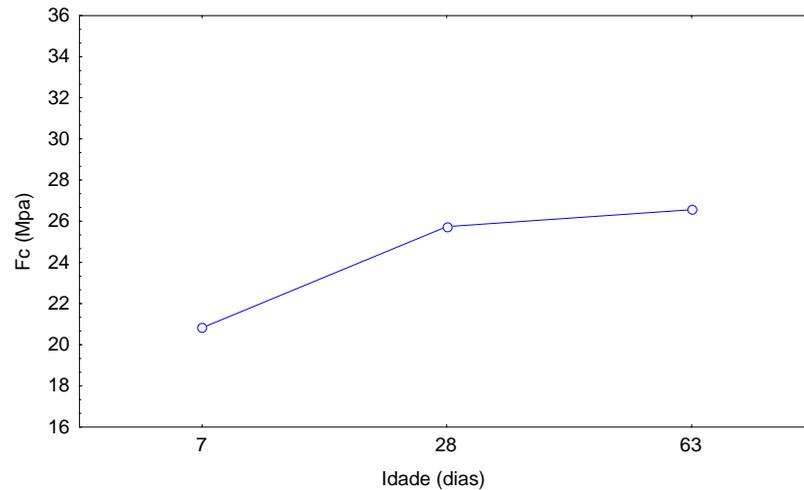
A figura 5.9 mostra o comportamento dos concretos quanto à resistência à compressão axial em função do efeito isolado teor de adição, da relação a/c e da idade.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.9 Resistência à compressão axial dos concretos em função: (a) teor de adição, (b) relação a/c e (c) idade.

Analisando-se isoladamente a influência do teor de adição na resistência à compressão axial verifica-se que os concretos com 10% de adição obtiveram um ganho médio de 8%, enquanto que para os concretos com adição de 20% de RCG houve um aumento médio de 19,6% em relação ao concreto de referência.

Com relação à variação de resistência à compressão axial em função do efeito isolado da relação a/c, os concretos apresentaram menores valores com o aumento da relação, conforme esperado.

A variável idade, analisada isoladamente, também mostrou influência significativa, de forma que para as idades avaliadas os concretos apresentaram um ganho médio na resistência de 22% de 7 para 28 dias, e de 4% de 28 para 63 dias.

Pode-se explicar o aumento do desempenho dos concretos com adição de RCG em função da sinergia dos seguintes fatores:

- a) como o RCG não possui atividade pozolânica, seu efeito físico devido a sua alta finura promoveu um refinamento na estruturas de poros. Este efeito contribuiu para uma maior densificação da zona de transição e da matriz cimentícia, e conseqüentemente um ganho de resistência à compressão. Segundo GOLDMAN e BENTUR(1993), o efeito microfíler é o principal fator para a densificação da zona de transição, contribuindo para um ganho nas propriedades mecânicas nas idades iniciais;

- b) a distribuição das pequenas partículas de RCG em todo concreto, associada à densificação da interface matriz/agregado, fez com que houvesse um preenchimento dos poros existentes e diminuição dos espaços disponíveis para a água. Desta forma, aumentou o contato entre os produtos hidratados e não hidratados da matriz, produzindo o chamado *effect packing*, ou seja, um maior empacotamento da matriz. Este maior contato representou um somatório de pequenas forças resistentes que contribuíram para o aumento da resistência à compressão. CABRERA et al. (1998), no seu estudo de concretos de alta resistência com cimento com fíler calcário, enfatiza que os materiais finos podem alojar-se entre os grãos de clínquer promovendo um melhor empacotamento e uma maior dispersão do mesmo dentro da mistura;
- c) a distribuição dos grãos de RCG também pode ter promovido uma maior dispersão e aceleração da formação de produtos hidratados da matriz cimentícia, por atuarem como pontos de nucleação. Segundo ISAIA (1995), a introdução de pequenas partículas na matriz cimentícia, mesmo não totalmente pozolânicas, provoca segmentação dos poros maiores e incrementa os locais de nucleação para precipitação dos produtos de hidratação, acelerando as reações e formando cristais de hidróxido de cálcio menores.

5.5.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral

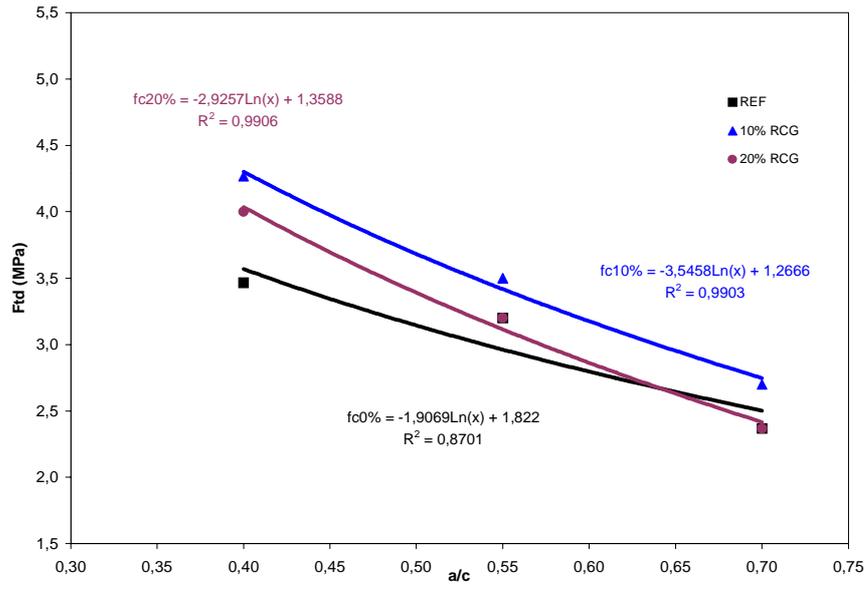
Para a avaliação da influência da adição do RCG na resistência à tração por compressão diametral foram rompidos três corpos-de-prova cilíndricos, para cada traço de concreto, nas idades de 7, 28 e 63 dias, de acordo com a NBR 7222(1994).

A seguir, na tabela 5.15, são apresentados os resultados encontrados.

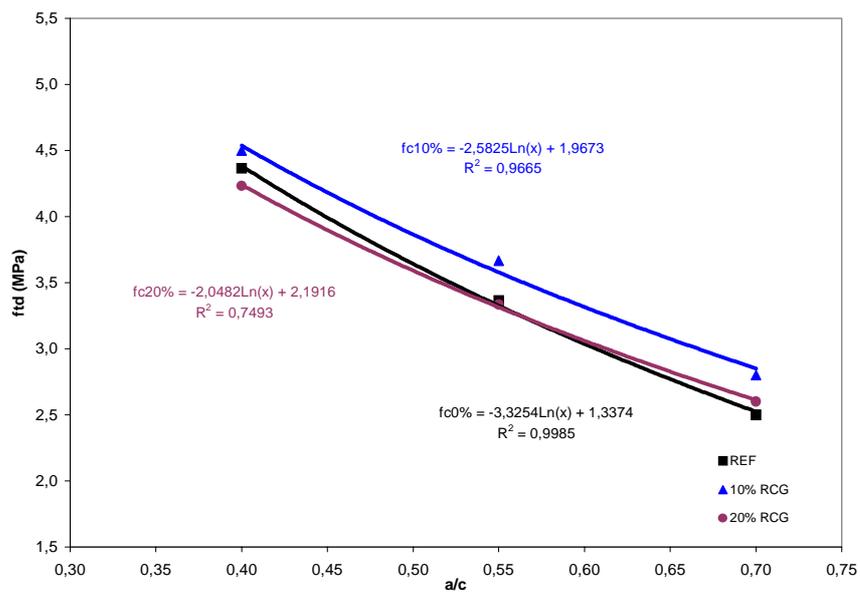
Tabela 5.15 Resultados de resistência à tração por compressão diametral dos concretos

		IDADE (dias)								
		7			28			63		
MISTURA	a/c	ft(MPa)	ftm(MPa)	C.V.(%)	ft(MPa)	ftm(MPa)	C.V.(%)	ft(MPa)	ftm(MPa)	C.V.(%)
REFERÊNCIA	0,40	3,6			4,4			5,0		
		3,4	3,5	3,3	4,4	4,4	1,3	5,3	5,2	3,0
		3,4			4,3			5,2		
	0,55	3,1			3,5			4,2		
		3,3	3,2	3,1	3,4	3,4	4,5	4,0	4,1	2,4
		3,2			3,2			4,1		
	0,70	2,2			2,4			3,5		
		2,3	2,4	8,8	2,5	2,5	4,0	3,9	3,7	5,4
		2,6			2,6			3,7		
10% RCG	0,40	4,2			4,2			5,3		
		4,3	4,3	1,4	4,6	4,5	5,9	4,7	5,1	6,3
		4,3			4,7			5,2		
	0,55	3,4			4,1			4,0		
		3,5	3,5	2,9	3,3	3,7	11,0	4,4	4,4	9,1
		3,6			3,6			4,8		
	0,70	2,9			2,7			4,0		
		2,8	2,7	9,8	2,6	2,8	9,4	3,6	3,8	5,5
		2,4			3,1			3,7		
20% RCG	0,40	4,2			4,1			4,5		
		4,0	4,0	5,0	4,6	4,2	7,6	3,8	4,3	10,1
		3,8			4,0			4,6		
	0,55	3,5			3,3			3,6		
		3,1	3,2	8,3	3,0	3,3	10,5	3,4	3,4	7,5
		3,0			3,7			3,1		
	0,70	2,3			2,8			2,5		
		2,5	2,4	4,9	2,6	2,6	7,7	2,9	2,7	7,6
		2,3			2,4			2,8		

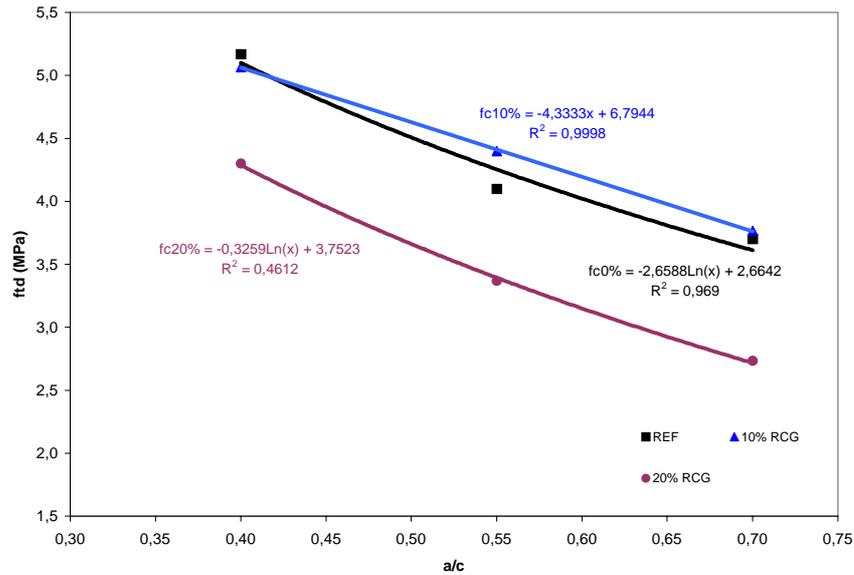
A partir dos resultados apresentados na tabela 5.15 foram elaborados os gráficos de resistência à tração por compressão diametral, para 7, 28 e 63 dias conforme figura 5.10, (a), (b) e (c).



(a)



(b)



(c)

Figura 5.10 Resistência à Tração por Compressão Diametral dos concretos nas idades de (a) 7 dias, (b) 28 dias e (c) 63 dias

Análise dos Resultados

A partir dos resultados obtidos de resistência à tração por compressão diametral para os concretos de referência e com adição de RCG, foi realizada a ANOVA para a verificação da existência da influência das variáveis relacionadas e suas interações na resistência à compressão axial. Na tabela 5.16 consta a análise estatística da interação destas variáveis.

Tabela 5.16 Resultados da ANOVA em relação à resistência à tração por compressão diametral dos concretos

Fator	GDL	MQ	F _{calc}	F _{0,05}	Significância
1 - Teor de adição	2	1,71	29,76	3,29	S
2 - a/c	2	15,96	276,78	3,29	S
3 - Idade	2	4,97	86,17	3,29	S
12	4	0,15	0,25	2,66	NS
13	4	0,73	12,61	2,66	S
23	4	0,12	2,1	2,66	NS
123	8	0,62	1,10	2,24	NS
ERRO	54	0,57	-	-	-

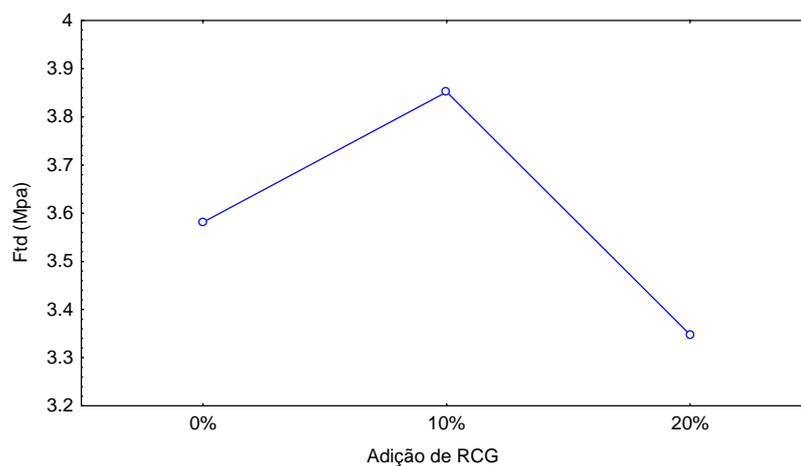
GDL – Graus de Liberdade MQ – Média Quadrada F_{calc} – Valor de F calculado

F_{0,05} – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5% S – Efeito significativo

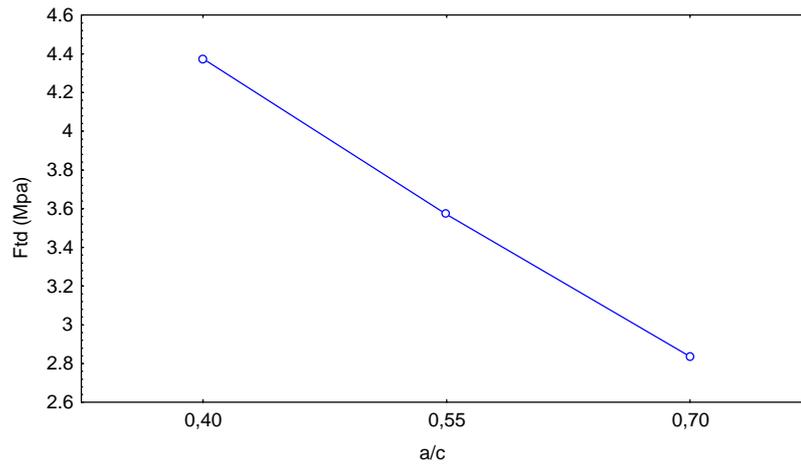
NS – Efeito não significativo

Os resultados da tabela 5.16 mostram que há influência significativa do teor de adição, da relação a/c e da idade na resistência à tração por compressão diametral. Verifica-se ainda que há interação entre o teor de adição e a idade.

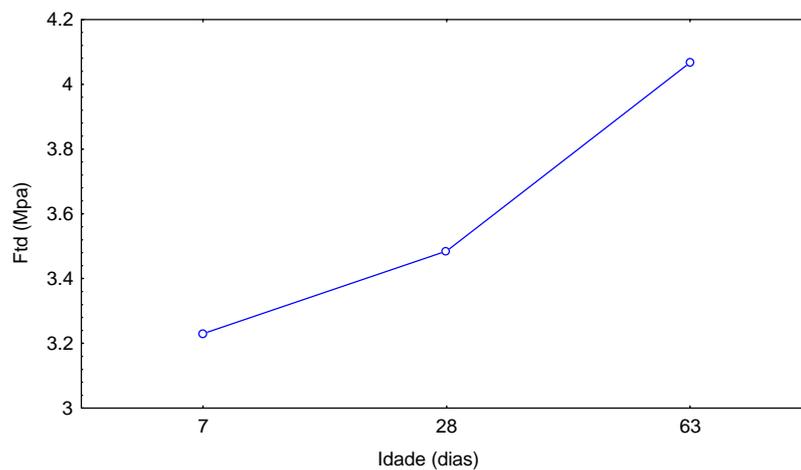
A figura 5.11 mostra o comportamento dos concretos quanto à resistência à tração por compressão diametral em função do teor de adição, relação a/c e idade.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.11 Resistência à tração por compressão diametral dos concretos em função: (a) teor de adição (b) relação a/c e (c) idade.

A partir dos resultados obtidos, pode-se observar que os concretos com 10% de adição de RCG apresentaram melhor comportamento que os concretos com adição de 20%, em relação aos concretos de referência. Os concretos com 10% de adição obtiveram um ganho na resistência à tração por compressão diametral de 7,2%, enquanto que os concretos com 20% um decréscimo de 5,8%, em relação aos concretos de referência. Este comportamento foi diferente do verificado na resistência à compressão axial, em que as partículas de RCG promoveram ganhos nos teores analisados. Isso comprova o efeito fíler da adição no concreto.

Conforme esperado, a relação a/c também influenciou significativamente na resistência à tração por compressão diametral. Os resultados mostram que há um decréscimo da resistência à tração por compressão diametral com o aumento da relação a/c.

Para cada idade avaliada, analisando o conjunto dos resultados, os concretos apresentaram um ganho significativo ao longo das idades, como era de se esperar.

No que se refere a interação entre o teor de adição de RCG e a idade os concretos com 10% de adição obtiveram um melhor comportamento. Com maior ganho na idade de 7 dias. O aumento nas resistências foi de 25,8% de 7 para 63 dias para os concretos com 10% de adição, enquanto que os concretos de referência apresentaram ganhos de 41,4%, conforme figura 5.12. A influência da adição de RCG ao longo das idades, constatada pela interação entre essas duas variáveis, não se caracteriza por uma atividade pozolânica, já que o RCG apresenta uma estrutura bastante cristalina.

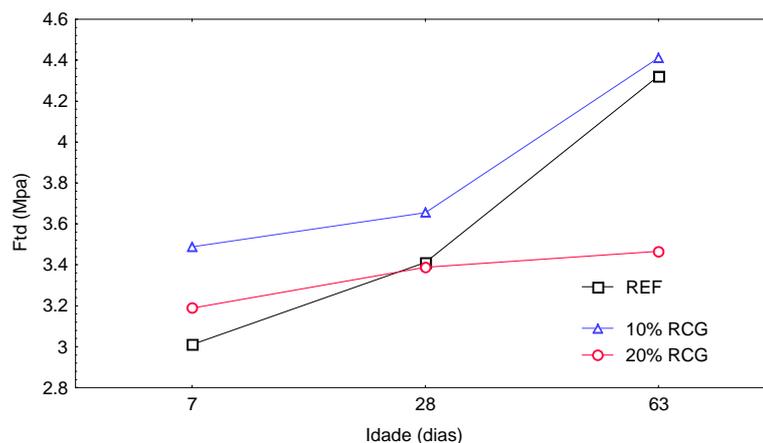


Figura 5.12 Resistência à tração por compressão diametral dos concretos em função da interação entre o teor de adição de RCG e a idade

De acordo os resultados apresentados, os concretos com 10% adição de RCG apresentaram melhor comportamento em relação aos concretos de referência e com adição de 20%. Os concretos com 20% de adição apresentaram desempenho inferior aos concretos de referência.

Como a estrutura dos compostos do RCG 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 fíler, no contato fíler – fíler ou no contato fíler – 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 uma sinergia entre o efeito fíler preenchendo os interstícios, com uma maior quantidade de produtos hidratados menores e mais dispersos, gerados a partir da dispersão das partículas de RCG. Este efeito é evidenciado pelos níveis de resistência dos concretos com adição aos 7 dias.

Com adição de 20% de RCG, esta aceleração do processo de hidratação gerando produtos menores também acontece. Porém, como há uma maior quantidade de partículas de RCG dispersas na mistura, provavelmente há uma maior dispersão dos produtos hidratados. Este fato pode conduzir a uma diminuição da ligação entre os produtos hidratados causando uma deficiência na estrutura da matriz. Isso não acontece com a incorporação da sílica ativa, que além de provocar um refinamento, torna a estrutura de poros dos concretos descontínua (BARATA, 1998).

5.5.4 Resistência à Tração na Flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado segundo a norma NBR 12142 (ABNT, 1991), na idade de 28 dias. Para cada traço de concreto foram moldados dois corpos-de-prova prismáticos, com dimensões 10x10x35cm. Na tabela 5.17 são apresentados os resultados encontrados.

Tabela 5.17 Resultados de resistência à tração na flexão dos concretos produzidos

IDADE (dias)				
28				
Mistura	a/c	ft(MPa)	ftm(MPa)	C.V.(%)
REFERÊNCIA		7,6	8,2	10,3
	0,40	8,8		
		6,3	6,1	4,6
	0,55	5,9		
		4,4	4,1	12,2
10% RCG	0,70	3,7		
		8,0	8,9	14,9
	0,40	9,9		
		6,0	5,7	8,8
	0,55	5,3		
20% RCG		6,1	5,2	24,5
	0,70	4,3		
		9,6	9,1	7,8
	0,40	8,6		
		5,4	5,9	12,0
	0,55	6,4		
	6,5	5,5	27,2	
	0,70	4,4		

A partir dos resultados mostrados na tabela 5.17 dos concretos produzidos com e sem adição de RCG, em relação à resistência à tração na flexão, foi ajustada a curva da figura 5.13.

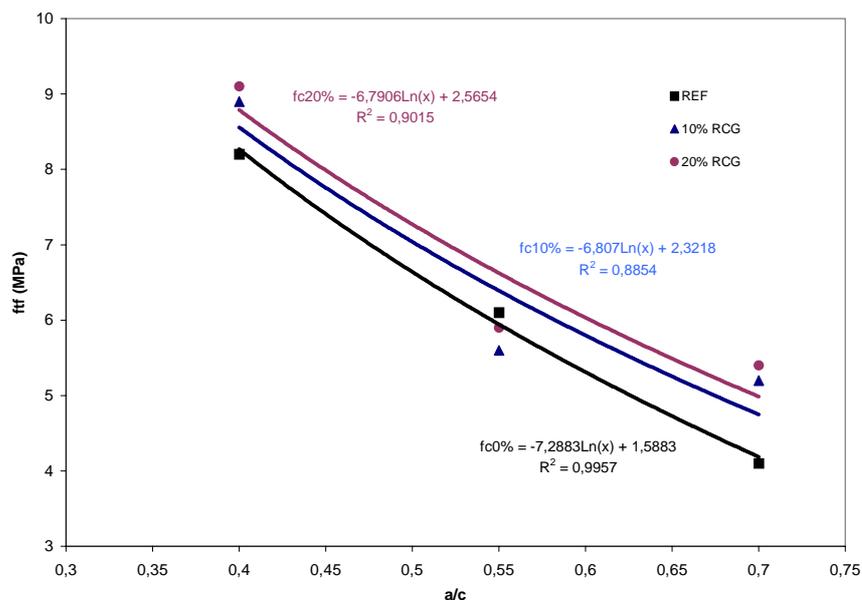


Figura 5.13 Resistência à tração na flexão aos 28 dias, dos concretos produzidos

Análise dos Resultados

Com base nestes resultados, realizou-se a ANOVA para verificação da influência da relação a/c e teor de adição, aos 28 dias de idade.

A tabela 5.18 mostra a análise estatística destas variáveis.

Tabela 5.18 Resultados da ANOVA em relação à resistência à tração na flexão

Fator	GDL	MQ	Fcalc	F0,05	Significância
1 - Teor de adição	2	0,76	0,88	4,26	NS
2 - a/c	2	23,78	27,87	4,26	S
12	4	0,45	0,52	3,63	NS
ERRO	9	0,86	-	-	-

GDL – Graus de Liberdade MQ – Média Quadrada Fcalc – Valor de F calculado

F0,05 – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5% S – Efeito significativo

NS – Efeito não significativo

Os resultados da tabela 5.18 mostram que há influência significativa na resistência à tração na flexão apenas da relação a/c, e que não há interação entre a relação a/c e o teor de adição para os concretos avaliados aos 28 dias de idade.

A figura 5.14 apresenta o comportamento do efeito isolado da relação a/c nos resultados de resistência à tração na flexão dos concretos produzidos.

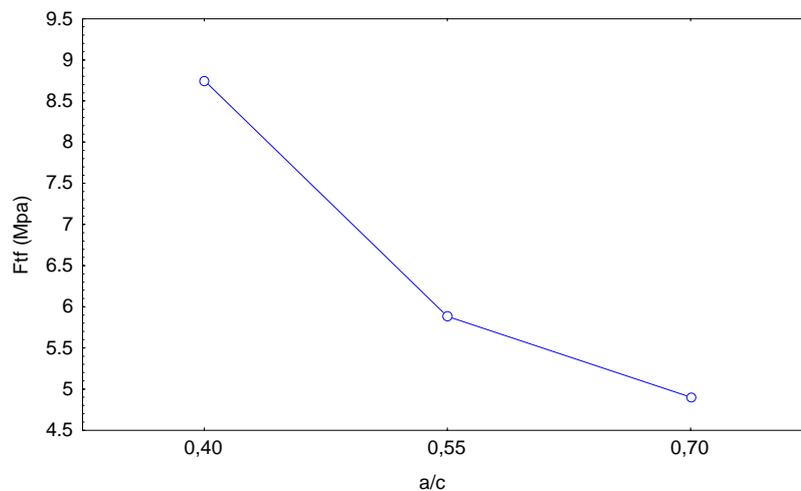


Figura 5.14 Resistência à tração na flexão em função da relação a/c dos concretos produzidos

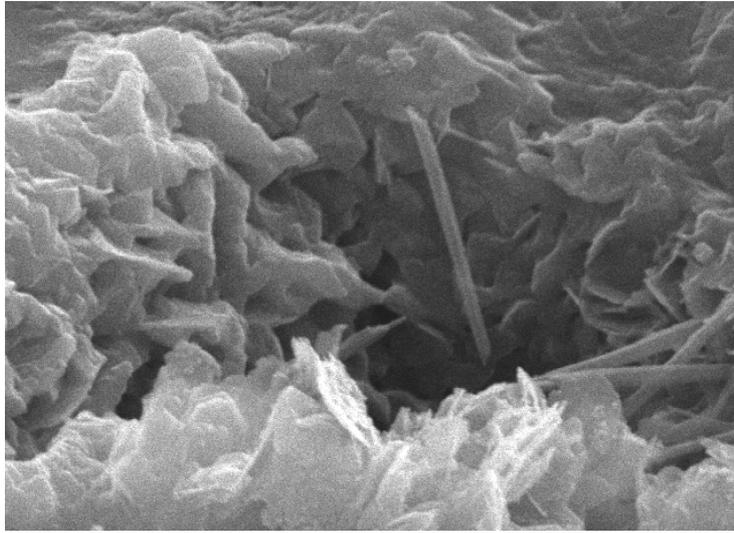
Apesar da variabilidade dos resultados, a relação a/c mostrou-se significativa em função da resistência à tração na flexão, conforme esperado.

Embora não comprovado estatisticamente em função da variabilidade dos resultados, os concretos com adição de 10% e 20% de RCG apresentaram um comportamento semelhante, observando-se um ganho na resistência à tração na flexão em relação ao concreto de referência.

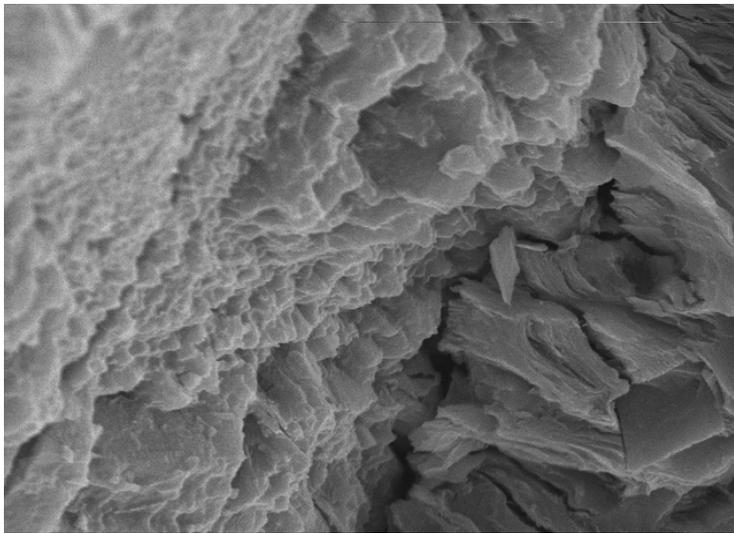
A distribuição das partículas, o refinamento dos poros, a possível dispersão e aceleração da hidratação fizeram com que a resistência aos esforços de tração na flexão nos concretos com adição de RCG se elevassem, porém em proporção inferior ao ganho promovido na resistência à compressão. MOURA(2000), 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 bem menores do que os valores obtidos para resistência à compressão axial, fato atribuído ao efeito fíler 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 fíler 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 fíler calcário.

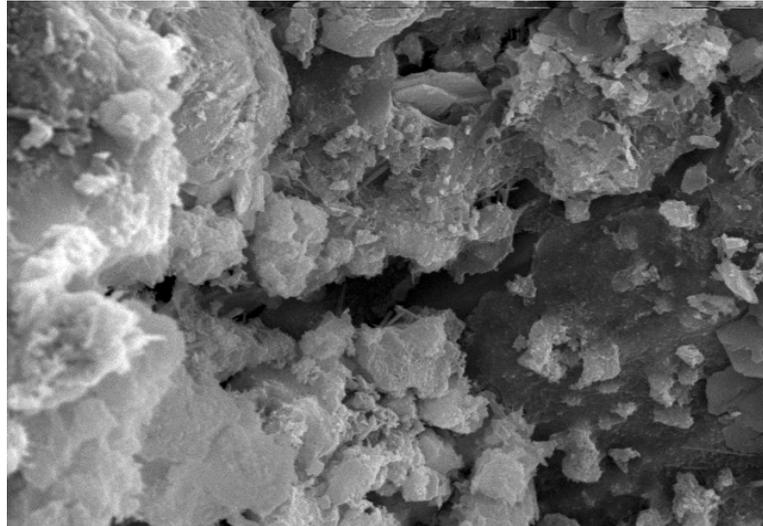
Foram realizadas MEV em amostras de concreto com relação a/c - 0,55 para verificar a possível influência da adição de RCG na zona de transição. A figura 5.15 (a), (b) e (c) apresenta as micrografias dos concretos.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.15 Microscopia Eletrônica de varredura por elétrons secundários (3500X) dos concretos produzidos: (a) Referência; (b) 10% de adição de RCG; (c) 20% de adição de RCG

As micrografias confirmaram a densificação da zona de transição entre matriz e agregado nas amostras analisadas preenchida pelos grãos de RCG.

5.5.5 Absorção por Sucção Capilar

Para avaliação desta característica, utilizou-se o ensaio de absorção por sucção capilar, desenvolvido por KELHAM (1988), o qual baseia-se no monitoramento, ao longo do tempo, do acréscimo na massa aparente de um corpo-de-prova submerso em água e devidamente condicionado. Foram realizados ensaios em concreto com e sem adição de RCG.

Os procedimentos para a realização do ensaio são:

- a) após a cura em câmara úmida, aos 28 dias de idade, de cada corpo-de-prova moldado (100x100x150mm), serra-se uma fatia de 10x10x25mm. Adotou-se a sugestão do GOPALAN (1996) em reduzir a espessura da fatia de 50mm proposta no método do KELHAM (1988), já que pode-se reduzir o período do ensaio, possibilidade de erros de medidas e aumentar a confiança nos resultados. A fatia serrada corresponde à face que ficou em contato direto com a forma, para levar em consideração o efeito parede.

- b) cada fatia serrada passa por um processo de secagem em estufa à temperatura de 100 ± 5 °C, até constância de massa (diferença de 0,1% entre pesagens no intervalo de 24 horas);
- c) após constância de massa, cada fatia teve suas faces laterais seladas com resina epóxi. A colocação de duas camadas do selante garante a impermeabilização lateral, sendo que a segunda com uma resina de viscosidade um pouco menor. Cada fatia impermeabilizada lateralmente foi imediatamente colocada num dessecador contendo sílica gel para mantê-las secas. Teve-se o cuidado de não deixar a resina entrar em contato com as faces da fatia, onde poderá vedar alguns poros, diminuindo a área de absorção;
- d) prende-se na face superior, um mastique, uma tampa plástica contendo uma mangueira de $\varnothing=6,3$ mm e $h=100$ mm, aproximadamente, garantindo uma conectividade entre o ambiente e a face superior do corpo-de-prova, mantendo a pressão atmosférica. A figura 5.16 mostra o desenho esquemático do corpo-de-prova;

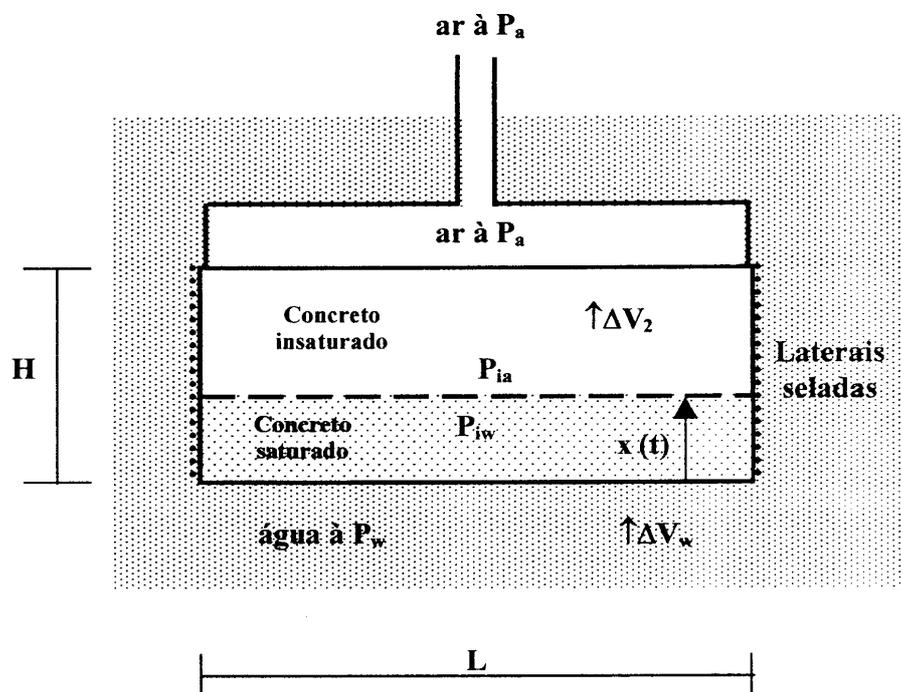


Figura 5.16 Desenho esquemático do corpo-de-prova utilizado no ensaio de absorção por sucção capilar (MOURA, 2000)

- e) estabelece-se os tempos padrões, para determinação das pesagens, de 5, 10, 15, 30, 60min e 2h, 6h, 24h, 48h e 72h. Apesar da redução da espessura da fatia, a partir da sugestão do GOPALAN(1996), poder-se-ia reduzir o tempo de ensaio. Porém, na tentativa de verificação mais clara das fases de absorção e saturação, manteve-se o tempo de ensaio previsto;
- f) após a preparação dos corpos-de-prova, equilibra-se o conjunto (balança e o suporte para as pesagens), tendo o cuidado para que os corpos-de-prova permaneçam devidamente imersos;
- g) monitorou-se a massa aparente durante 72h. O sistema montado possibilitou que mais de um corpo-de-prova fosse monitorado num mesmo período, mas com tempos de início diferentes.

Deve-se padronizar um tempo de 30s a 02min. para a leitura inicial pois, dependendo do concreto, poderá haver uma absorção contínua não dando uma constância momentânea.

Todos os pontos de acréscimo acumulado de massa aparente em cada tempo previsto, foram indicados num gráfico em função da raiz quadrada do tempo. Foram ajustadas retas conforme a regressão linear para a visualização do ponto de saturação.

A seguir são mostrados os gráficos (figuras 5.17 a 5.22) resultantes do ganho de massa em função da \sqrt{t} , para os concretos com e sem adição de RCG. Vale lembrar que para cada traço de concreto foram realizados dois corpos-de-prova.

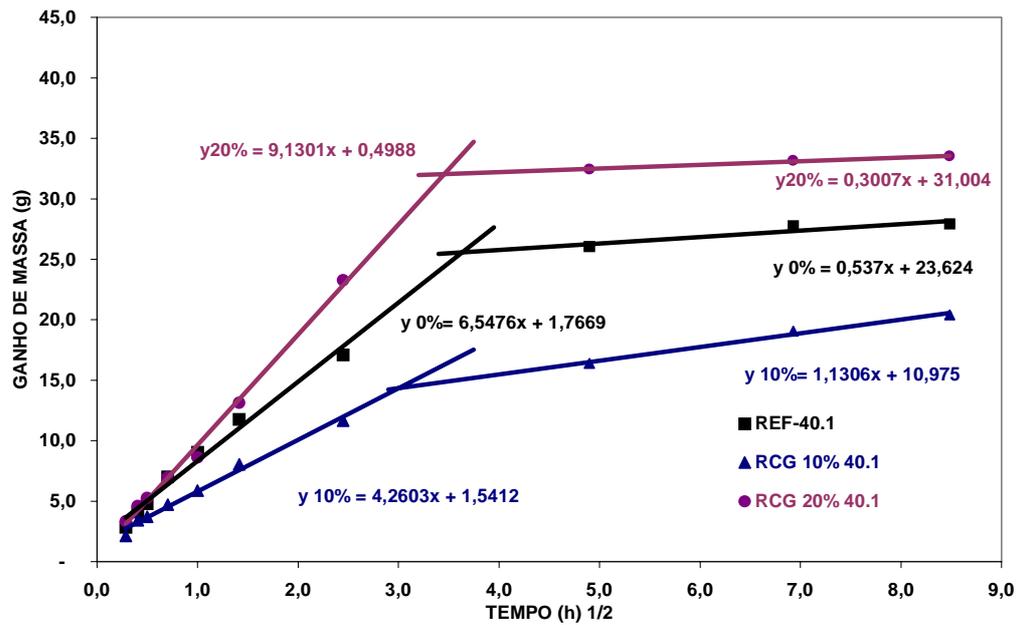


Figura 5.17 Ganho de massa em função da \sqrt{t} do CP 01 para $a/c = 0,40$

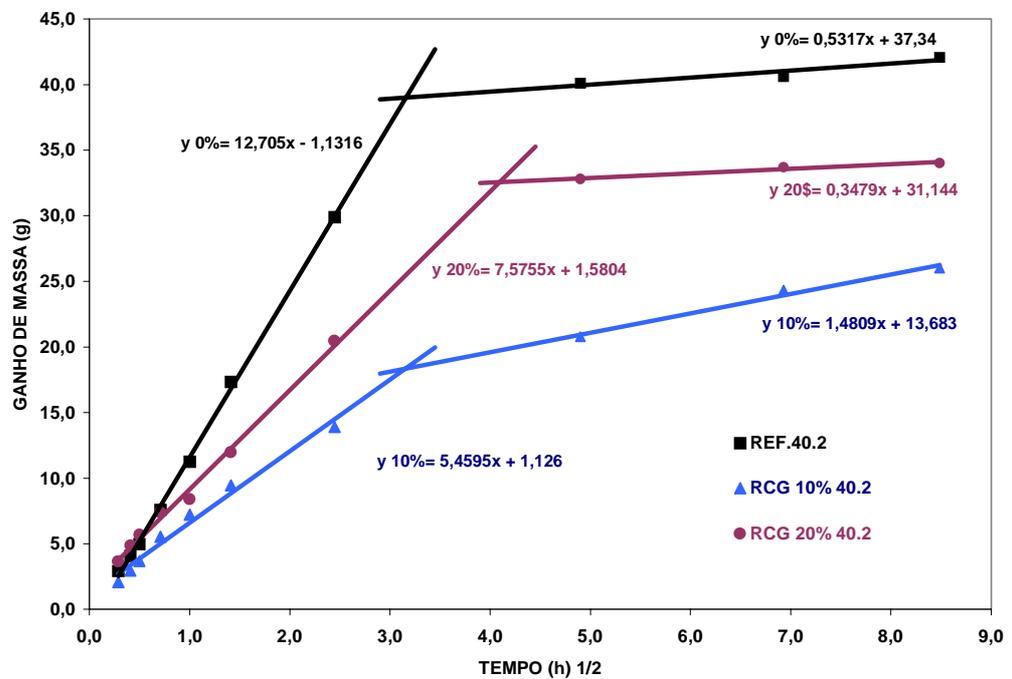


Figura 5.18 Ganho de massa em função da \sqrt{t} do CP 02 para $a/c = 0,40$

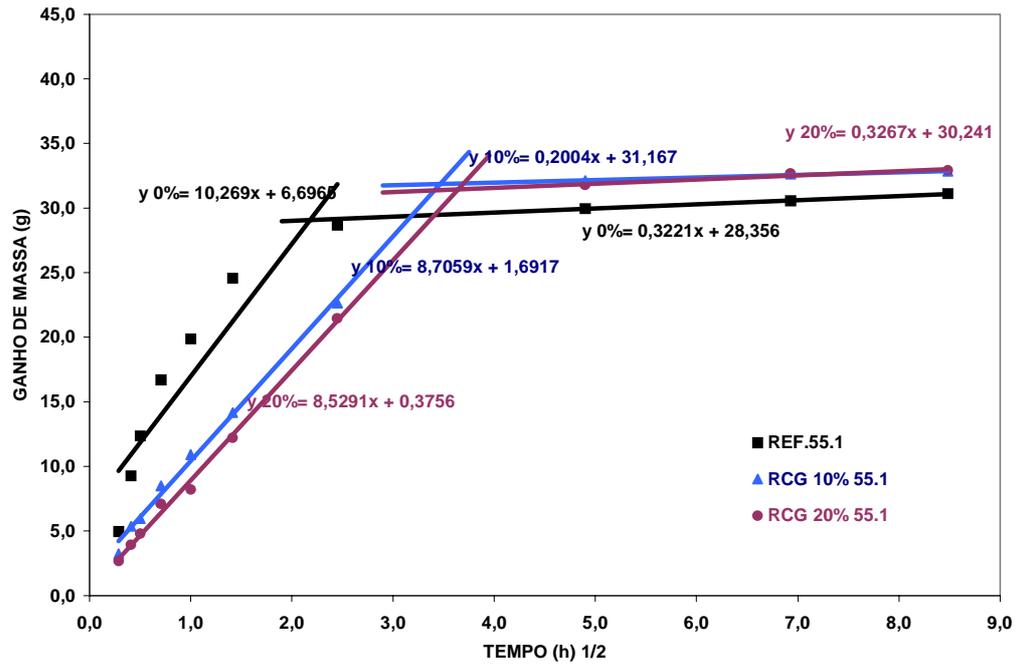


Figura 5.19 Ganho de massa em função da \sqrt{t} do CP 01 para $a/c = 0,55$

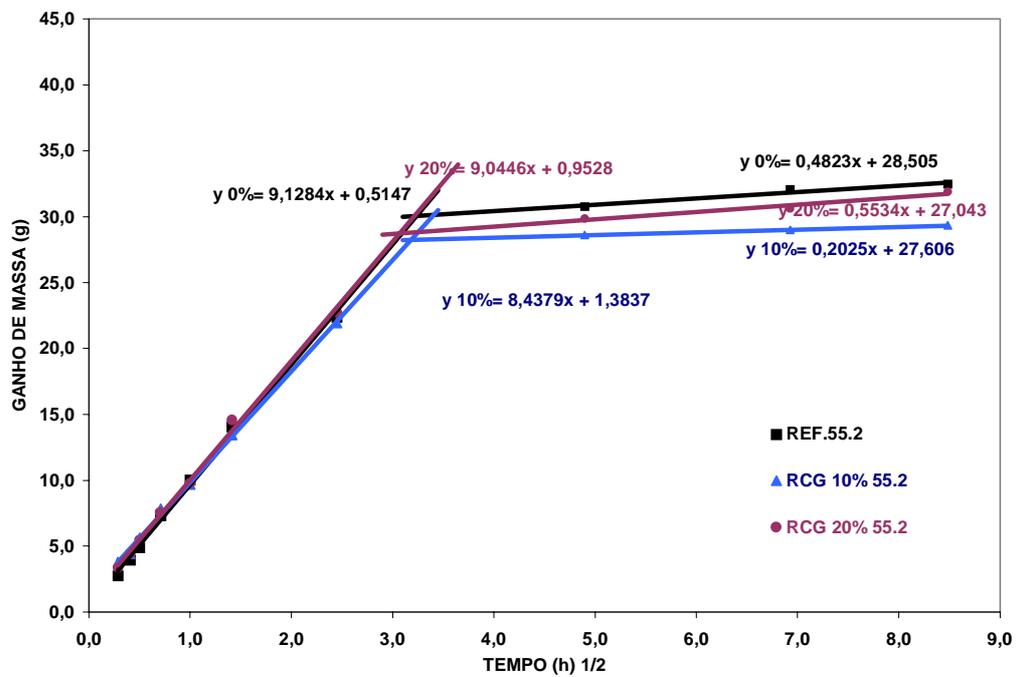


Figura 5.20 Ganho de massa em função da \sqrt{t} do CP 02 para $a/c = 0,55$

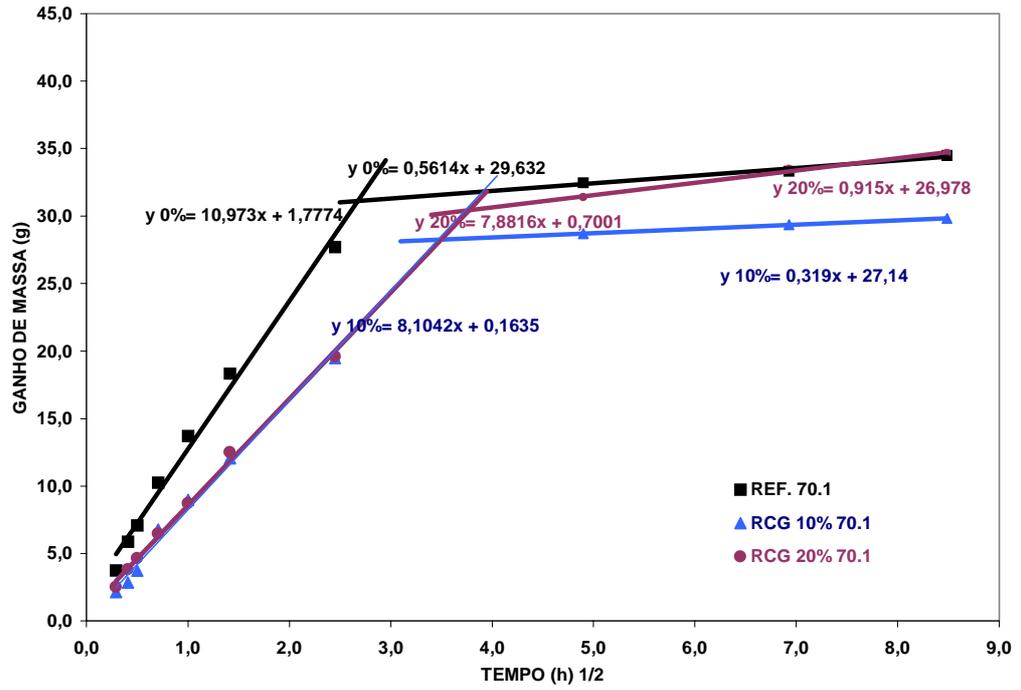


Figura 5.21 Ganho de massa em função da \sqrt{t} do CP 01 para a/c = 0,70

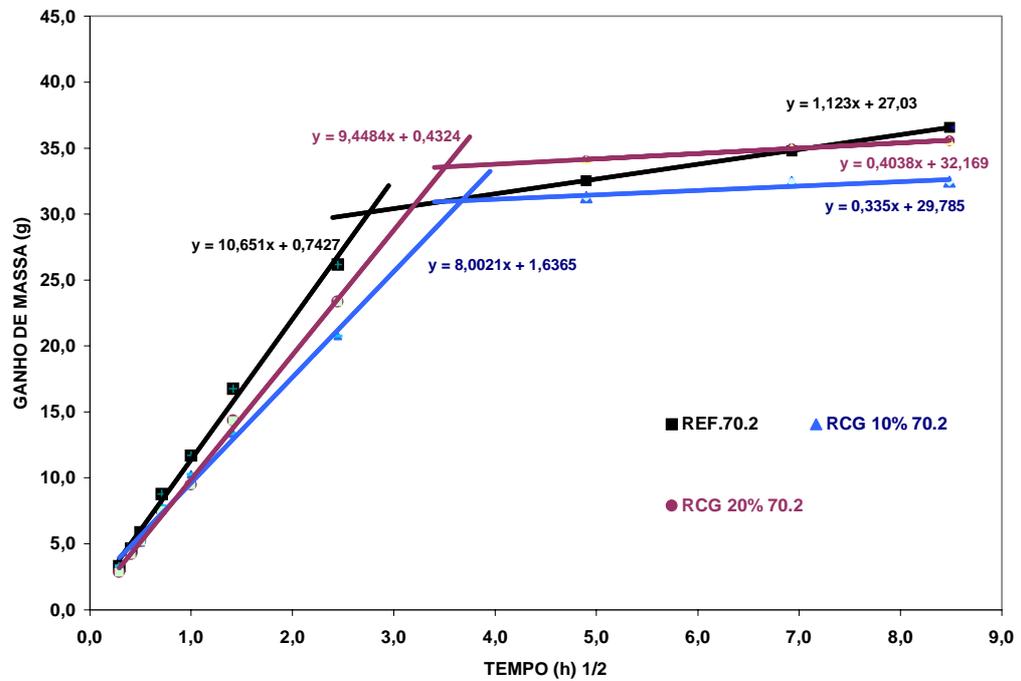


Figura 5.22 Ganho de massa em função da \sqrt{t} do CP 02 para a/c = 0,70

A taxa de absorção, em $\text{g/h}^{1/2}$, é obtida através da inclinação da reta ajustada na fase inicial de absorção.

Através do ponto de interseção entre as duas retas, chamado de ponto de saturação, calcula-se a resistência capilar.

A partir dos gráficos de absorção, o cálculo da taxa de absorção e resistência capilar foram realizados, cujos resultados estão apresentados na tabela 5.19.

Tabela 5.19 Taxa de absorção e resistências capilares dos concretos produzidos com e sem adição de RCG.

CP's	TX DE ABSORÇÃO ($\text{g/h}^{1/2}$)	TX DE ABSORÇÃO média	C.V. (%)	RESIST. CAPILAR h/m^2	RESIST. CAPILAR média	C.V. (%)
REF 0,40 / 01	6,54		45,28	21161,25		19,73
REF 0,40 / 02	12,7	9,62		15980,26	18570,76	
REF 0,55 / 01	10,27		8,31	7584,80		53,33
REF 0,55 / 02	9,13	9,70		16768,08	12176,44	
REF 0,70 / 01	10,97		2,09	11357,53		4,63
REF 0,70 / 02	10,65	10,81		12126,27	11741,90	
RCG 10% 0,40 / 01	4,26		17,33	14537,28		8,73
RCG 10% 0,40 / 02	5,45	4,86		16449,64	15493,46	
RCG 10% 0,55 / 01	8,70		2,15	19215,17		11,94
RCG 10% 0,55 / 02	8,44	8,57		16224,05	17719,61	
RCG 10% 0,70 / 01	8,10		0,88	19210,51		8,16
RCG 10% 0,70 / 02	8	8,05		21562,27	20386,39	
RCG 20% 0,40 / 01	9,13		13,21	19099,87		23,45
RCG 20% 0,40 / 02	7,57	8,35		26693,8	22896,84	
RCG 20% 0,55 / 01	8,53		4,11	21211,34		23,78
RCG 20% 0,55 / 02	9,04	8,79		15104,98	18158,16	
RCG 20% 0,70 / 01	7,88		12,74	22770,96		10,23
RCG 20% 0,70 / 02	9,44	8,66		19698,53	21234,75	

Devido à variação dos resultados apresentados em alguns corpos-de-prova de uma mesma amostra de concreto, adotou-se, para uma melhor e mais sólida análise estatística, o conceito de tempo de saturação potencial, ou seja, é o tempo necessário para que se inicie o estágio de saturação das amostras analisadas. Sendo este tempo maior quanto mais refinada for a estrutura de poros do concreto em análise.

Os resultados com a taxa de absorção potencial, a resistência capilar potencial e os tempos de saturação dos concretos estão na tabela 5.20.

Tabela 5.20 Taxa de absorção e resistências capilares potenciais dos concretos produzidos com e sem adição de RCG.

CONCRETOS	TEMPO SATURAÇÃO POTENCIAL (h)	TX DE ABSORÇÃO Potencial(g/h ⁻¹)	RESIST. CAPILAR n/m ²
REF 0,40	13,23	6,54	21161,25
REF 0,55	10,43	9,13	16768,08
REF 0,70	7,61	10,65	12126,27
RCG 10% 0,40	10,28	5,45	16449,64
RCG 10% 0,55	10,14	8,44	16224,05
RCG 10% 0,70	12,01	8,10	19210,51
RCG 20% 0,40	16,36	7,57	26693,8
RCG 20% 0,55	13,25	8,53	21211,34
RCG 20% 0,70	12,31	9,44	19698,53

Análise dos Resultados da taxa de Absorção

Com os resultados mostrados na tabela 5.20 realizou-se a ANOVA, encontrando os valores descritos na tabela 5.21 para taxa de absorção.

Tabela 5.21 Resultados da ANOVA em relação à taxa de absorção

Fator	GDL	MQ	Fcalc	F0,05	Significância
1 - Teor de adição	2	3,55	71021,8	4,26	S
2 - a/c	2	13,51	270259,1	4,26	S
12	4	1,11	22321,8	3,63	S
ERRO	9	0,00	-	-	-

GDL – Graus de Liberdade MQ – Média Quadrada Fcalc – Valor de F calculado

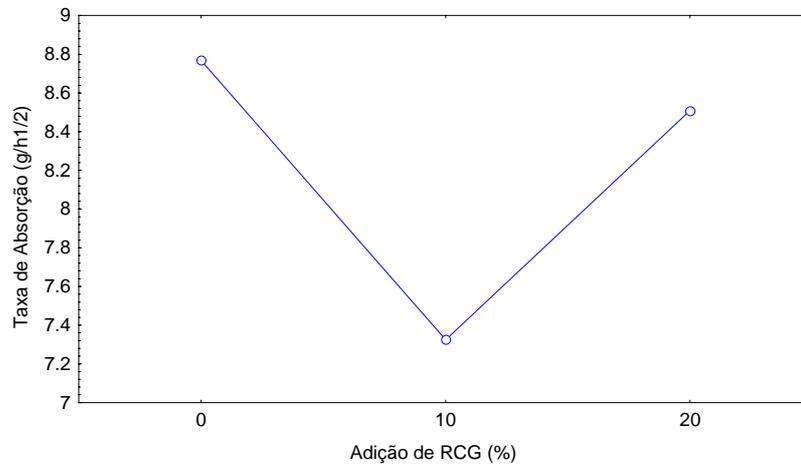
F0,05 – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5% S – Efeito significativo

NS – Efeito não significativo

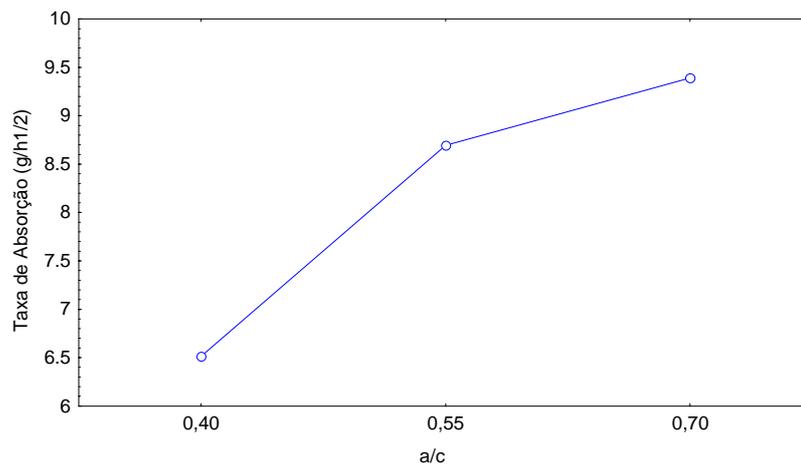
Os valores obtidos através da ANOVA, apresentados na tabela 5.21, constataam que há influência significativa do teor de adição, da relação a/c e a interação entre estas duas variáveis sobre a taxa de absorção dos concretos analisados.

Nas figuras 5.23 (a) e (b) apresenta-se o comportamento do efeito isolado do teor de adição e relação a/c nos resultados de taxa de absorção dos concretos

produzidos. A figura 5.24 apresenta a Influência da interação entre a relação a/c e o teor de adição na taxa de absorção dos concretos



(a)



(b)

Figura 5.23 Taxa de absorção dos concretos em função: (a) teor de adição de RCG, (b) relação a/c

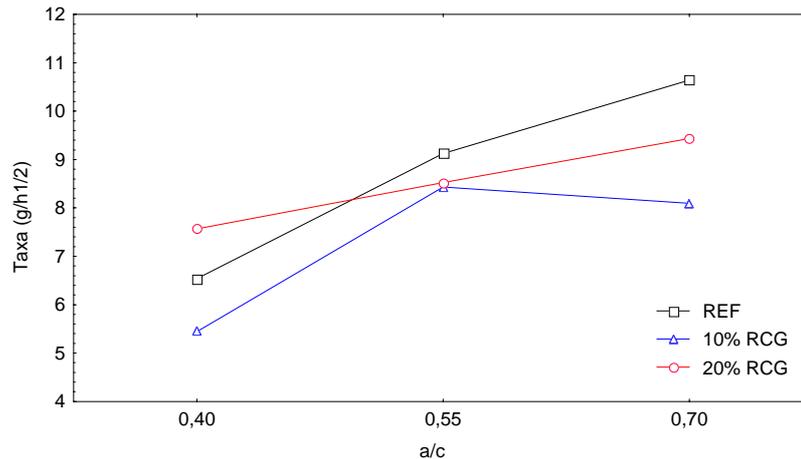


Figura 5.24 Influência da interação entre a relação a/c e o teor de adição na taxa de absorção dos concretos

Com relação ao teor de adição, relacionando-se todos valores obtidos, há uma redução significativa da taxa com adição de 10% de RCG de 20,2% aproximadamente. Porém, houve um aumento com adição de 20%, em relação ao concreto com teor de 10%, conforme figura 5.23 (a). Fato explicado pelo preenchimento dos poros causados pelas partículas da adição, ocasionando uma barreira física ao movimento ascendente da água. Porém com adição de 20% houve um incremento bem maior de finos, causando um maior refinamento da estrutura de poros, formando caminhos preferenciais, favorecendo a absorção por sucção capilar.

A relação a/c também apresentou influência significativa na taxa de absorção, em que, de forma geral, quanto maior for a relação a/c, maior o incremento na taxa, conforme figura 5.23 (b)

MASSAZZA *et al.* (1993), num estudo realizado sobre absorção capilar em pastas e argamassas confeccionadas com cimento Portland e cimentos pozolânicos, afirma que a absorvidade depende da relação a/c. Conforme COUTINHO(1994), a absorção capilar aumenta com o aumento da relação a/c.

MOURA (2000), em seu estudo, verificou que a taxa de absorção capilar para os concretos com adição de 20% escória de cobre diminuiu. Principalmente para relações a/c maiores chegando a reduzir em até 33%, para a relação a/c 0,60. Ele atribuiu a o melhor preenchimento e distribuição dos vazios no concreto com a adição de escória de cobre.

BARATA (1998) verificou que com a adição de 10% de sílica ativa e adição de 10% de metacaulim, as taxas de absorção dos concretos diminuíram 45% e 50%, aproximadamente. Fato atribuído a formação de uma estrutura de poros mais refinada proporcionada pelo efeito das adições utilizadas.

Estudos realizados por BAUER (1995) em concretos com cimento composto de escória de alto-forno constataram que a taxa de absorção capilar é aproximadamente 40% superior a dos concretos realizados com cimento sem escória. O autor atribui este aumento a um maior volume total de poros apresentados pelos concretos com escória de alto-forno.

A interação entre as variáveis relação a/c e teor de adição também mostrou-se significativa, em que os concretos com e sem adição apresentaram o mesmo comportamento: aumento da taxa de absorção com o aumento da relação a/c. E para concretos com adição de 10%, a relação a/c - 0,55 e a/c - 0,70, ao contrário do que se esperava, praticamente não se alterou. O teor de 10% de adição, com relação à taxa de absorção, obteve o melhor desempenho, conforme figura 5.24.

A taxa de absorção está intimamente relacionada com o refinamento da estrutura de poros. A adição fíler promove um maior refinamento desta estrutura devido sua dispersão na mistura, e um preenchimento de vazios. Como não há ligação química entre as partículas de RCG na matriz, neste refinamento há, provavelmente, formação de caminhos preferenciais para o movimento ascendente da água. Porém a barreira física causada pelo preenchimento de vazios faz com que haja um ganho no tempo de saturação.

Segundo COUTINHO (1994), uma elevada percentagem de finos, sem atividade química, favorece ao aumento da absorção capilar.

Análise dos Resultados da Resistência Capilar

A tabela 5.22 apresenta resultados da verificação da influência das variáveis teor de adição e relação a/c, através da ANOVA, em relação à resistência capilar, e a interação entre estas variáveis.

Tabela 5.22 Resultados da ANOVA em relação à resistência capilar

Fator	GDL	MQ	F _{calc}	F _{0,05}	Significância
1 - Teor de adição	2	6,20E+07	1,24E+12	4,26	S
2 - a/c	2	3,20E+07	6,40E+11	4,26	S
12	4	2,07E+07	4,14E+11	3,63	S
ERRO	9	0,00	-	-	-

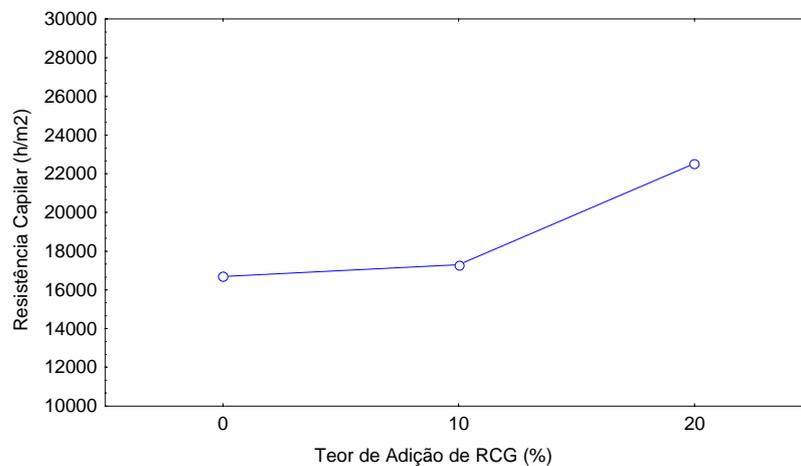
GDL – Graus de Liberdade MQ – Média Quadrada F_{calc} – Valor de F calculado

F_{0,05} – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5% S – Efeito significativo

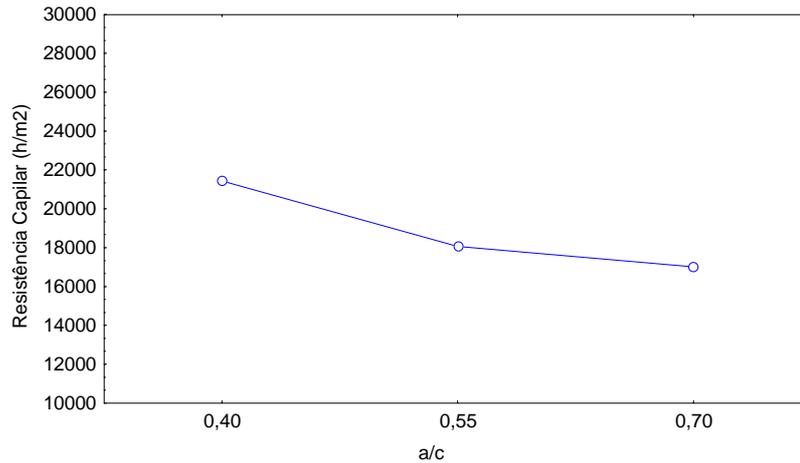
NS – Efeito não significativo

Os resultados da ANOVA mostram que o teor de adição, a relação a/c e a interação entre estas variáveis foram significativas com relação à resistência capilar.

A figura 5.25 (a) e (b) apresenta o comportamento do efeito isolado do teor de adição e relação a/c nos resultados de resistência capilar dos concretos produzidos. A figura 5.26 apresenta a Influência da interação entre a relação a/c e o teor de adição na resistência capilar dos concretos.



(a)



(b)

Figura 5.25 Resistência capilar dos concretos em função: (a) teor de adição de RCG (b) relação a/c

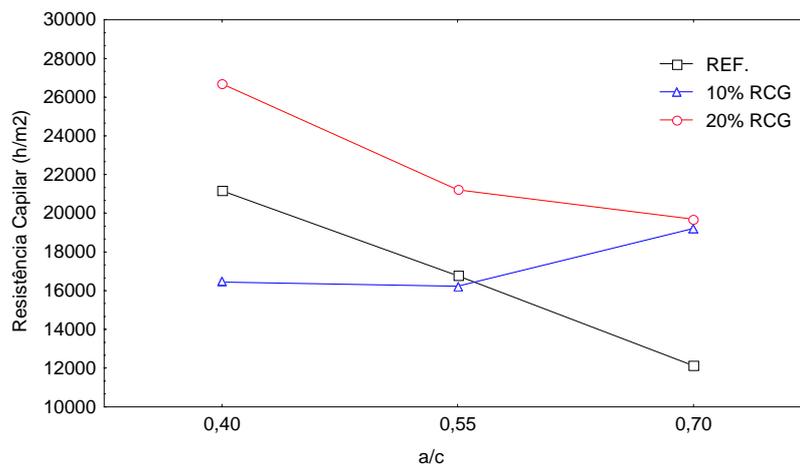


Figura 5.26 Influência da interação entre o teor de adição de RCG e relação a/c na resistência capilar dos concretos

A adição de RCG também promoveu influência significativa na resistência capilar. Com 10% de adição houve um aumento de 9,6%, e com 20% um incremento de 40,3%, em relação aos concreto sem adição. A figura 5.25 (a) ilustra este comportamento. Poder-se-ia esperar uma diminuição da resistência capilar com adição de 20% de RCG devido ao aumento da taxa de absorção e porosidade. Este aumento na taxa de absorção deve-se a um maior preenchimento de vazios e maior refinamento da estrutura de poros contribuindo para formação de caminhos preferenciais, favorecendo a absorção por sucção capilar. O aumento na resistência

capilar deve-se, provavelmente, a maior dificuldade de penetração da água nesses concretos devido a este maior refinamento, fazendo com que o tempo de saturação seja bem maior.

A resistência capilar está relacionada com a dificuldade de penetração da água pela estrutura de poros, esta dificuldade promoverá um aumento no tempo de saturação. Além do tempo de saturação, que é fortemente ligado à taxa de absorção, relaciona-se também com a espessura do corpo-de-prova e com sua porosidade, pois amostras de concretos poderão ter taxas de absorção idênticas e resistências capilares diferentes, bastam que tenham porosidades diferentes.

A adição fíler gera grandes benefícios na resistência capilar, devido ao preenchimento de poros e ao maior refinamento de sua estrutura, pois apesar das taxas de absorção maiores provocadas pelo excesso de finos, há um aumento no tempo de saturação, gerando um ganho na resistência capilar.

Conforme os resultados gerais, dos concretos com e sem adição de RCG, o aumento da relação a/c promoveu uma diminuição da resistência capilar, conforme figura 5.25 (b). Esta diminuição foi de 17,4% da relação a/c - 0,40 para a/c - 0,55, e de 6,86% da relação a/c - 0,55 para a a/c - 0,70. Isso se explica devido ao aumento da porosidade com o aumento da relação a/c.

A interação entre a relação a/c e o teor de adição também mostrou-se significativa, com a diminuição da resistência capilar com o aumento da relação a/c, exceto a relação a/c - 0,55 para a relação a/c - 0,70 dos concretos com 10% de adição, que deveriam seguir o mesmo comportamento. Os concretos com um teor de 20% apresentaram melhor desempenho, conforme figura 5.26.

Nos estudos realizados por MOURA (2000) mostraram que a adição de 20% escória de cobre no concreto proporcionou um aumento de 17%, em média, na resistência capilar. Este aumento foi atribuído a uma melhor distribuição dos poros e uma maior resistência à passagem de líquidos dos concretos com adição,

5.5.6 Porosidade Efetiva

Outro parâmetro calculado a partir do ensaio de absorção por sucção capilar foi a porosidade efetiva, que neste caso será a porosidade efetiva potencial.

Como as adições influenciam bastante nas propriedades do concreto endurecido, foi verificada também a influência da adição de RCG na porosidade

efetiva dos concretos. Como a porosidade absoluta não se pode medir, pois nem todos os poros estão acessíveis, o valor da porosidade efetiva representa o volume total dos poros acessíveis dos concretos em avaliação.

O cálculo da porosidade efetiva foi realizado de acordo o item 4.5.2.

Para o cálculo do ganho de massa foi necessário realizar uma regressão linear para verificação da massa aparente inicial do corpo-de-prova, já que a leitura inicial foi realizada de 30s a 2 minutos de imersão. Esta regressão procedeu-se com os dois primeiros pontos.

A partir dos resultados obtidos com os ganhos de massa de cada corpo-de-prova, calculou-se a porosidade efetiva. Os resultados estão apresentados na tabela 5.23, bem como os resultados de porosidade efetiva potencial.

Tabela 5.23 Resultados dos acréscimo de massa de cada corpo-de-prova e suas respectivas porosidades efetivas

Porosidade Efetiva				
Traço	Acréscimo de massa Unitário (g)	Porosidade (%)		
		Unitário	Média	Potencial
REF 0,40 / 01	28,26	<u>11,30</u>		
REF 0,40 / 02	42,41	<u>16,96</u>	14,13	11,3
REF 0,55 / 01	31,66	<u>12,66</u>		
REF 0,55 / 02	32,77	<u>13,11</u>	12,89	13,11
REF 0,70 / 01	34,93	<u>13,97</u>		
REF 0,70 / 02	36,94	<u>14,78</u>	14,37	14,78
RCG 10% 0,40 / 01	20,65	<u>8,26</u>		
RCG 10% 0,40 / 02	26,26	<u>10,50</u>	9,38	10,5
RCG 10% 0,55 / 01	33,19	<u>13,28</u>		
RCG 10% 0,55 / 02	29,74	<u>11,90</u>	12,59	11,9
RCG 10% 0,70 / 01	30,07	<u>12,03</u>		
RCG 10% 0,70 / 02	32,82	<u>13,13</u>	12,58	12,03
RCG 20%.0,40 / 01	33,89	<u>13,56</u>		
RCG 20% 0,40 / 02	34,42	<u>13,77</u>	13,66	13,77
RCG 20% 0,55 / 01	33,22	<u>13,29</u>		
RCG 20% 0,55 / 02	32,26	<u>12,90</u>	13,10	13,29
RCG 20% 0,70 / 01	34,93	<u>13,97</u>		
RCG 20% 0,70 / 02	35,88	<u>14,35</u>	14,16	14,35

Análise dos Resultados

Com estes resultados foi realizada a ANOVA para verificação do grau de significância do teor de adição, da relação a/c e da interação entre essas variáveis na porosidade efetiva. A tabela 5.24 apresenta esses valores.

Tabela 5.24 Resultados da ANOVA em relação à porosidade efetiva

Fator	GDL	MQ	Fcalc	F0,05	Significância
1 - Teor de adição	2	8,49	169569,80	4,26	S
2 - a/c	2	5,21	104179,10	4,26	S
12	4	1,43	28522,40	3,63	S
ERRO	9	0,00	-	-	-

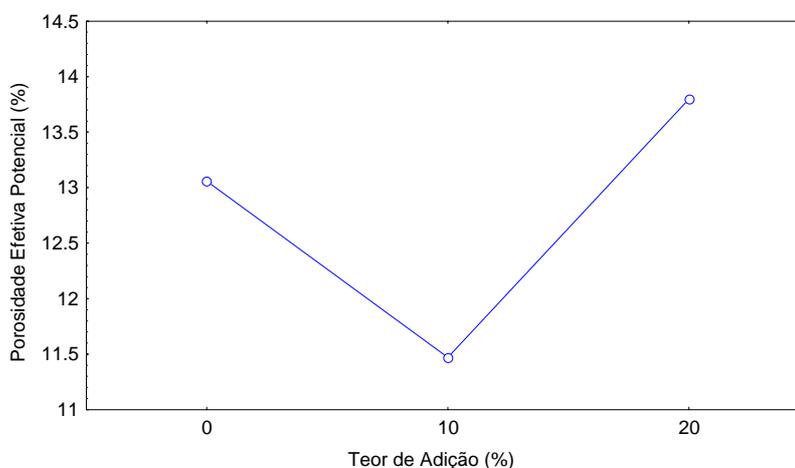
GDL – Graus de Liberdade MQ – Média Quadrada Fcalc – Valor de F calculado

F0,05 – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5% S – Efeito significativo

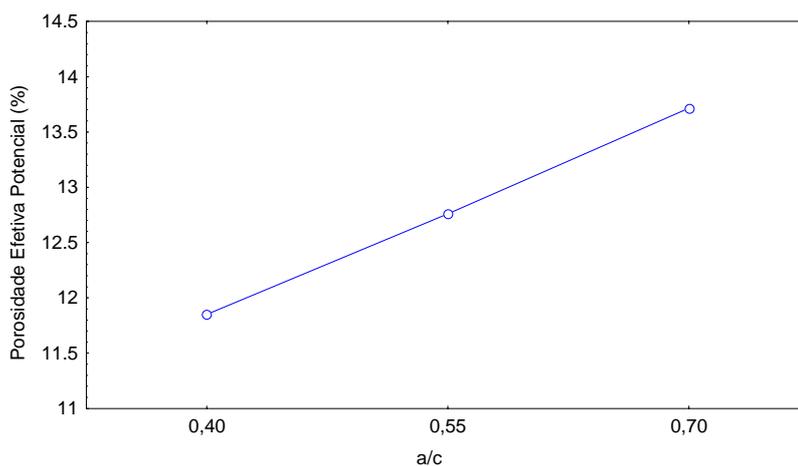
NS – Efeito não significativo

Os resultados da ANOVA mostram que há influência significativa do teor de adição, da relação a/c e da interação entre estas variáveis na porosidade efetiva potencial dos concretos avaliados.

A figura 5.27 (a) e (b) apresenta o comportamento do efeito isolado do teor de adição e relação a/c nos resultados de porosidade efetiva dos concretos produzidos. A figura 5.28 apresenta a Influência da interação entre a relação a/c e o teor de adição na porosidade efetiva dos concretos.



(a)



(b)

Figura 5.27 Porosidade efetiva potencial dos concretos em função: (a) teor de adição de RCG (b) relação a/c

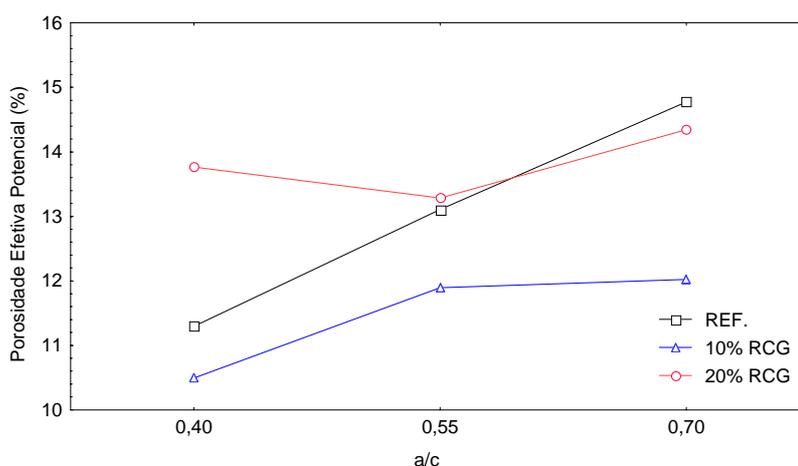


Figura 5.28 Influência da interação entre o teor de adição e a relação a/c na porosidade efetiva potencial dos concretos

O teor de adição de RCG mostrou-se significativamente influente na porosidade efetiva potencial dos concretos. Houve uma redução de 12% com a adição de 10% de RCG, e um ganho de 6% com adição de 20%, em relação aos concretos de referência. A figura 5.27 (a) ilustra este comportamento. Apesar do incremento na porosidade dos concretos com 20% de adição de RCG em relação aos concretos de referência, não significou redução na resistência à compressão

axial. Este comportamento pode ser atribuído à barreira física das partículas de RCG, que resistem aos esforços de compressão.

O aumento da relação a/c influenciou negativamente na porosidade efetiva dos concretos. Os concretos com maior relação a/c apresentaram maior porosidade, conforme figura 5.27 (b).

A interação entre a relação a/c e o teor de adição também mostrou-se significativa. A porosidade efetiva potencial aumentou com o aumento da relação a/c. Exceto para os concretos com 20% de adição de relação a/c - 0,40 para a relação a/c - 0,55, em que os valores são praticamente iguais. Os concretos com o teor de 10% apresentaram melhor desempenho, conforme figura 5.28.

5.5.7 Absorção por Imersão

Diferente do ensaio de absorção por sucção capilar, o ensaio de absorção por imersão mostra a absorção de um determinado concreto num tempo e seu índice de vazios, através da relação entre a massa seca e saturada da amostra, sem levar em consideração a velocidade de absorção. Este ensaio foi realizado a frio, conforme a NBR 9778 (ABNT, 1987), com o tempo de permanência de imersão de 96 horas. Foram ensaiados três corpos-de-prova na idade de 35 dias.

A tabela 5.25 apresenta os resultados do ensaio realizado com concretos sem adição (referência) e com adição de 10% e 20% de RCG.

Tabela 5.25 Resultados do ensaio de absorção por imersão dos concretos estudados

CONCRETO	a/c	Absorção (%)	C.V. (%)	Índice de Vazios (%)
	0,40	5,21	2,66	12,13
REFERÊNCIA	0,55	5,69	1,27	13,01
	0,70	6,15	1,73	13,94
	0,40	4,53	2,82	10,71
10% RCG	0,55	5,14	1,02	11,95
	0,70	5,59	4,49	12,81
	0,40	5,53	1,67	12,70
20% RCG	0,55	5,81	3,99	13,31
	0,70	6,16	6,41	14,01

Análise dos Resultados para absorção por imersão

A partir dos resultados mostrados na tabela 5.25 foi realizada a ANOVA para verificação da influência do teor de adição, da relação a/c e da possível interação, na absorção por imersão cujos valores encontrados constam na tabela 5.26.

Tabela 5.26 Resultados da ANOVA do ensaio de absorção por imersão dos concretos avaliados

Fator	GDL	MQ	Fcalc	F0,05	Significância
1 - Teor de adição	2	0,94	2080,05	4,26	S
2 - a/c	2	1,15	2563,31	4,26	S
12	4	0,27	59,68	3,63	S
ERRO	9	0,01	-	-	-

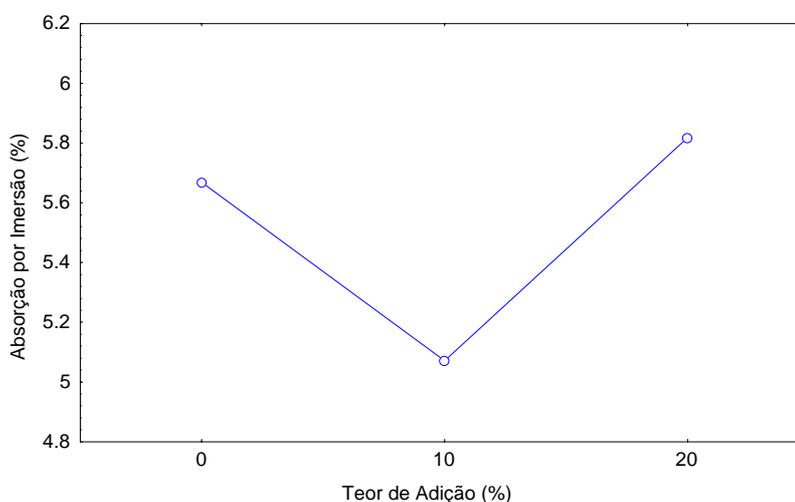
GDL – Graus de Liberdade MQ – Média Quadrada Fcalc – Valor de F calculado

F0,05 – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5% S – Efeito significativo

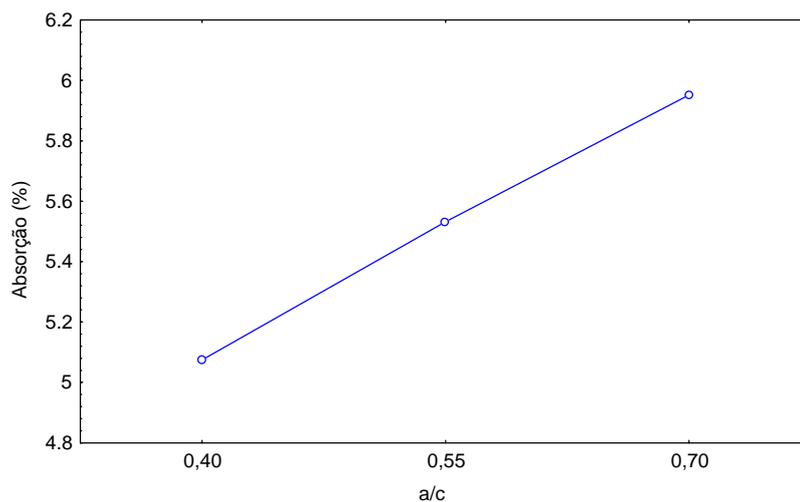
NS – Efeito não significativo

Os valores obtidos pela ANOVA mostram que o teor de adição, a relação a/c e a interação entre estas variáveis são significativas em relação à absorção por imersão.

A figura 5.29 (a) e (b) apresenta o comportamento do efeito isolado do teor de adição e relação a/c nos resultados de absorção por imersão dos concretos produzidos. A figura 5.30 apresenta a Influência da interação entre a relação a/c e o teor de adição na absorção por imersão dos concretos.



(a)



(b)

Figura 5.29 Absorção por imersão dos concretos em função (a) teor de adição (b) relação a/c

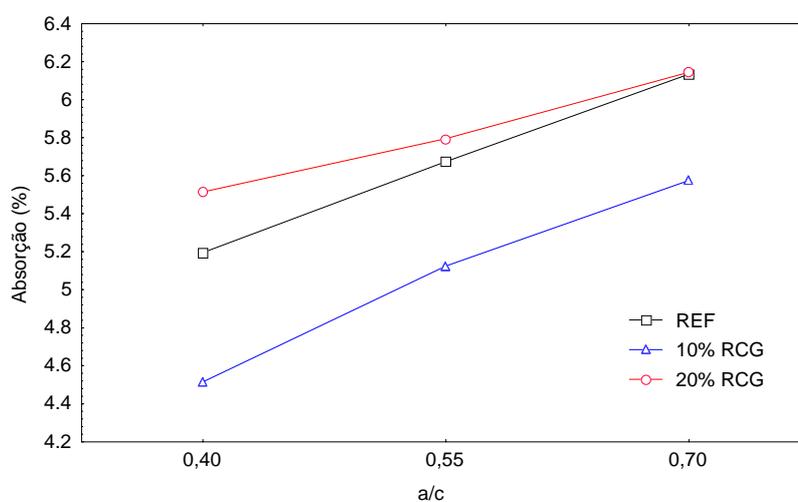


Figura 5.30 Influência da interação entre o teor de adição e a relação a/c na absorção por imersão dos concretos

Os concretos com teor de 20% de adição apresentaram níveis de absorção maiores tanto em relação aos concretos de referência quanto em relação aos concretos com adição de 10% de RCG. Houve um incremento de 2,5% para o teor de 20%, e uma diminuição na absorção de 10,2% com a adição de 10% de RCG em relação aos concretos de referência, conforme figura 5.29 (a).

A relação a/c também mostrou-se significativa em relação à absorção por imersão. Houve aumento da absorção com o incremento da relação a/c, conforme figura 5.29 (b).

A interação entre a relação a/c e o teor de adição também mostrou-se significativa, com o aumento da absorção com o aumento da relação a/c, sendo que o teor de 10% apresentou um melhor desempenho, conforme figura 5.30.

Análise dos Resultados para Índice de Vazios

Com relação ao índice de vazios, a partir dos resultados mostrados na tabela 5.25 foi realizada a ANOVA para verificação da influência do teor de adição e relação a/c, cujos valores encontrados constam na tabela 5.27.

Tabela 5.27 Resultados da ANOVA do ensaio de absorção por imersão dos concretos avaliados, enfocando o índice de vazios

Fator	GDL	MQ	Fcalc	F0,05	Significância
1 - Teor de adição	2	3,85	8547,70	4,26	S
2 - a/c	2	4,54	10099,11	4,26	S
12	4	0,09	202,59	3,63	S
ERRO	9	0,01	-	-	-

GDL – Graus de Liberdade MQ – Média Quadrada Fcalc – Valor de F calculado

F0,05 – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5% S – Efeito significativo

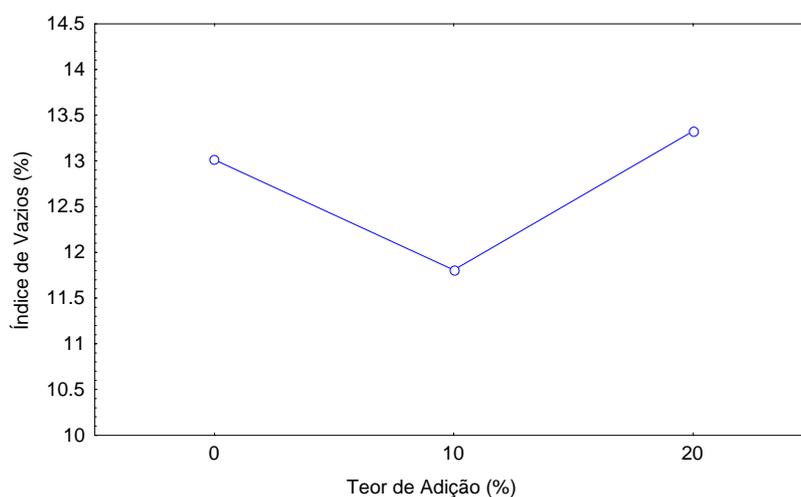
NS – Efeito não significativo

Os valores obtidos pela ANOVA mostram que o teor de adição, a relação a/c e a interação entre estas variáveis são significativas em relação ao índice de vazios, como era de se esperar pois a absorção por imersão está diretamente relacionada com o índice de vazios.

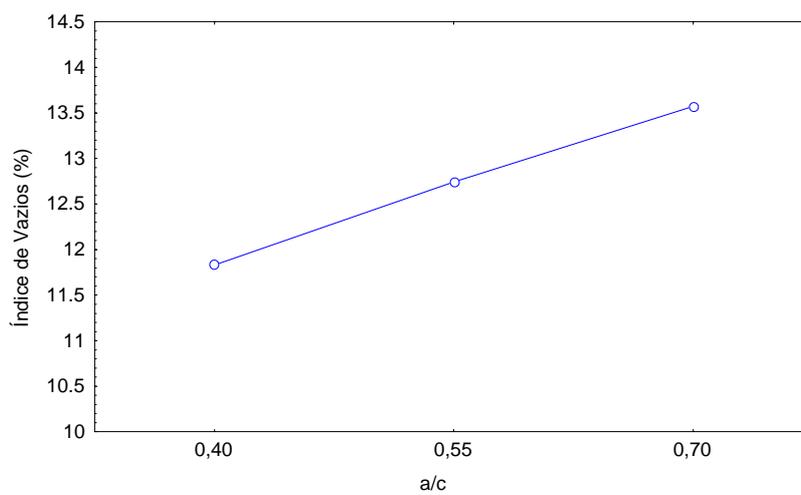
Como o índice de vazios está relacionado com a quantidade de água absorvida pelos poros acessíveis do concreto endurecido, este apresentará mesmas proporções de ganho ou perda em relação à absorção por imersão. Tendo o teor de 10% apresentando melhor desempenho proporcionando diminuição do índice de vazios em relação ao concreto de referência.

Conforme esperado o aumento da relação a/c promoveu um aumento no índice de vazios. A interação entre o teor de adição e a relação a/c apresentou-se

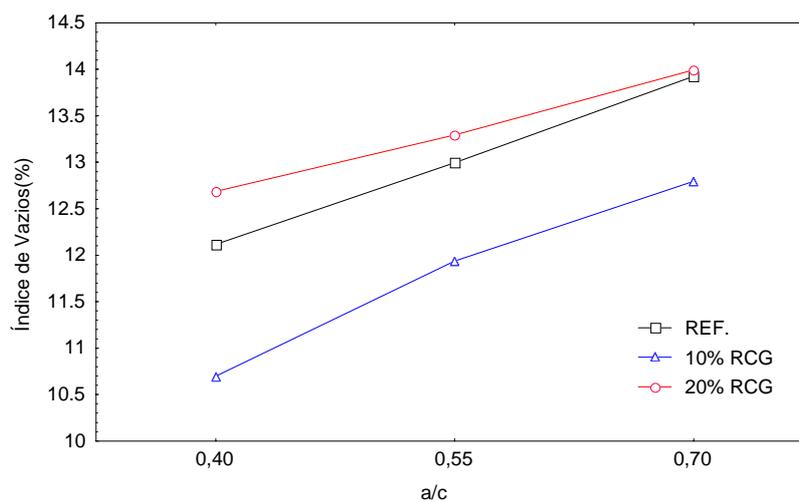
significativa. Apesar do índice de vazios aumentar com o aumento da relação a/c, o teor de 10% de adição apresentou melhor comportamento tanto em relação aos concretos de referência quanto aos concretos com adição de 20% de RCG, conforme a figura 5.31 (a), (b) e (c).



(a)



(b)



(c)

Figura 5.31 Índice de vazios dos concretos em função (a) teor de adição de RCG, (b) relação a/c e (c) interação entre teor de adição e relação a/c

Comparando-se os resultados encontrados na porosidade efetiva potencial, pelo método do KELHAM (1988), com o índice de vazios, verifica-se que ambos resultados apresentaram mesmo comportamento, o teor de 10% de adição de RCG apresentou um melhor desempenho. Verificou-se também o aumento da porosidade com o aumento da relação a/c.

CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES

Dentre as várias formas de redução do impacto ambiental causado pela geração de resíduos, a que apresenta maiores vantagens é a reciclagem. A Construção Civil se apresenta como o setor com melhor potencial para a utilização dos resíduos devido aos inúmeros processos envolvendo diversos tipos de materiais. Além de contribuir para um maior desenvolvimento sustentável.

A reciclagem de resíduos deve seguir uma metodologia adequada para que os produtos desenvolvidos apresentem um desempenho compatível com os padrões técnicos e que não ofereçam riscos ambientais.

A partir dos resultados apresentados no programa experimental nesta pesquisa, pode-se chegar as seguintes conclusões, que são apresentadas a seguir.

As conclusões apresentadas neste estudo referem-se aos resultados obtidos com concretos produzidos com os materiais, dosagens e técnicas de execução específicas. Sua representatividade deve ser confirmada através de novos estudos, que devem ser realizados levando em consideração aspectos que confirmarão e complementarão o comportamento do RCG em concretos.

6.1 COM RELAÇÃO ÀS CARACTERÍSTICAS DO RCG

O RCG possui uma forma irregular, angulosa, estrutura cristalina e diâmetro médio de 6,74 μ m.

No ensaio de solubilização, apenas o Fluoreto apresentou concentração superior, classificando o RCG como um resíduo Classe II – Não Inerte. Em relação ao ensaio de lixiviação, nenhum dos seus compostos apresentou concentração superior, de forma que o RCG não apresenta risco ambiental nem à saúde humana.

Com relação ao potencial de oxidação, pode-se afirmar que o Fe presente no RCG está se oxidando, de acordo com as DRXs. Entretanto, este processo não ficou evidenciado nos resultados do ensaio de secagem e imersão em solução contendo cloretos (avaliação visual, resistência à tração na flexão e ganho de massa).

6.2 COM RELAÇÃO ÀS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

As misturas de concretos com adição de RCG apresentaram maior coesão e consistência e uma diminuição da exsudação. O aumento do teor de adição de RCG promoveu um aumento na coesão.

6.3 COM RELAÇÃO ÀS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

Com relação as propriedades do concreto endurecido pode-se tirar conclusões conforme apresentado a seguir.

6.3.1 Propriedades Mecânicas

Quanto à resistência à compressão axial, a adição de RCG proporciona ao concreto desempenho melhor que o do concreto de referência, em todas as relações a/c e em todos teores. Os concretos com 10% de adição obtiveram um ganho médio de 8%, enquanto que para os concretos com adição de 20% de RCG houve um aumento de 19,6% em relação ao concreto de referência.

No que se refere à resistência à tração por compressão diametral, os concretos com 10% de adição de RCG apresentaram melhor comportamento em relação aos concretos de referência. Os concretos com 10% de adição apresentaram um ganho na resistência à tração por compressão diametral de 7,2%, enquanto que os concretos com 20% um decréscimo de 5,8%, em relação aos concretos de referência.

Os concretos produzidos com adição de RCG em relação à resistência à tração na flexão, apresentaram um ganho em relação aos concretos de referência. Entretanto não houve diferença significativa entre os resultados.

A distribuição das partículas, o refinamento dos poros, a possível dispersão e aceleração da hidratação fizeram com que a resistência aos esforços de tração por compressão diametral e na flexão nos concretos com adição de RCG se elevassem, porém em proporção inferior ao ganho promovido na resistência à compressão. Este fato comprova o efeito fíler da adição de RCG.

6.3.2 Parâmetros de Durabilidade

6.3.2.1 Absorção por sucção capilar

O método de absorção por sucção capilar, proposto por KELHAM (1988) e adaptado por GOPALAN (1996) apresenta-se como um bom parâmetro para avaliar a durabilidade do concreto. O parâmetro encontrado a partir deste ensaio, a taxa de absorção, representa bem o desempenho dos concretos produzidos.

Houve uma redução significativa da taxa de absorção com adição de 10% de RCG (cerca de 20,2%). Porém verificou-se um aumento da taxa, com adição de 20% de RCG, em relação ao concreto de referência.

Com relação a resistência capilar, a adição de RCG também influenciou significativamente. Com 10% de adição de RCG houve um aumento de 9,6% da resistência capilar, e com adição de 20% um incremento de 40,3%, em relação aos concreto sem adição.

O teor de adição de RCG mostrou-se significativamente influente na porosidade efetiva potencial dos concretos. Com a adição de 10% de RCG houve um decréscimo de 12,0% da porosidade efetiva potencial, e um ganho de 6% com adição de 20%, em relação aos concretos de referência.

A adição de 10% RCG nos concretos promoveu um preenchimento dos poros, provocando uma barreira física ao movimento ascendente da água. O que proporcionou uma diminuição da taxa de absorção, um incremento na resistência capilar e diminuição da porosidade efetiva potencial. Com adição de 20% houve um incremento bem maior de finos, causando um maior refinamento da estrutura de poros, formando caminhos preferenciais. O que favoreceu a absorção por sucção capilar e um aumento na porosidade efetiva. Porém, a barreira física provocada pelo excesso de finos, promove um aumento no tempo de saturação, gerando um ganho na resistência capilar.

6.3.2.2 Absorção por imersão

A absorção por imersão também está relacionada com a quantidade de água absorvida pelos poros acessíveis do concreto endurecido. A adição de 10% de RCG promoveu uma diminuição na absorção de 10,2%. Já com a adição de 20% de RCG ocorreu um incremento de 2,5%, em relação aos concretos de referência.

O índice de vazios aumentou com o incremento da relação a/c. O teor de 10% de adição apresentou melhor comportamento tanto em relação aos concretos de referência quanto aos concretos com adição de 20% de RCG.

Portanto, a partir dos resultados obtidos no programa experimental, o uso do resíduo de corte de granito como adição em concretos é viável tecnicamente. Com relação ao comportamento global do resíduo de corte de granito como adição em concretos, nas propriedades mecânicas e parâmetros de durabilidade avaliados, 10% de adição apresenta-se como o teor ótimo.

6.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Na tentativa da viabilização técnica do uso do resíduo de corte de granito como adição em concretos, poder-se-ia realizar novas pesquisas e que levem em consideração os seguintes aspectos:

- influência da adição de RCG na penetração de cloretos e outros parâmetros de durabilidade;
- avaliação da oxidação do Fe contido no resíduo por DRX tanto no resíduo, quanto na matriz, num período maior;
- influência da adição de RCG na distribuição dos poros na pasta;
- determinação da relação custo/benefício para utilização do RCG como adição em concretos.

CAPÍTULO 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. EB-1 - Cimento Portland Comum – Especificação. Rio de Janeiro, 1991
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5738 - Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. NBR 5739, Rio de Janeiro.1994.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5753 - Cimento Portland pozolânico: determinação da pozolanicidade. Rio de Janeiro, 1991.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5751 - Índice de atividade pozolânica com cal. Rio de Janeiro. 1992.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5752 - Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro. 1992.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6118 - Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado. Rio de Janeiro. 1980.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6474 - Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7211 - Agregados para concreto, Rio de Janeiro, 1983
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7217 - Agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7218 - Agregados: determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 1987.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7219 - Agregados: determinação do teor de materiais pulverulentos. Rio de Janeiro, 1987.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7220 - Agregados: determinação de impurezas húmicas em agregado miúdo. Rio de Janeiro, 1987.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7222 - Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos, , Rio de Janeiro,1994.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 7223 - Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1992.

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9937 - Agregados: determinação da absorção e massa específica de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1987.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9776 - Agregados: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio de frasco de chapman. Rio de Janeiro, 1987.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9778 - Argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1987.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10004 - Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro. 1987.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10005 - Lixiviação de resíduos – Procedimento. Rio de Janeiro. 1987.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10006 - Solubilização de resíduos – Procedimento. Rio de Janeiro. 1987.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10007 - Amostragem de resíduos, Rio de Janeiro. 1987.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR12142 - Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos. Rio de Janeiro, 1991
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12653 - Materias Pozolânicos – Especificação. Rio de Janeiro. 1992.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13276 - Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação do teor de água para obtenção do índice de consistência-padrão. Rio de Janeiro, 1995.
- ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE COMMITTEE 226 – Silica Fume in Concrete. In: ACI Materials Journal. Proceedings, USA. V.84. Nº 02, p. 158–166, Mar/Abr, 1987.
- ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE COMMITTEE – Use of Fly Ash in Concrete. In: ACI Materials Journal. Proceedings, USA. V.84. Nº 05, p. 381–409, Set/Out, 1987.
- ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE COMMITTEE 234 – Abstract of: Guide of the Use of Silica Fume in Concrete. In: ACI Materials Journal. Proceedings, USA. V.92. Nº 04, p. 437–439, Jul/Ago, 1995.
- ALVES, F., O que está sendo feito com os resíduos industriais?. In: Saneamento Ambiental, ed. 54, nov/dez, 1998, p. 16-24.
- BABU, K.G., RAO, S.N., Efficiency of Fly Ash in Concrete. In: Cement and Concrete Composites,. Nº 15, June, 1993, p. 223-229.

- BABU, K.G., RAO, S.N., Efficiency of Fly Ash in Concrete with Age. In: Cement and Concrete Research,. V.26. Nº 03, Dez, 1995, p. 465-474.
- BARATA, M.S., Concreto de alto desempenho no estado do Pará: estudo da viabilidade técnica e econômica de produção de concreto de alto desempenho com materiais disponíveis em Belém e através do emprego de adições de sílica ativa e metacaulim. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998. 153p.
- BAUER, E., Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas. Tese de doutorado Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1995. 236p.
- BARATA M. S., DAL MOLIN, D. C. C., O emprego de metacaulim como adição ativa em concretos de alto desempenho. In: VII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. ANTAC, **Anais**. Florianópolis/SC, 1998. p. 141 – 155.
- BERRY, E.E., MALHOTRA, V.M., Fly Ash for use in Concrete – A critical Review. In: ACI Materials Journal. V.77. Nº 02, Mar/Abr, 1980, Proceedings, USA, p. 59–73.
- BILODEAU, A., MALHOTRA V. A., High-Volume Fly Ash System: Concrete Solution for Sustainable Development. In: ACI Materials Journal. V.97. Nº 1, Jan/Feb, 2000, USA, p. 41–48.
- BOUZOUBAË, N., ZHANG, M., MALHOTRA, V.M., Blended Fly Ash Cements – A Review. In: ACI Materials Journal. V.96. Nº 06, Nov/Dez, 1999, Proceedings, USA, p.641–650.
- BONAVETTI. V. L., IRASSAR, E. F., The effect of stone dust content in sand. In: Cement and Concrete Research,. V.24. Nº 03, Sept., 1993, p. 580-590.
- BONAVETTI V., RAHAL, V., CABRERA,O., IRASSAR, E. F., Efecto del curado en la evolución de la resistencia de hormigones con filler calcáreo. In: 1er Congreso Internacional de Tecnología del Hormigón. **Anais**. Buenos Aires, Argentina. Associação Argentina de Tecnología del Hormigón. Jun/1998. p. 183-194.
- CABRERA,O., BONAVETTI, V., Donza, H., IRASSAR, E. F., Hormigones de alta resistencia con cementos de filler calcareo. In: 1er Congreso Internacional de Tecnología del Hormigón. **Anais**. Buenos Aires, Argentina. Associação Argentina de Tecnología del Hormigón. Jun/1998. p. 195-204.
- CADASTRO DOS PRODUTORES DE ROCHAS ORNAMENTAIS BAHIA-BRASIL; Secretaria da Indústria, Comércio e Mineração – SICM; Salvador / Ba, Jun/1999.
- CAMPITELLI, V.C., Porosidade do Concreto. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Civil da EPUSP, BT/PCC 09/87, São Paulo, 1987.
- CALMON, J.L.; TRISTÃO, F. A.; LORDÉLLO, F.S.S.; SILVA, S.A. Aproveitamento do resíduo de corte de granito para a produção de argamassas de assentamento. In: II Simpósio Brasileiro de Tecnologia das argamassas, **Anais**. Salvador, BA: ANTAC, 1997, p. 64-75.

- CALMON, J.L.; TRISTÃO, F. A.; LORDÊLLO, F.S.S.; SILVA, S.A. Reciclagem do resíduo de corte de granito para a produção de argamassas. In: I Encontro Nacional sobre Edificações e Comunidade Sustentáveis, Canela RS, nov-1997, p. 18-23.
- CASSA, J.C., CARNEIRO, A. P., RECICLAR BAHIA – Rede Cooperativa de Pesquisas para o Aproveitamento de Resíduos como Materiais de Construção. In: TecBahia – Revista Baiana de Tecnologia, ed. 69, jan/abr 1999, p. 69-80.
- CAVALCANTE, J.R., CHERIAF, M., Ensaio da Avaliação para Controle Ambiental de Materiais com Resíduos Incorporados. In: WorkShop sobre Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de construção, 1996, São Paulo: PCC-USP, Departamento de Engenharia Civil, p. 31 –38.
- CBPM – Companhia Baiana de Produção Mineral
<http://www.cbpm.com.br/index.html>, 2000)
- CERQUEIRA, L.; ALVES, F., Alternativas para a gestão de resíduos perigosos. In: Saneamento Ambiental, ed. 59, Jul/Ago, 1999, São Paulo/SP, p. 18-23..
- CINCOTTO, M.A., Utilização de sub-produtos e resíduos na indústria da Construção Civil. In: II Simpósio de Desempenho de Materiais e Componentes de Construção Civil. UFSC, Florianópolis, 1988, p171-181.
- COHEN, M.D., BENTUR, A., Durability of Portland Cement-Silica Fume Pastes in Magnesium Sulfate and Sodium Sulfate Solutions. In: ACI Materials Journal. V.85. Nº 03, Mai/Jun, 1988, Proceedings, USA, p. 148–157.
- COUTINHO, A. S., Fabrico e propriedades do betão. V. III. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, 1997. 342p.
- FARIAS, R. F. S., TESUKA, Y., Corrosão das Armaduras do Concreto - Mecanismos e Controle, BT/PCC/69, Departamento de Engenharia Civil, USP, SP, 1992.
- FELDMAN, R.F., CARETTE, G.G., MALHOTRA, V.M., Studies on Mechanism of Development of Physical and Mechanical Properties of High-Volume Fly Ash-Cement Pastes. In: Cement & Concrete Composites, Nº 12, p. 245–251, 1990, Canadá.
- FERRARI, Ronaldo, Co-processamento de resíduos industriais em fornos de clínquer. ANAIS DO VII SENALIMP, Curitiba/PR, Abril/2000.
- FREIRE, A. S.; MOTTA, J. F. M.; Potencialidades para o aproveitamento econômico de rejeito de serragem de granito. In: Rochas de Qualidade: Granitos, Mármore e Pedras Ornamentais, São Paulo, ed. 123, jul/ago, 1995, p. 98-108.
- GOLDMAN, A., BENTUR, A., Effects of pozzolanic and Non-Reactive Microfillers on The Transition Zone in High Strength Concretes. In: MASO, J.C. (ed) RILEM, International Symposium on Interfaces Cementitious Composites. Toulouse, 1992, Proceedings, London, (RILEM Proceedings 18), 1993, p. 53-62.
- GOPALAN, M. K., Sorptivity of Fly Ash Concretes. Cement and Concrete Reseach, v.26, nº8, 1996, p. 1189-1197.

- GJORV, O, Important Test Methods for Evaluation of Reinforced Concrete Durability. In: Concrete Technology – Past, Present and Future. Proceedings of V.M. Malhotra (ed.). American Concrete Institute, Detroit, 1994.
- HELENE, P.R.L., TERZIAN, P., Manual de Dosagem e Controle de Concreto. Ed. Pini, São Paulo, 1992, 349p.
- HELENE, P.R.L., Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. Tese de Livre Docência. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.
- HELENE, P.R.L., Corrosão em armaduras para concreto armado. Ed. PINI, São Paulo, 1986. 46p.
- HO, D. W. S., Hineczak, I., Conroy, J. J. and Lewis, R.K. Influence of slag cement on the water sorptivity of concrete. In: International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, 2., Madrid, Spain. Proceedings. Detroit: American Concrete Institute. 1986. V. 2. (ACI Special Publication, 91), p.1463 –1473.
- ISAIA, G.C., Efeito de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo da durabilidade com vistas à corrosão da armadura. Tese (doutorado). Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1995, p. 298.
- JOHN,V.M., A construção e o Meio Ambiente. <http://www.recycle.pcc.usp.br/artigos1.htm>, consultado em set/1999.
- JOHN, V. M., Cimentos de escória de alto forno ativada com silicatos de sódio. São Paulo: EPUSP. 112p. 1995 (tese de Doutorado).
- JOHN, V. M., Desenvolvimento Sustentável, Construção Civil, Reciclagem e Trabalho Multidisciplinar. <http://www.recycle.pcc.usp.br/artigos1.htm>, consultado em set/1999.
- JOHN, V. M., Panorama da reciclagem na Construção Civil. In: Revista Qualidade na Construção – Sinduscon/SP; nº20, Ano III, SP, 1999.
- JOHN, V. M., Pesquisa e desenvolvimento de mercado para resíduos. In: Workshop sobre Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de construção, 1996, São Paulo: PCC-USP, Departamento de Engenharia Civil, p. 21 –30.
- JOHN, V. M., Reciclagem de Resíduos Sólidos na Construção Civil: Contribuição à Metodologia de Pesquisa e Desenvolvimento (tese de livre docência). São Paulo: EPUSP. 102p. 2000.
- KELHAM, S. A, Water Absortion test for concrete. Magazine of Concrete Research, v. 40, nº 10. Jun/1988, p. 106 – 110.
- KOTZ, J. C., TREICHEL, P. JR., Química e Reações químicas. Rio de Janeiro, Ed. LTC, 3ªed., 1998, vol. II, 731p. (Tradução – Horacio Macedo).

- KIHARA, Y., Contribuição ao estudo de pozolanas no Brasil. In: XXV Congresso Congresso Brasileiro de Cerâmica, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1981.
- KIPERSTOK, A; GERBER, W.; TORRES, E. D.; PONTES, L. A.; Curso de Extensão em Tecnologias Limpas e Minimização de Resíduos. UFBA/ Departamento de Hidráulica, Salvador, Nov/99.
- KULAKOWSKI, M.P., VIEIRA, F.P., DAL MOLIN, D., VILELA, A.C.F., Utilização do pó gerado na produção de ligas de Ferro-Silício e Silício Metálico em Concretos. In: WorkShop sobre Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de construção, 1996, São Paulo: PCC-USP, Departamento de Engenharia Civil, p. 124 –131.
- LEAL, G.; ALMEIDA, R., Rochas brasileiras a gosto dos italianos. In: Exportar&Gerência, ed. 10, jul/1999, p. 18-24.
- LIMA FILHO, V. X., BEZERRA, A. C., SANTOS, F. C., NOGUEIRA, R. E. F. Q., FERNANDES, A. H. M., Determinação de parâmetros para a racionalização do processamento de rochas graníticas por abrasão. In: XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica. **Anais**. nov/1999, São Paulo, (a).
- LIMA FILHO, V. X., BEZERRA, A. C., SANTOS, F. C., NOGUEIRA, R. E. F. Q., FERNANDES, A. H. M., Estudo da viabilidade técnica da substituição dos p's cerâmicos convencionais por pó de granito na injeção de peças cerâmicas à baixa pressão. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. **Anais**. Nov/2000, Natal/RN, (b).
- MALHOTRA, V.M., CARETTE, G.G, Performance of Concrete Incorporating Limestone Dust as partial Replacement for sand. In: ACI Materials Journal. V.82. Nº 03, Mai/Jun, 1985, Proceedings, USA, p.363-371.
- MANGAT, P.S., KHATIB, J. M., Influence of Fly ash, Silica Fume, and Slag Sulfate Resistance of Concrete. In: ACI Materials Journal. V.92. Nº 05, , Set/Out, 1995, Proceedings, USA p. 542–552.
- MASSAZZA, F., COSTA, U., Aspects of the pozzolanic activity and properties of pozzolanic cements. In: Informal Seminar on Cement Chemistry, Grã-Bretanha, 5 e 6 de set/1977, p. 3-18.
- MASSAZZA, F., COSTA, U., MARCHESI, B. Capillary absorption and composition of pastes and mortars made with Portland and Pozzolanic cements. In: Durability of Building Materials and Components 6. Edited by S. NAGATAKI, T. NIREKI; F. TOMOSAWA, 1993 E & FN Spon. ISBN 0419 18680 8, p. 193 – 202.
- MEHTA, P. K., Properties of Blended Cements made from Rice Husk Ash. In: ACI Materials Journal. V.74. Nº 09, Set, 1977, Proceedings, USA, p. 440–442.
- MENEZES, Ricardo A Amaral, Estágio Atual da Incineração no Brasil, ANAIS DO VII SENALIMP, Curitiba/PR, Abril/2000

- METHA, P. K., PIRTZ, D., Use of Rice Hull Ash to Reduce Temperature in High-Strength Mass Concrete. In: ACI Materials Journal. V.75. Nº 02, Fev, 1978, Proceedings, USA, p. 60–63.
- METHA, P.K., MONTEIRO, P.J.M., CONCRETO – Estrutura, Propriedades e materiais. São Paulo, Ed. Pini, 1994, 573 p.
- MORAES,R.C., ISAIA, G.C., GASTALDINI, A.L.G., Efeitos da cinza de casca de arroz e fíler calcário sobre a resistência mecânica do concreto. Anais do 43º IBRACON, Fortaleza/CE, agosto/2000.
- MOURA, W. A., Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS. 2000. p.192. Tese (doutorado).
- NEVILLE, A.M., Propriedades do Concreto. São Paulo, Ed. Pini, 2ºed., 1997, 828p.
- NEVES , Gelmires, PATRICIO, S. M. R., FERREIRA, H. C., SILVA, M. C., Utilização de resíduos da serragem de granitos para a confecção de tijolos cerâmicos. In: 43º Congresso Brasileiro de Cerâmica. **Anais**. Florianópolis/SC. Jun/1999.
- PANORAMA DE ROCHAS ORNAMENTAIS NA BAHIA; Superintendência de Geologia e Recursos Minerais; Salvador / Ba, 1994.
- PENTALLA, Vesa., Concrete and Sustainable Development. In: ACI Materials Journal. V.94. Nº 5, Set/Out, 1997, USA, p. 409–416.
- PENTTALA, V., KOMONEN, J., Effects of aggregates and microfillers on the flexural properties of concrete. In: Magazine of Concrete Reseach,. Nº 179, Jun, 1997, Thomas Telford Ltda., Londres, p. 81-97.
- PERA, Jean.,State of the art report – use of waste materials in construction in Western Europe. In: WorkShop sobre Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de construção, 1996, São Paulo: PCC-USP, Departamento de Engenharia Civil, p. 01 –20.
- PETRUCCI, E. G. R., Concreto de cimento Portland. São Paulo, Ed. Globo, 12ºed., 1993, 299p.
- PRICE, W.H., Pozzolans – A review. In: ACI Materials Journal. V.72. Nº 05, p. 225–232, Mai, 1975, Proceedings, USA.
- Projeto MultiMin – Rochas ornamentais, <http://acd.ufrj.br/geologia/pesuisa/home.html>, consultado em Jul/2000.
- REY, A. Rdríguez; L.M. Suárez Del Río; L. Calleja; ARGANDOÑA, G. R., El Corte de rocas ornamentales com discos diamantados: influências das caracteísticas petrográficas de la roca. In: Materiales de Construcción, Instituto Eduardo Torroja, Vol. 48, nº251, jul/ago/set/1998, Madrid/Espanha, p. 49 a 55.
- RIBEIRO, J. L. D., Projeto de Experimentos na Otimização de Produtos e Processos. Notas de Aula. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFRGS. Jan/1995.

- ROCHAS ORNAMENTAIS – Informação Estatística 1986-1995; Instituto Geológico Mineiro, Ministério da Economia; Lisboa, Portugal, 1995.
- ROY, D. M., IDORN, G.M., Hydration, Structure, and Properties of blast Furnace Slag – Cements, Mortars and Concrete. In: ACI Materials Journal. V.79. Nº 06, Nov/Dez, 1982, Proceedings, USA, p. 444–457.
- SAWICZ, Z., HENG, S.S., Durability of Concrete with Addition of Limestone Powder. In: Magazine of Concrete Research, 48, Nº 175, Jun, 1996, Thomas Telford Ltda., Londres, p. 131-137.
- SILVA, S.A.C, Caracterização do resíduo da serragem de blocos de granito – Estudo do potencial de aplicação na fabricação de argamassas de assentamento e de tijolos de solo-cimento. Dissertação (mestrado), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória/ES, 1998, 159 p.
- SILVEIRA, C. S.; NETO, B. D.; Cadastro das pedreiras de rochas ornamentais do estado da Bahia. Superintendência de Geologia e Recursos Minerais. Salvador/Ba, Abr/1996.
- SOROKA, I., SETTER, N., The Effect of Fillers on Strength of Cement Mortars. In: Cement and Concrete Research, V.07, Abri, 1977, USA. p. 449-456.
- SOROKA, I., STERN, N., Calcareous Fillers and The Compressive Strength of Portland Cement. In: Cement and Concrete Research, V.06. Dez, 1975, USA p. 367-376.
- STELLIN Jr., Antônio, Serragens de Granitos para fins ornamentais. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Minas, BT/PMI/085, São Paulo, 1998.
- TIKALSKY, P.J., CARRASQUILLO, P.M., CARRASQUILLO, R.L., Strength and Durability Considerations Affecting Mix – Proportions of Concrete Containing Fly Ash. In: ACI Materials Journal. V.85. Nº 06, Nov/Dez, 1988, Proceedings, USA, p. 505–511.
- U.S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES, <http://uol.com.br/intramed/revistas/mmwr/morte3.htm>, consultado em Set/2000.
- WALLEVIK, O.H., SAASEN, A., GJORV, O.E., Effect of Filler Materials on the Rheological Properties of Fresh Concrete. In: ACI Materials Journal. V.92. Nº 05, Set/Out, 1995, Proceedings, USA, p. 524–528.
- YOGENDRAN, V., LANGAN, B.W., HAQUE, M.N., WARD, M.A., Silica Fume in High-Strength Concrete. In: ACI Materials Journal. V.84. Nº 02, Mar/Abr, 1987, Proceedings, USA, p. 124–129.
- ZHANG, M.H., LASTRA, R., MALHOTRA, V.M., Rice-Husk Ash Paste and Concrete: Some aspects of hydration and the Microstructure of the Interfacial Zone Between the Aggregate and Paste. In: Cement and Concrete Research, V.26. Nº 06, Mar, 1996, USA, p. 963-977.