

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DA ACBC E
DO RCC NA COMPOSIÇÃO DE CONCRETOS**

Juliana Petermann Moretti

São Carlos
2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DA ACBC E
DO RCC NA COMPOSIÇÃO DE CONCRETOS**

Juliana Petermann Moretti

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Estruturas e Construção Civil.

Área de Concentração: Sistemas Construtivos

Orientador: Prof. Dr. Almir Sales

São Carlos
2014

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

M845ev Moretti, Juliana Petermann.
Estudo de viabilidade técnica da utilização da ACBC e do
RCC na composição de concretos / Juliana Petermann
Moretti. -- São Carlos : UFSCar, 2014.
158 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São
Carlos, 2014.

1. Materiais de construção. 2. Tecnologia de resíduos. 3.
Concreto. I. Título.

CDD: 691 (20^a)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil
Rod. Washington Luís, Km 235
13565-905 – São Carlos – SP
Fone: (16) 3351-8261 Fax (16) 3351-8262
e-mail: ppgeciv@ufscar.br site: www.ppgeciv.ufscar.br

JULIANA PETERMANN MORETTI

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em vinte e cinco de fevereiro de 2014.

Banca Examinadora constituída pelos membros:

Prof. Dr. Almir Sales
Departamento de Engenharia Civil/PPGECiv/UFSCar
Orientador

Prof. Dr. Javier Mazariegos Pablos
Instituto de Arquitetura e Urbanismo/IAU/USP
Examinador Externo

Prof. Dr. José da Costa Marques Neto
Departamento de Engenharia Civil/PPGECiv/UFSCar
Examinador Interno

À MINHA FAMÍLIA,
MELHOR PARTE DE MIM

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me iluminado durante esta jornada.

À minha avó Olga que sempre me apoiou, me acalmou e confiou em mim.

Aos meus pais, que me deram a oportunidade e sempre incentivaram meus estudos.

Ao meu esposo Mário, pela paciência e amor que tem me dedicado tornando assim esta jornada mais simples.

À minha irmã Bianca que sempre torceu por mim.

A toda minha família pelo apoio.

Ao professor Almir, pela orientação, disponibilidade, paciência e pela amizade.

Aos amigos Fernando e Sofia, pela grande ajuda no desenvolvimento deste trabalho e pela grande amizade.

À minha amiga Ludimilla que me acompanhou de perto durante esta jornada, sempre me ajudando e incentivando.

Aos amigos do PPGE Civ, Netto, Adriana e Gui pela paciência, amizade e auxílio.

A todos os meus amigos (Michele, Santos, Ana Alice, Daniele, Maira, Marthinha, Cyntia, Flaviana, Karin e Nilma) que sempre estiveram presentes na minha vida compartilhando muitos momentos de alegrias e momentos difíceis também.

Aos colegas de laboratório, Letícia, Mariana, Pedro, José Matheus e Maira pelo auxílio durante os ensaios.

Ao técnico Ricardo, do Laboratório de Sistemas Estruturais (DECiv-UFSCar) pela ajuda nos ensaios mecânicos dos concretos.

Aos funcionários da PROHAB, Victor José dos Santos Baldan e funcionário da Usina de Reciclagem de Resíduos, Sr. Dirceu pela disponibilidade e colaboração para a coleta do RCC.

Ao grupo COSAN, por disponibilizar a ACBC.

Ao Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil (PPGE Civ), da Universidade Federal de São Carlos, pelo auxílio durante o desenvolvimento desta pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa durante o Mestrado.

Agradeço a todos, que de alguma maneira, me ajudaram para a realização deste trabalho.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original.”
(Albert Einstein)

RESUMO

MORETTI, J. P. **Estudo de Viabilidade Técnica da Utilização da ACBC e do RCC na Composição de Concretos**. 2014. 158f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

A construção civil é responsável por gerar uma grande quantidade de resíduos, sendo que a falta de tratamento adequado para tais resíduos pode ocasionar diversos problemas ambientais e sociais. O Brasil é o maior produtor mundial no complexo sucroalcooleiro. Durante o processamento da cana-de-açúcar gera-se a areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC), resultante da queima do bagaço em caldeiras. Essas, geralmente são lançadas ao meio ambiente de forma inadequada. Essa pesquisa objetivou verificar a possibilidade do uso da ACBC e do resíduo da construção civil (RCC) em concretos, sendo que a ACBC foi utilizada como substituta parcial do agregado miúdo natural e o RCC como substituto parcial do agregado graúdo natural. As amostras de ACBC foram padronizadas através de peneiramento manual e desaglomeração das partículas. As amostras de RCC foram padronizadas por meio de triagem manual e peneiramento mecanizado. A ACBC e o RCC foram caracterizados quanto à composição granulométrica, absorção, massa específica, massa unitária e propriedades químicas. Após a caracterização, foi realizada a dosagem e moldagem de corpos de prova de concreto com teores de substituição de 30% de ACBC e 30%, 50% e 100% de RCC e foram produzidos sete traços (REF, 30ACBC, 30RCC, 50RCC, 30ACBC30RCC, 30ACBC50RCC e 100RCC). Foram realizados ensaios de resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade, índice de vazios, absorção, massa específica e carbonatação. Os concretos produzidos com a utilização isolada de 30% de ACBC (traço 30ACBC) e de 30% e 50% de RCC (traços 30RCC e 50RCC) apresentaram propriedades mecânicas similares ao do concreto referência (REF). Os concretos produzidos com 30% de ACBC em conjunto com 30% e 50% de RCC (traços 30ACBC30RCC, 30ACBC50RCC) apresentaram evolução na frente de carbonatação similar ao concreto referência, porém, a utilização conjunta da ACBC e do RCC resultou na obtenção de concretos com redução de 17%, 12% e 8% na resistência à compressão aos 7, 28 e 91 dias, respectivamente. Desse modo é possível indicar o uso conjunto da ACBC e do RCC como substitutos parciais de agregados naturais em concretos, pois a redução da resistência pode ser considerada baixa frente às possibilidades de utilização dos concretos contendo esses resíduos.

Palavras-chave: areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC), resíduo da construção civil (RCC), concreto.

ABSTRACT

MORETTI, J. P. **Estudo de Viabilidade Técnica da Utilização da ACBC e do RCC na Composição de Concretos**. 2014. 158f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

The civil construction is responsible for generating a lot of waste and the lack suitable for waste treatment can cause many environmental and social problems. Brazil is the world's largest producer in the sugar and alcohol sector. During the processing of sugarcane is generated the ash sand of the sugarcane bagasse (ASSB), resulting from the burning of bagasse in boilers. The ASSB is usually released in the environment inappropriately. This study aimed to verify the possibility of using the ASSB to partially replace river sand and the construction waste (CW) to partially replace crushed stone in concretes. The ASSB samples were standardized by manual sieving and deagglomeration. The CW samples were standardized by manual screening and automated screening. The ASSB and CW were subjected to physical and chemical characterization, by its chemical composition, sieve analysis, powdery material, absorption, bulk density and true density. The ASSB was used in concretes with 30% substitute level and the CW was used with 30%, 50% and 100% substitution levels, it were produced seven concretes recipe (REF, 30ASSB, 30CW, 50CW, 30ASSB30CW, 30ASSB50CW and 100CW). The concretes were submitted to tests of compressive and tensile strength, elastic modulus, void index, absorption, density and carbonation. The concretes produced with the isolated use of 30 % of ASSB (30ASSB) and 30 % and 50 % of CW (30CW and 50CW) presented similar mechanical properties to the reference concrete. The concretes produced with 30% of ASSB and 30% and 50 % of CW (30ASSB30CW, 30ASSB50CW) presented similar progression of carbonation to the reference concrete, however, the combined use of the ASSB and CW resulted in the achievement of concrete with a reduction of 17%, 12% and 8% in compressive strength at 7, 28 and 91 days, respectively. Thus it is possible to indicate the combined use of the ASSB and the CW as a partial substitute natural aggregates in concrete, since the decrease in resistance can be considered low against the possibilities of using concrete containing these wastes.

Key-words: ash sand of sugarcane bagasse (ASSB), construction waste (CW), concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa da distribuição da cana-de-açúcar no Brasil.....	17
Figura 2 - Produção de cana-de-açúcar no Brasil.....	17
Figura 3 - Consumo nacional de etanol e gasolina	19
Figura 4 - Sistema Agroindustrial da cana-de-açúcar.....	19
Figura 5 - Impactos gerados no cultivo da cana-de-açúcar.....	20
Figura 6- Etapas do processo de produção de açúcar e etanol	23
Figura 7 - Morfologia das partículas da ACBC	28
Figura 8 - Resistência à compressão de argamassas com diferentes teores de CBC em substituição ao cimento Portland.....	30
Figura 9 - Comparativo do aumento da resistência com o tempo.....	31
Figura 10 - Variação da resistência à compressão em função do teor de substituição do cimento por CBC.....	32
Figura 11- Gestão de RCC classe A segundo Lei 13.867	38
Figura 12- Origem do RCC em algumas cidades brasileiras.....	40
Figura 13- Composição percentual dos RCC da cidade de São Carlos	41
Figura 14- RD e RCC descartados na margem do Córrego Tijuco Preto-São Carlos/SP	42
Figura 15- RCC, RD e volumosos descartados em terreno baldio	42
Figura 16- Sistema Aberto de reciclagem	47
Figura 17- Sistema Fechado de reciclagem.....	47
Figura 18- Sistema Segunda Geração - Reciclagem	48
Figura 19- Alimentador vibratório.....	49
Figura 20- Britador de Mandíbulas.....	50
Figura 21- Correias transportadoras	50
Figura 22- Peneira Vibratória	51
Figura 23- Evolução no custo de areia e brita no Brasil e EUA	57
Figura 24- Características dos agregados que interferem na dosagem e propriedades do concreto no estado fresco e endurecido.....	59
Figura 25 – Programa experimental.....	65
Figura 26 - Retirada da ACBC da caldeira na usina.....	68
Figura 27 - Peneiramento (a) e desaglomeração da ACBC (b).....	69
Figura 28 – ACBC: antes da desaglomeração (a) e após a desaglomeração (b).....	69
Figura 29- Coleta de RCC na Usina de Reciclagem de São Carlos.....	70
Figura 30- Triagem do RCC (a), impurezas retiradas (b)	71
Figura 31 – Dimensões agregados reciclados	72
Figura 32 – Ensaio para determinação da massa específica da ACBC	74
Figura 33 – Ensaio para determinação da absorção de água da ACBC	75
Figura 34 – Ensaio para determinação do material pulverulento da ACBC.....	76
Figura 35 – Areia no estado saturado com superfície seca.....	77
Figura 36 – Peneirador de agregado graúdo	79
Figura 37 – RCC submerso em água.....	80
Figura 38 – Secagem da água visível do grãos (a), determinação da massa saturada com superfície seca (b).....	80
Figura 39 – Determinação da massa submersa do RCC	81
Figura 40 – Curva de absorção do RCC	82
Figura 41 – Massa unitária compactada do RCC: golpes aplicados com a haste de adensamento (a), camada nivelada (b)	83
Figura 42 - Curva de Abrams.....	84
Figura 43 – Pré-molhagem do RCC.....	86
Figura 44 – Agregados misturados na betoneira (a) concreto fresco (b).....	87
Figura 45 - Levantamento do tronco de cone (a) e medição do abatimento (b).....	87
Figura 46 – Preenchimento dos moldes (a) e adensamento dos concretos (b).....	89

Figura 47 – Cobertura dos corpos de prova com plástico filme (a) e desforma (b).....	90
Figura 48 – Cura dos corpos de prova de concreto	90
Figura 49 – Ensaio de resistência à compressão (a) e ruptura do corpo de prova (b).....	91
Figura 50 – Corpo de prova de concreto com extensômetro.....	92
Figura 51 – Procedimento do ensaio para determinação do módulo de elasticidade	92
Figura 52 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	93
Figura 53 – Procedimento do ensaio de absorção, índice de vazios e massa específica.....	95
Figura 54 – Câmara de carbonatação.....	97
Figura 55 – Ruptura do corpo de prova (a) medição da profundidade de carbonatação (b) .	98
Figura 56 - Layout da Usina de Reciclagem de RCC	102
Figura 57 - Britador (a), imã (b), transportador de correia (c), peneirador (d).....	103
Figura 58 - Produtos fabricados na FAC.....	104
Figura 59 - Mostuário dos produtos comercializados.....	104
Figura 60 – Difratometria da amostra de CBC coletada na Usina Diamante (Jaú-SP).	107
Figura 61 – Curva granulométrica da ACBC	108
Figura 62 – Curva granulométrica do agregado miúdo (30% ACBC + 70% areia)	109
Figura 63 – Curva granulométrica da areia natural	110
Figura 64 – Curva granulométrica das amostras de RCC	112
Figura 65 – Curva granulométrica do RCC LAB.....	114
Figura 66 – Curva granulométrica da Brita.....	115
Figura 67 – Resistência à compressão dos concretos aos 7 dias	117
Figura 68 – Resistência à compressão dos concretos aos 28 dias	119
Figura 69 – Resistência à compressão dos concretos aos 91 dias	120
Figura 70 – Resistência à compressão dos concretos aos 7, 28 e 91 dias	122
Figura 71 – Resistência à tração aos 28 dias	124
Figura 72 – Módulo de elasticidade aos 7 dias	126
Figura 73 – Módulo de elasticidade aos 28 dias	128
Figura 74 – Módulo de elasticidade aos 91 dias	130
Figura 75– Módulo de Elasticidade dos concretos aos 7, 28 e 91 dias	131
Figura 76 – Resultados do ensaio de absorção dos concretos	132
Figura 77 – Resistência à compressão e absorção de água dos concretos	134
Figura 78 – Resultados do ensaio de índice de vazios dos concretos	135
Figura 79 – Resultados do ensaio de massa específica dos concretos	137
Figura 80 – Profundidade de Carbonatação dos concretos aos 56 dias	138
Figura 81 – Profundidade de Carbonatação dos concretos aos 112 dias	140
Figura 82 – Evolução da profundidade de carbonatação dos concretos	142

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição típica da cana-de-açúcar	16
Tabela 2 - Estimativa de Produção e Destinação da cana moída na safra 2012/13	21
Tabela 3 - Comparação dos valores de emissões de CO ₂ por diferentes combustíveis na geração de energia elétrica	25
Tabela 4 - Total de resíduos de bagaço usados nas caldeiras e produção de cinzas – 2001/2002	26
Tabela 5 - Composição química, em termo de óxidos, e propriedades físicas da cinza residual do bagaço da cana-de-açúcar e do quartzo moído	29
Tabela 6 - Resistência à compressão média (MPa)	34
Tabela 7 - Propriedades físicas – CP II E 32	66
Tabela 8 – Dosagem dos concretos	88
Tabela 9 – Consumo de cimento e teor de argamassa dos traços	88
Tabela 10 – Quantidades de corpos de prova moldados	89
Tabela 11 – Tabela gerada para a análise ANOVA	99
Tabela 12 – Tabela gerada para o Teste de Tukey	100
Tabela 13 – Quantidade de RCC coletado e impurezas retiradas	105
Tabela 14 – Composição química da ACBC (em %)	106
Tabela 15 – Granulometria da ACBC	107
Tabela 16 – Granulometria do agregado miúdo (30% ACBC + 70% areia)	108
Tabela 18 – Granulometria da areia natural	109
Tabela 18 – Composição química do RCC (em %)	110
Tabela 19 – Granulometria do RCC coletado em janeiro/2012	111
Tabela 20 – Granulometria do RCC coletado em agosto/2012	111
Tabela 21 – Granulometria do RCC coletado em janeiro/2013	112
Tabela 22 – Quantidade de RCC em cada peneira	113
Tabela 23 – Granulometria do RCC LAB	113
Tabela 24 – Granulometria da brita	114
Tabela 25- Resultados da caracterização física dos agregados	115
Tabela 29 – Resistência à compressão aos 7 dias	116
Tabela 30 – ANOVA - Resistência à compressão aos 7 dias	117
Tabela 31 – Resumo do Teste de Tukey para a resistência à compressão dos concretos aos 7 dias	118
Tabela 32 – Resistência à compressão aos 28 dias	118
Tabela 33 – ANOVA - Resistência à compressão aos 28 dias	119
Tabela 34 – Resumo do Teste de Tukey para a resistência à compressão dos concretos aos 28 dias	120
Tabela 32 – Resistência à compressão aos 91 dias	120
Tabela 33 – ANOVA - Resistência à compressão aos 91 dias	121
Tabela 34 – Resumo do Teste de Tukey para a resistência à compressão dos concretos aos 91 dias	121
Tabela 35 – Resistência à compressão dos concretos aos 7, 28 e 91 dias	122
Tabela 38 – Resistência à tração aos 28 dias	123
Tabela 39 – ANOVA - Resistência à tração	124
Tabela 40 – Resumo do Teste de Tukey para a resistência à tração dos concretos	125
Tabela 41 – Módulo de Elasticidade aos 7 dias	126
Tabela 42 – ANOVA - Módulo de Elasticidade aos 7 dias	127
Tabela 43 – Resumo do Teste de Tukey para módulo de elasticidade dos concretos aos 7 dias	127
Tabela 44 – Módulo de Elasticidade aos 28 dias	128
Tabela 45 – ANOVA - Módulo de Elasticidade aos 28 dias	129

Tabela 46 – Resumo do Teste de Tukey para módulo de elasticidade dos concretos aos 28 dias	129
Tabela 47 – Módulo de Elasticidade aos 91 dias	129
Tabela 48 – ANOVA - Módulo de Elasticidade aos 91 dias.....	130
Tabela 49 – Resumo do Teste de Tukey para módulo de elasticidade dos concretos aos 91 dias	130
Tabela 48 – Módulo de Elasticidade dos concretos aos 7, 28 e 91 dias	131
Tabela 50 – Resultados do ensaio de absorção dos concretos	132
Tabela 51 – ANOVA - Absorção dos concretos	133
Tabela 52 – Resumo do Teste de Tukey para a absorção dos concretos.....	133
Tabela 53 – Resultados do ensaio de índice de vazios dos concretos.....	135
Tabela 54 – ANOVA - Índice de vazios.....	135
Tabela 55 – Resumo do Teste de Tukey para o índice de vazios dos concretos	136
Tabela 56 – Resultados do ensaio de massa específica dos concretos.....	136
Tabela 57 – ANOVA - Massa específica.....	137
Tabela 58 – Resumo do Teste de Tukey para a massa específica dos concretos	137
Tabela 59 – Profundidade de Carbonatação dos concretos aos 56 dias.....	138
Tabela 60 – ANOVA - Carbonatação 56 dias.....	138
Tabela 61 – Resumo do Teste de Tukey Carbonatação 56 dias.....	139
Tabela 62 – Profundidade de Carbonatação dos concretos aos 112 dias.....	140
Tabela 63 – ANOVA - Carbonatação 112 dias.....	141
Tabela 64 – Resumo do Teste de Tukey Carbonatação 112 dias.....	141
Tabela 65 - Evolução da profundidade de carbonatação dos concretos	142

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	Justificativa	9
1.1.1	Impactos científicos e tecnológicos.....	9
1.1.2	Impacto ambiental.....	10
1.1.3	Impactos sociais e econômicos	10
1.2	Objetivos	11
1.3	Estrutura do Trabalho	12
2	RESÍDUOS: ACBC E RCC	13
2.1	AREIA DE CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR - ACBC	15
2.1.1	A cana de açúcar	15
2.1.2	O processamento da cana-de-açúcar e seus derivados.....	18
2.1.3	Resíduos gerados no setor sucroalcooleiro	21
2.1.4	Potencialidades do uso da ACBC na construção civil.....	27
2.1.5	Utilização da ACBC como agregado em matrizes cimentícias	33
2.2	RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL - RCC	36
2.2.1	Definição.....	36
2.2.2	Normas e legislações.....	37
2.2.3	Geração de RCC	39
2.2.4	Destinação dos resíduos da construção civil (RCC)	41
2.2.5	Reciclagem dos Resíduos da Construção Civil (RCC)	43
2.2.6	Usinas de Reciclagem de RCC.....	43
2.2.7	Tipologias de plantas e processos para o beneficiamento de RCC.....	45
2.2.8	Equipamentos utilizados no processo de reciclagem de RCC.....	49
2.2.9	Potencialidades do uso dos agregados reciclados de RCC na construção civil.....	51
2.2.10	Utilização do RCC como agregado em matrizes cimentícias	52
3	AGREGADOS PARA CONCRETOS	56
3.1	Agregados naturais e artificiais	56
3.2	Características dos agregados	58
3.3	Características da ACBC e do RCC	60
3.3.1	Massa específica e massa unitária	60
3.3.2	Absorção de água.....	61
3.3.3	Composição granulometria	62
4	MATERIAIS E MÉTODOS	64
4.1	Materiais	66
4.1.1	Cimento Portland	66
4.1.2	Areia Natural	66
4.1.3	Pedra Britada	66
4.1.4	Areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC)	67
4.1.5	Resíduo da construção civil (RCC)	67
4.2	Metodologia	68
4.2.1	Descrição da Usina de Reciclagem de RCC	68
4.2.2	Coleta e padronização da ACBC	68

4.2.3	Coleta e padronização do RCC	70
4.2.4	Caracterização dos materiais.....	73
4.2.5	Dosagem dos concretos	84
4.2.1	Moldagem dos corpos de prova de concreto	89
4.2.2	Propriedades mecânicas dos concretos	90
4.2.3	Propriedades físicas dos concretos	94
4.2.4	Carbonatação	96
4.2.5	Análise estatística dos resultados.....	98
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	101
5.1	Descrição da Usina de Reciclagem de RCC	101
5.2	Coleta e padronização do RCC	105
5.3	Caracterização dos materiais	105
5.4	Propriedades dos Concretos	116
5.4.1	Resistência à compressão	116
5.4.2	Resistência à tração	123
5.4.3	Módulo de elasticidade	126
5.4.4	Absorção.....	132
5.4.5	Índice de vazios	134
5.4.6	Massa específica	136
5.4.7	Carbonatação	138
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	144
6.1	Conclusões.....	146
6.2	Sugestões para trabalhos futuros	146
7	REFERÊNCIAS	147

1 INTRODUÇÃO

O interesse na realização desta pesquisa pode ser justificado pela potencialidade e consequências do emprego conjunto de dois resíduos como substitutos de agregados naturais em concretos: a areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC) e os resíduos da construção civil (RCC). Alguns pesquisadores (ANDRADE, *et al.* 2007; MARTINS *et al.* 2007; KREUZ *et al.* 2002; CYR & LUDMANN, 2006; RAJAMANE, 2007; BAI *et al.* 2005; AL-RAWAS 2005; CHEN *et al.* 2003, GOMES & BRITO, 2002, VIEIRA *et al.*, 2003; BUTTLER & MACHADO, 2003; ALTHEMAN *et al.*, 2003] obtiveram resultados preliminares satisfatórios que atestam a viabilidade do uso da ACBC em substituição ao agregado miúdo, e também a possibilidade do uso de RCC em substituição ao agregado graúdo em matrizes cimentícias. O uso conjunto destes dois resíduos pode ser uma alternativa inovadora na busca do desenvolvimento de materiais ambientalmente adequados que possam mitigar a extração de agregados naturais utilizados na produção de concretos. Neste sentido, a pesquisa em tecnologias alternativas para agregados naturais é importante para criar novas oportunidades com similaridade nos desempenhos ambiental, social, econômico e tecnológico para o desenvolvimento sustentável do nosso país.

O Brasil é o maior produtor de derivados da cana-de-açúcar no mundo (MAPA, 2007). Durante o processo industrial para obtenção do caldo da cana, é gerado o bagaço; esse bagaço é queimado nas caldeiras das usinas para a cogeração de energia elétrica, gerando ao final a areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar. A disposição final desse resíduo é um problema enfrentado pelos administradores das usinas.

Outro grande gerador de resíduos é a indústria da construção civil. Segundo John (2000), a quantidade de RCC pode variar de 136 a 3359 kg/hab.ano. A geração de RCC pode chegar a uma proporção de 2:1 quando comparados com o resíduo domiciliar, sendo 2 toneladas de RCC para cada tonelada de resíduo domiciliar. A falta de tratamento adequado para tais resíduos podem acarretar em diversos problemas ambientais e sociais, como a degradação da qualidade de vida urbana ocasionada por enchentes, poluição visual e até mesmo proliferação de vetores de doenças (FAGURY & GRANDE, 2007).

No entanto, essa situação de geração de resíduos em grandes volumes e disposição inadequada pode ser enfrentada por meio de soluções tecnológicas. A indústria da Construção Civil apresenta-se com um grande potencial para a diminuição de problemas dessa natureza, pela viabilidade da incorporação de resíduos nos materiais de construção (ROCHA & CHERIAF, 2003). Uma vez que a construção civil consome grandes quantidades de recursos naturais, vários estudos estão sendo realizados nesse setor, objetivando a substituição de matérias-primas (cimento e agregados) por resíduos industriais e urbanos, diminuindo a necessidade de exploração dos recursos naturais.

Utilizados como matéria-prima em artefatos de concreto, os resíduos deixariam de ser causa primária de alguns problemas ligados à saúde pública e ao meio ambiente. Adicionalmente, tanto os custos finais de diversos componentes de concreto da construção civil, quanto os relativos à disposição desses subprodutos em aterros específicos poderiam ser substancialmente reduzidos. A interdependência dos conceitos de meio ambiente, valorização de resíduos, saúde e saneamento, apresenta-se bastante clara e as ações nesses setores devem, portanto, ser integradas e voltadas, em última análise, para a melhoria da qualidade de vida da população brasileira (ROCHA & CHERIAF, 2003).

1.1 Justificativa

De modo a tornar clara a contribuição desta pesquisa, apresentam-se diversos impactos previstos no âmbito científico, tecnológico, social, econômico e ambiental no sentido de comprovar a necessidade de estudos que contribuam para o aprimoramento da tecnologia e aplicação de diversos resíduos na produção de artefatos de concreto para construção civil.

1.1.1 Impactos científicos e tecnológicos

Com a utilização de resíduos na produção de componentes para a construção civil, será possível a investigação de novas soluções tecnológicas pertinentes a concretos confeccionados com resíduos, principalmente em relação ao estudo das propriedades físicas e mecânicas de matrizes cimentícias. É importante salientar que para uma efetiva contribuição e transferência tecnológica, torna-se imprescindível a produção de conhecimento científico pertinente a novos materiais para uso na construção civil, desde os aspectos microestruturais até aos relacionados às propriedades físicas e mecânicas e a interação desses resíduos com outros materiais convencionais.

1.1.2 Impacto ambiental

As falhas nos processos de gestão e planejamento para a disposição dos resíduos tem proporcionado graves problemas urbanos e ambientais levando a um gerenciamento oneroso e inadequado nas cidades. A carência de áreas de deposição de resíduos resultante da ocupação e da valorização de áreas urbanas, os altos custos sociais no gerenciamento de resíduos, problemas de saneamento público e contaminação ambiental são alguns desses problemas (JOHN, 2003).

Com tecnologia adequada para a utilização conjunta da areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar como agregado miúdo e do resíduo da construção civil como agregado graúdo, pretende-se diminuir a extração de areia e brita, e também reduzir o volume de resíduos destinados aos aterros.

1.1.3 Impactos sociais e econômicos

O Brasil destaca-se como o maior produtor mundial no complexo sucroalcooleiro, sendo esse setor o responsável por 3,65% do PIB. Esta atividade gera empregos diretos e indiretos, principalmente ligados ao corte manual da cana. Porém, o corte manual de cana deverá ser extinto até 2017 no Estado de São Paulo, dando lugar à colheita mecanizada (JORNAL DA CIÊNCIA, 2007). Esse é o prazo final firmado entre usineiros e a Secretaria de Estado do Meio Ambiente em protocolo assinado em maio de 2007, antecipando o limite anterior (2031), que havia sido imposto por Lei Estadual criada para eliminar gradativamente as queimadas de cana. No estado de São Paulo, cerca de trinta mil trabalhadores atuam no corte da cana, um trabalho insalubre, que pode levar à morte (ALESSI & NAVARRO, 1997).

A extinção das queimadas irá resolver um problema ambiental, mas, muitos trabalhadores deste ramo ficarão desempregados, pois a colheita mecanizada não necessita de muita mão de obra. A proposição de um novo valor agregado à ACBC pode criar uma expectativa de geração de novos postos de trabalho nas atividades de beneficiamento e comercialização de um novo material. Vale salientar que as medidas ambientais que estão sendo adotadas conjuntamente com a política nacional de biocombustíveis só tende a aumentar a quantidade de resíduos provenientes da cana-de-açúcar, e nesse contexto, a presente proposta representa importante contribuição em termos sociais e econômicos.

A geração de resíduos originados na indústria da construção civil só tende a crescer, em cidades de médio e grande porte, pode chegar a uma proporção de 2:1 quando comparados com o resíduo domiciliar, sendo 2 toneladas de RCC para cada tonelada de resíduo domiciliar (PINTO & GONZALES, 2005). John (2000), afirma que a quantidade gerada deste resíduo pode variar de 136 a 3395 kg/hab.ano. As enchentes, poluição visual e

proliferação de vetores de doenças são alguns dos problemas que a inadequada destinação do RCC pode causar à sociedade.

Empresas privadas e prefeituras municipais começaram investir recentemente em usinas de reciclagem de RCC, transformando este resíduo em materiais como agregados, para posterior aplicação. A coleta do RCC é encarada como um negócio na maioria dos municípios brasileiros, uma vez que algumas prefeituras contratam empresas que operam recolhendo e transportando tais resíduos (JOHN & AGOPYAN, 2001).

Justifica-se, por meio dos impactos apresentados, a viabilidade da substituição da areia natural por areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC) e da brita pelo resíduo da construção civil (RCC), como opção na produção de artefatos de concreto para a construção civil. Além de alternativa de disposição ambientalmente adequada, a utilização desses resíduos em concretos visa reduzir o custo do produto final.

1.2 Objetivos

O objetivo geral da presente dissertação de mestrado foi verificar a viabilidade técnica do uso conjunto da ACBC e do RCC como substitutos parciais de agregados naturais em concretos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar e avaliar a composição e as propriedades físicas e químicas da areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC) e dos resíduos da construção civil (RCC);
- Avaliar as propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com diferentes teores de substituição de ACBC e RCC por meio de ensaios de resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade, absorção de água, índice de vazios e massa específica;
- Avaliar a profundidade de carbonatação dos concretos produzidos por meio do ensaio de carbonatação acelerada.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho foi dividido em 7 capítulos.

No Capítulo 1 foi apresentada a introdução, a justificativa e os objetivos do trabalho.

No Capítulo 2 foi apresentada uma revisão da literatura com foco nos seguintes temas: resíduos, areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC) e resíduos da construção civil (RCC). No primeiro tema foi realizada uma abordagem geral sobre os resíduos, destacando os efeitos decorrentes da geração e destinação, bem como a definição e classificação dos mesmos. No segundo tema foi apresentada uma revisão da literatura sobre a areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC), abordando os seguintes assuntos: cana-de-açúcar; o processamento para obtenção de seus derivados; os resíduos gerados; potencialidades do uso da ACBC na construção civil e a utilização da ACBC como agregado em matrizes cimentícias. No terceiro tema foi realizada uma revisão da literatura sobre os resíduos da construção civil com enfoque nos seguintes assuntos: definição; normas e legislações vigentes; geração, destinação e reciclagem; potencialidades do uso dos agregados reciclados de RCC na construção civil e utilização do RCC como agregado em matrizes cimentícias.

No capítulo 3 foram abordadas algumas questões sobre agregados para concretos, com foco nos seguintes assuntos: agregados naturais e artificiais, características dos agregados e características da ACBC e do RCC.

No capítulo 4 foram apresentados os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento experimental deste trabalho.

No capítulo 5 foram apresentados os resultados obtidos e discussões sobre os ensaios realizados, buscando avaliar a potencialidade de aplicação da ACBC e do RCC no concreto.

As considerações finais e conclusões obtidas por meio das análises realizadas bem como sugestões para trabalhos futuros foram apresentadas no capítulo 6.

As referências bibliográficas estão apresentadas no capítulo 7.

2 RESÍDUOS: ACBC E RCC

Um dos grandes problemas ambientais das últimas décadas são os resíduos sólidos urbanos (resíduo domiciliar, industrial ou de serviços) e resíduos agrosilvopastoris (criações e culturas). O crescimento rápido das populações urbanas, a concentração do parque industrial ao redor das cidades, os avanços na agricultura intensiva e o consumismo exacerbado são fatores que contribuem para o aumento na geração de resíduos (FRESCA, 2007).

Como problema urbano, a questão da destinação dos resíduos sólidos se agravou de forma particularmente intensa nas grandes cidades com a rápida urbanização, entre as décadas de 1940 e 1970 (ROCHA, 1992). Ainda que a produção de resíduos sólidos faça parte do cotidiano do ser humano, não se podendo imaginar um modo de vida que não gere resíduos, esses, manejados inadequadamente, oferecem alimento e abrigo para muitos vetores de doença. Além disso, a decomposição desses resíduos, acarretando a formação de lixiviados, pode levar à contaminação do solo e das águas subterrâneas (PHILIPPI & AGUIAR, 2005; MOTA, 2003; ZIONI, 2005).

Além da diversidade dos resíduos produzidos em função das várias atividades contidas na malha urbana, há uma grande quantidade podendo ser investigada para uso na construção civil. Mesmo assim, apenas uma pequena parcela desses resíduos vem recebendo tratamento ou destinação adequada, permanecendo armazenados nas próprias instalações onde foram gerados, ou até mesmo, causando danos ao meio ambiente por sua má disposição (ROCHA & CHERIAF, 2003).

O grande desafio dos países consiste em descobrir maneiras para destinar corretamente as 30 bilhões de toneladas de resíduos sólidos produzidos anualmente no planeta (NINNI, 2011).

O consumo global vem crescendo mais que a população nos últimos anos, uma vez que o consumo cresceu 6 vezes, enquanto a população apenas 2,2 vezes. Com base nesses dados, pode-se inferir que os bens de consumo estão mais acessíveis à população e consequentemente, o desperdício tende a aumentar (NINNI, 2011).

De acordo com a CETESB, são produzidos cerca de 28 mil toneladas de resíduos domiciliares diariamente apenas no estado de São Paulo. A disseminação de doenças,

poluição do ar, contaminação do solo e de águas subterrâneas são problemas acarretados pela falta de tratamento ou disposição correta desses resíduos (CETESB, 2010).

Segundo levantamento realizado pela ABRELPE no ano de 2011, apenas 58,1% dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil são encaminhados aos aterros sanitários, isso significa que cerca de 75 mil toneladas de resíduos são destinados em locais impróprios.

A NBR 10004 (ABNT, 2004) define resíduos sólidos como: “Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível”.

Pela mesma NBR 10004 (ABNT, 2004), os resíduos sólidos são classificados em:

- ✓ Resíduos classe I – perigosos: são os resíduos que apresentam riscos à saúde ou ao meio ambiente em função de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade;
- ✓ Resíduos classe II – não perigosos
 - Resíduos classe II A – não inertes: são aqueles com possibilidade de acarretar riscos à saúde ou ao meio ambiente em função de suas características de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade;
 - Resíduos classe II B – inertes: são os resíduos que não apresentam riscos à saúde pois apresentam constituintes solúveis em água em concentrações superiores aos padrões de potabilidade;

No ano de 2010 foi instituída no Brasil a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), com esta lei, os municípios deverão apresentar um plano de gerenciamento de resíduos sólidos até o ano de 2014. Esta política visa a não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Com isso, deverão ser desenvolvidas tecnologias para utilizar ao máximo todos os tipos de resíduos gerados, apenas os rejeitos serão encaminhados aos aterros. Segundo a PNRS, os rejeitos são os “resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada”.

2.1 AREIA DE CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR - ACBC

Neste capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica sobre a cana-de-açúcar e os resíduos derivados de seu processo, bem como as potencialidades de aplicação da areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar.

Foi utilizada a mesma terminologia definida por Almeida (2013) onde o termo CBC (cinza do bagaço da cana-de-açúcar) refere-se ao material obtido a partir de processos específicos para uso como material pozolânico; e o termo ACBC (areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar) refere-se ao material obtido nas caldeiras das usinas para uso como material inerte (agregado). Vale salientar que o material recolhido nas caldeiras das usinas possui grande quantidade de areia do solo em sua composição provenientes da lavoura de cana-de-açúcar, por esse motivo que foi inserida a palavra areia para definir o material utilizado nesta pesquisa.

2.1.1 A cana de açúcar

O cultivo da cana-de-açúcar existe desde a antiguidade. Foram encontrados registros sobre sua existência nas escrituras mitológicas dos hindus onde se declara como criador Viswamitra para o paraíso de Raja Ikkhakhu, o uso da cana-de-açúcar para os homens na terra só foi permitido quando esse paraíso foi destruído pelos demônios. Até o século XVII a planta era considerada como remédio e também como artigo de luxo. Seu aparecimento ocorreu, primeiramente, nas ilhas do Arquipélago da Polinésia. Sua cultura nas Américas iniciou graças às caravelas que transportavam as mudas da cana-de-açúcar junto com suas provisões. Nesta época as populações descobriram o potencial energético da cana-de-açúcar e a estocavam para levar em suas viagens (CESNIK & MIOCQUE, 2004).

Em 1502, Martim Afonso introduziu as primeiras mudas de cana-de-açúcar no Brasil. Lineu, em 1753 descreveu a cana-de-açúcar como *Saccharumoffcinarum* e *Saccharumspicatum*; atualmente a classificação aceita pela maioria dos técnicos foi feita por Jeswiet, onde: gênero - *Saccharum*; espécies - *S. barberi*, Jeswiet; *S. edule*, Hask; *S. officinarum*; *S. robustum*, Jeswiet; *S. sinensis*, (Roxb) Jeswiet e *S. spontaneum*, L. (CESNIK & MIOCQUE, 2004).

Segundo relatos de Brasília Magalhães, o primeiro engenho fundado no Brasil foi de Pedro Luiz Góis em 1532. Depois de 1615, o cultivo da cana atingiu o planalto paulista destacando-se como maior centro açucareiro de São Paulo, situado na região de Itu (CESNIK & MIOCQUE, 2004).

A cana-de-açúcar é classificada como gramínea; constituída por uma parte aérea (colmos, folhas e inflorescências) e uma parte subterrânea (raízes e rizomas), é uma planta nativa das regiões tropicais onde o solo é fértil e drenado (CESNIK & MIOCQUE, 2004).

Esta gramínea, que possui grande eficiência no processo de fotossíntese, utiliza entre 2% e 3% da radiação solar incidente na produção de biomassa (LORA *et al.*, 2001); a Tabela 1 apresenta a composição química da cana de açúcar.

Tabela 1 - Composição típica da cana-de-açúcar

Composto	Quantidade (% em massa)
Sacarose (pol*)	12,50
Fibras	10,00
Água	74,5
Outros	3,00

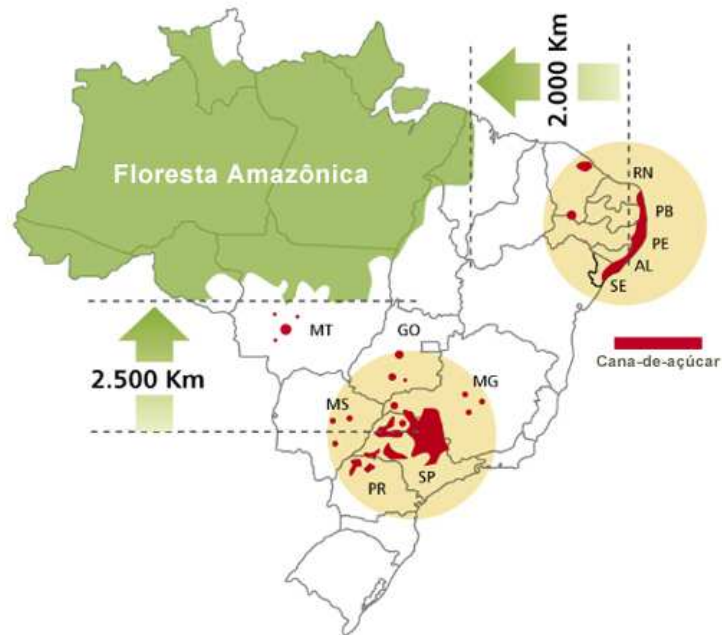
*pol: percentual de sacarose aparente no caldo de cana-de-açúcar.
(Fonte: CESNIK & MIOCQUE, 2004)

O esmagamento dos colmos propicia a extração de seu caldo, matéria prima utilizada na produção de açúcar, etanol, fermento e outros derivados utilizados na indústria química e alimentícia. (CESNIK & MIOCQUE, 2004). O clima ideal para cultivar a cana-de-açúcar é aquele que apresenta duas estações distintas; uma quente e úmida para proporcionar a germinação, perfilamento e desenvolvimento vegetativo; e outra fria e seca, para promover a maturação e o acúmulo de sacarose (MAPA, 2007).

Os maiores produtores de cana-de-açúcar são: Brasil, Índia, Tailândia e Austrália, destacando-se como maior produtor mundial o Brasil, que possui como vantagem a safra em dois períodos distintos: a safra da região norte é colhida no período de novembro a abril; e a da região centro-sul, de maio a novembro. Devido esta vantagem, o Brasil alimenta o mercado interno e externo com a produção de açúcar e álcool durante o ano todo (UNICA, 2010).

O mapa da Figura 1 indica as áreas onde se concentram as plantações de cana-de-açúcar e usinas produtoras de seus derivados (açúcar, álcool, etc.). O Brasil possui 434 usinas associadas com a produção de açúcar e álcool, sendo 250 usinas mistas (produzem açúcar e álcool), 168 produzem apenas álcool e 16, apenas açúcar. Vale salientar que as plantações de cana-de-açúcar ocupam cerca de 8 milhões de hectares do país (MAPA, 2010).

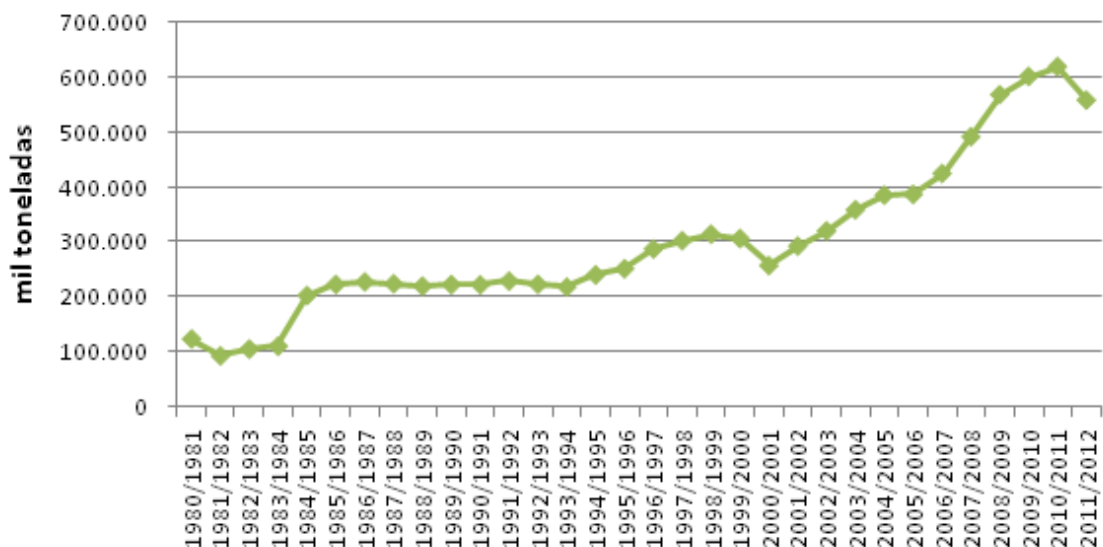
Figura 1 - Mapa da distribuição da cana-de-açúcar no Brasil



(Fonte: ÚNICA, 2008)

De acordo com a ÚNICA, a produção de cana-de-açúcar para a safra 2011/2012 é de cerca de 560 milhões de toneladas, na Figura 2 pode-se verificar a evolução da produção de cana-de-açúcar desde a safra de 1980/1981 até a safra de 2011/2012.

Figura 2 - Produção de cana-de-açúcar no Brasil



(Fonte: ÚNICA, 2013)

A área destinada ao cultivo de cana para a safra 2012/2013 está estimada em cerca de 8,5 milhões de hectares, sendo que 52% desta área localiza-se no estado de São Paulo. Para a safra 2012/2013, estima-se uma produção de 595,1 milhões de toneladas de cana-de-açúcar (CONAB, 2012).

A lavoura de cana-de-açúcar continua se expandindo no Brasil. A área de cana-de-açúcar colhida destinada à atividade sucroalcooleira está estimada em 8.033,6 mil hectares, que estão distribuídos em todos estados produtores. A área colhida da safra de 2010/2011 teve aumento de 8,40% em relação à safra anterior. Esse aumento da área pode ser explicado devido ao crescimento natural das áreas das usinas recentemente instaladas, das áreas de renovação e, também, do aumento de moagem em determinadas unidades produtivas (CONAB, 2012).

2.1.2 O processamento da cana-de-açúcar e seus derivados

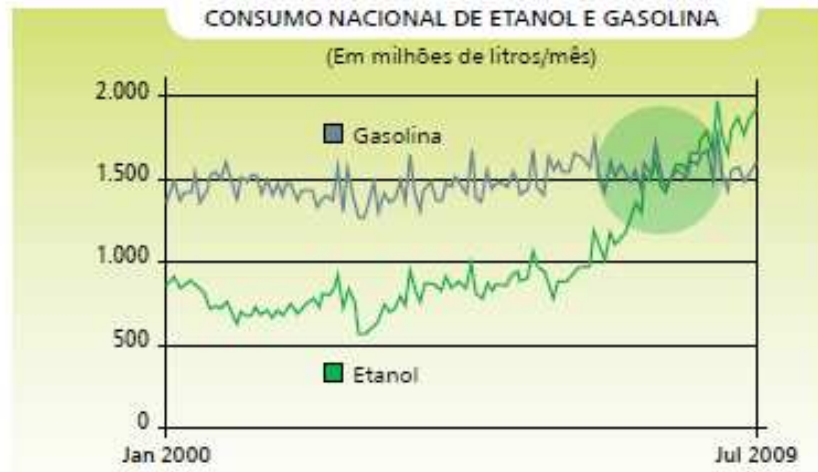
Em 1953, foi criada, no estado de São Paulo, uma estação experimental de pesquisas, a Cooperativa de Usineiros do Oeste de São Paulo localizada na região de Ribeirão Preto, no município de Dumont. O programa de melhoramento genético da cana-de-açúcar foi iniciado em 1968, na Cooperativa Central dos Produtores de Açúcar e Álcool incorporando a Copereste e sua estação experimental (CESNIK & MIOCQUE, 2004).

O instituto de Açúcar e Álcool (IAA) criou, em 1971, o Plano Nacional de Melhoramento da Cana-de-açúcar (Planalsucar) com abrangência nacional (CESNIK & MIOCQUE, 2004). No Brasil, a cana-de-açúcar começou ser cultivada no início do século XVII, mas a obrigatoriedade de adicionar álcool à gasolina foi implantada somente em 1931 no governo de Getúlio Vargas (LEME, 2004).

A segunda etapa do programa PRÓALCOOL iniciou em 1979, após o segundo choque do petróleo. Nesta etapa, o principal objetivo era produzir álcool hidratado para substituir a gasolina. Este combustível alternativo obteve grande sucesso, e em 1985, 96% da frota de veículos possuíam motores movidos a álcool hidratado, com isso, a produção de cana-de-açúcar aumentou significativamente (WAACK & NEVES, 1998).

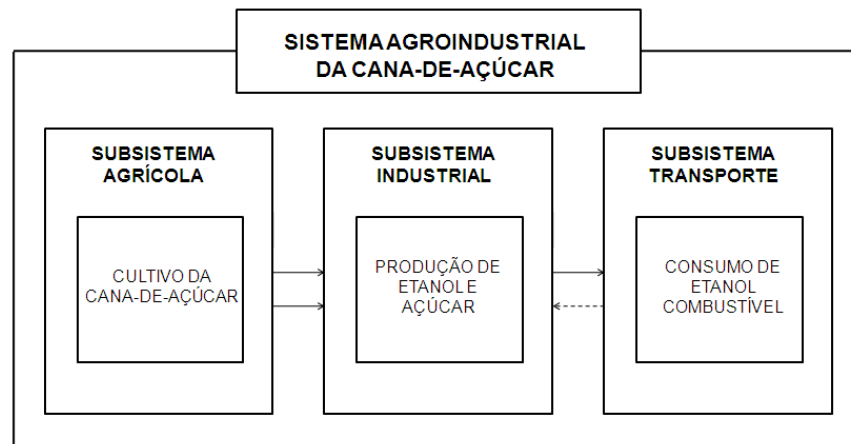
Os motores flex foram lançados em 2003 pelas indústrias automotivas nacionais. São motores que operam com álcool ou gasolina e também com a mistura dos dois combustíveis, fator que incentiva ainda mais a produção de álcool a partir da cana de açúcar no país (CORDEIRO, 2006).

A oscilação do preço do Petróleo juntamente com os problemas ambientais ligados aos combustíveis fósseis salientou os debates sobre biocombustíveis. Desde então a participação do petróleo como fonte de energia passou de 45,5% em 2000 para 37,3% em 2008 (queda de 8,2%); no final de 2008 cerca de 16% da energia consumida no país foi gerada por derivados da cana-de-açúcar. O gráfico da Figura 3 retrata o crescimento do consumo de etanol no Brasil quando comparado com a gasolina - período de 2000 a 2009 (ÚNICA, 2009).

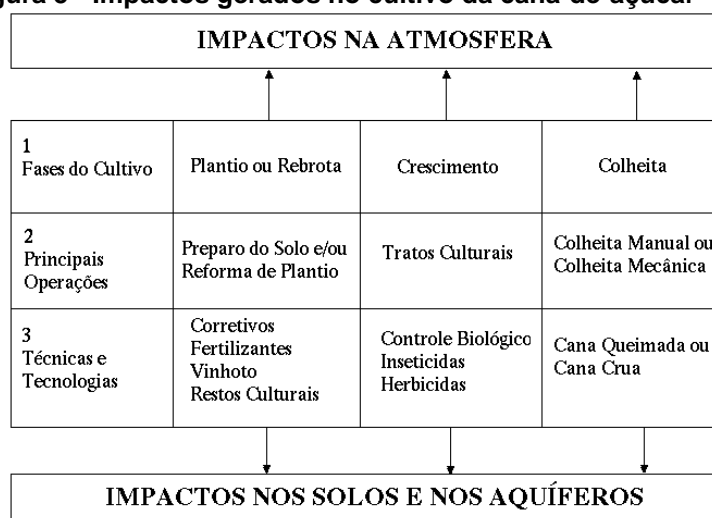
Figura 3 - Consumo nacional de etanol e gasolina

(Fonte: ÚNICA, 2009)

O sistema agroindustrial sucroalcooleiro consiste em três subsistemas: o subsistema agrícola, que é responsável pelo cultivo da cana-de-açúcar; o subsistema industrial, responsável pela produção de açúcar e etanol e o subsistema de transporte. Todo processamento da cana-de-açúcar gera impactos, desde as fases de cultivo até o produto final. A Figura 4 e a Figura 5 ilustram o sistema agroindustrial e os impactos gerados no cultivo da cana (EMBRAPA, 2010).

Figura 4 - Sistema Agroindustrial da cana-de-açúcar

(Fonte: adaptado EMBRAPA, 2010)

Figura 5 - Impactos gerados no cultivo da cana-de-açúcar

(Fonte: EMBRAPA, 2010).

O Brasil produz cerca de 25% da produção mundial de açúcar e 20% da produção mundial de etanol, desta forma, é considerado o maior produtor mundial de açúcar e segundo maior produtor mundial de etanol (ÚNICA, 2013).

Além do açúcar e etanol, a cana-de-açúcar é utilizada como matéria prima para a fabricação de outros produtos, como a rapadura, melado e aguardente, e também pode ser utilizada para alimentação animal (MAPA, 2007). O custo de produção do açúcar brasileiro chega a ser quatro vezes menor que o custo médio de produção de açúcar de beterraba em outros países. O consumo médio per capita anual de açúcar passou de, cerca de 15 quilos de açúcar por ano, em 1970, para 50 quilos, na década de 1990 (EMBRAPA, 2010).

Estima-se para a safra 2012/2013, uma produção de 37,6 milhões de toneladas de açúcar, sendo que cerca de 70% deste açúcar é produzido na região sudeste. Para o etanol, estima-se uma produção de 23,6 bilhões de litros, somente o estado de São Paulo produz cerca de 50% deste total (CONAB, 2012).

Pode ser verificado na Tabela 2 a distribuição em mil toneladas da cana moída na indústria sucroalcooleira nacional para a produção de açúcar e etanol.

Tabela 2 - Estimativa de Produção e Destinação da cana moída na safra 2012/13

Região	Indústria Sucroalcooleira		
	Total (1000t)	Açúcar (1000t)	Etanol (1000t)
Norte	3.100,4	457,7	2.624,7
Nordeste	56.593,9	34.419,4	22.174,5
Centro-Oeste	106.257,5	31.624,2	74.633,3
Sudeste	387.897,4	203.615,8	184.281,6
Sul	41.277,4	24.243,5	17.033,9

Estado	Indústria Sucroalcooleira		
	Total (1000t)	Açúcar (1000t)	Etanol (1000t)
SP	330.195,5	177.645,2	152.550,3

(Fonte: CONAB, 2012)

De acordo com os dados da CONAB (2012), o estado de São Paulo concentra a maior área plantada de cana-de-açúcar destinada à atividade sucroalcooleira, responsável por cerca de 55% da produção.

Vale salientar que o setor sucroalcooleiro emprega cerca de 3,6 milhões de trabalhadores direto ou indiretamente, reúne mais de 72.000 agricultores e fatura cerca de R\$ 40 bilhões por ano (DIEESE, 2010).

2.1.3 Resíduos gerados no setor sucroalcooleiro

A produção de etanol aumentou consideravelmente a partir de 1970, e, conseqüentemente, a destinação correta dos resíduos passou a ser um grande problema para as indústrias (LEÃO, 2002).

Segundo Jendiroba (2006), o descarte de resíduos gerados no setor sucroalcooleiro era realizado de maneira inóspita no ambiente, o que afetava diretamente os recursos naturais. Muitas indústrias deste setor localizam-se próximas a cursos d'água a fim de garantir a utilização dos recursos hídricos em seus processos. Por essa razão, o descarte de resíduos era realizado diretamente nos rios sem tratamento algum.

O aumento da produção e o crescimento do número de indústrias geraram maior preocupação no descarte dos efluentes diretamente nos cursos d'água; os resíduos passaram a receber tratamento a fim de reduzir o teor de matéria orgânica, a concentração de sólidos em suspensão e alteração do pH para valores entre 6 e 7. Atualmente, as indústrias precisam se adequar respeitando os critérios ambientais para prevenir a poluição (JENDIROBA, 2006).

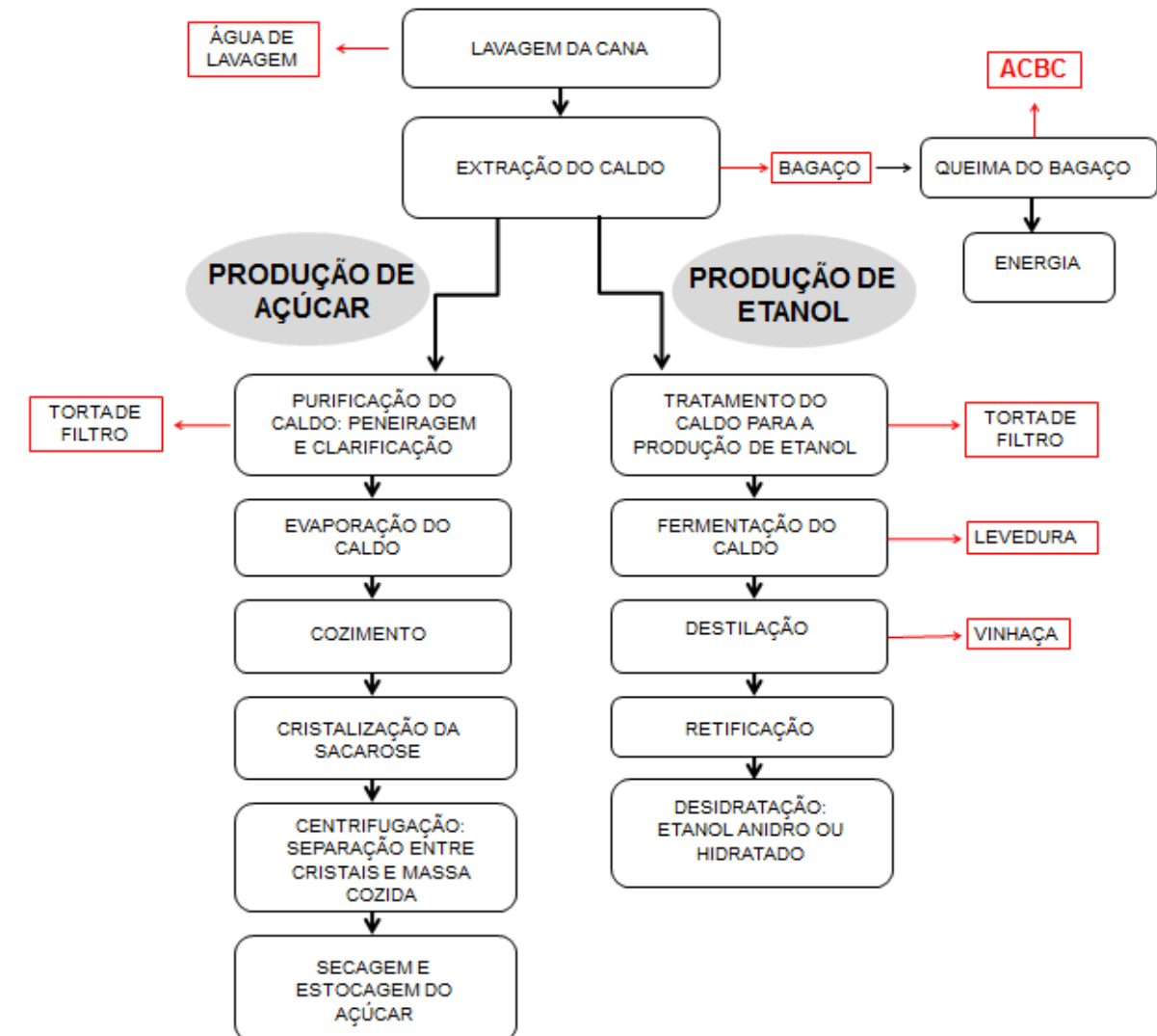
Em decorrência dos grandes volumes de resíduos gerados, algumas áreas começaram a ser reservadas para o despejo de tais resíduos para evitar o descarte nos rios; esta prática não foi eficiente devido os grandes impactos ambientais causados e acabou abandonada (JENDIROBA, 2006).

Durante o processo de colheita da cana-de-açúcar é gerado um resíduo conhecido como palha ou palhada, que geralmente é utilizado na adubação das próprias lavouras juntamente com o vinhoto. Este resíduo pode ser utilizado também na geração de vapor e como óleo combustível em processos de aquecimento industrial. Geralmente, a cana-de-açúcar é queimada para facilitar a colheita e a quantificação dessa palha fica comprometida. Estima-se como valor médio 18 toneladas de palha seca por hectare de área plantada (FIESP, 2001).

O setor sucroalcooleiro envolve uma série de processos industriais dos quais geram uma grande quantidade de resíduos. Os principais resíduos gerados no processo produtivo são: a palha, o bagaço, a areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC) e as embalagens de defensivos agrícolas ou agrotóxicos (FIESP,2001).

A produção de açúcar e etanol gera grande quantidade de resíduos, os principais são: vinhaça, torta de filtro e o bagaço; estima-se que uma tonelada de cana pode gerar: de 800 a 1000 litros de vinhaça, de 100 a 400 kg de torta de filtro e 260 kg de bagaço, todos estes resíduos são aproveitados. Outros resíduos como águas residuárias, óleo fúsel e levedura são menos preocupantes, apresentam menores quantidades e também são reaproveitados (JENDIROBA, 2006). Pode-se verificar na Figura 6 as etapas de produção de açúcar e etanol e os resíduos gerados neste processo.

Figura 6- Etapas do processo de produção de açúcar e etanol



(Fonte: adaptado EMBRAPA, 2013)

O processo de lavagem da cana gera cerca de 8m³ de efluente por tonelada de cana moída. Essa água residuária é colocada para a recirculação no processo de lavagem, sendo em boa parte, reutilizada (FIESP, 2001).

São gerados, anualmente no Brasil, cerca de 320 bilhões de litros de vinhaça, 88 milhões de toneladas de torta de filtro e 92 milhões de toneladas de bagaço pelo processamento da cana-de-açúcar nas usinas e destilarias. Cabe ressaltar que são necessários 12 kg de cana-de-açúcar para produzir 1 litro de etanol em uma destilaria (SPADOTTO, 2007).

Segundo Jendiroba (2006), o principal resíduo líquido proveniente da cana-de-açúcar é a vinhaça, também conhecida como vinhoto, restilo, caldo ou garapão; o mesmo exige maior controle ambiental.

Muitos estudos desenvolveram a utilização da vinhaça como fertilizante para uso no solo nas áreas de produção de cana-de-açúcar. Para cada litro de álcool produzido é gerado de 10 a 15 litros de vinhaça. A vinhaça possui alto valor fertilizante, mas seu poder poluente é cerca de dez vezes maior que o do esgoto doméstico, isto ocorre devido seu alto teor de matéria orgânica, baixo pH, elevada corrosividade e altos índices de demanda bioquímica de oxigênio (DBO). Sua elevada temperatura na saída dos destiladores pode provocar destruição da fauna e flora (FREIRE & CORTEZ, 2000).

A possibilidade de uso da vinhaça na irrigação foi reforçada devido à grande quantidade de água, potássio e matéria orgânica existentes neste resíduo, e sua utilização gera aumento de produtividade da lavoura. Atualmente cerca de 60 a 80% do volume gerado de vinhaça é utilizado como fertilizante e o restante é despejado em áreas podendo causar impactos ambientais (JENDIROBA, 2006).

Para realizar a irrigação utilizando a vinhaça, é necessário implementar estruturas, como: tanques de armazenamento, canais de distribuição, circuitos hidráulicos com estações de bombeamento, adutoras e depósitos. Porém, a utilização de elevadas quantidades de vinhaça no solo pode promover contaminação das águas subterrâneas devido o aumento de lixiviação de íons (LEÃO, 2002).

A torta de filtro é um resíduo sólido orgânico proveniente da clarificação do caldo e da filtração durante a produção de açúcar. É utilizada no processo de adubação de plantio de canaviais e destaca-se pelo seu elevado teor de fósforo e presença de material orgânico proveniente de resíduos de cana. Alguns sistemas adicionam cinzas da caldeira e fuligem dos sistemas de filtração junto à torta de filtro (JENDIROBA, 2006).

A cada tonelada de cana moída, são produzidos 30 kg de torta de filtro nas usinas de açúcar. A dosagem usual deste resíduo varia de 10 a 15 toneladas por hectare e em alguns casos é enriquecida com outros produtos a fim de melhorar a nutrição das plantas. Este resíduo deve ser armazenado próximo a indústria para ser utilizado na época de plantio, pois este período não coincide integralmente com o período da produção industrial (JENDIROBA, 2006).

Após a crise energética de 2001, especialistas do setor energético começaram a pensar em outras fontes de energia além das hidrelétricas, foi a partir daí que se ressaltou a utilização da energia excedente do processo de queima do bagaço da cana-de-açúcar. Algumas indústrias canavieiras começaram investir em equipamentos para viabilizar a cogeração de energia para comercialização (PIACENTE, 2004).

Atualmente o bagaço da cana-de-açúcar é utilizado na geração de energia quando queimados; assim as unidades industriais não consomem energia elétrica das redes de

distribuição de energia durante o período de safra. O grande desafio é proporcionar esta geração de energia ininterruptamente, pois atualmente ela ocorre no período de seis meses (JENDIROBA, 2006).

Rodrigues (2001) afirma que a cada 1000 kg de cana moída é gerado cerca de 240 kg de bagaço que gera 70 kW/hora de energia elétrica, apenas 30 kW/hora deste total é utilizado na produção de açúcar e álcool e o restante é “desperdiçado”.

Segundo Piacente (2004), a queima do bagaço gera menos impacto ambiental quando comparado com outros combustíveis fósseis, pois libera pouco SO_2 e SO_3 (compostos com base de enxofre) e também pela queima ser lenta, forma-se pouco óxido nitroso. A queima do bagaço da cana-de-açúcar também libera CO_2 , mas a biomassa queimada é reposta no ciclo seguinte, tornando tal emissão insignificante quando comparado com outros combustíveis (CORDEIRO, 2006). Na Tabela 3 estão apresentados os valores de emissão de CO_2 resultantes da queima de alguns combustíveis.

Tabela 3 - Comparação dos valores de emissões de CO_2 por diferentes combustíveis na geração de energia elétrica

Tipo de Combustível	Emissões (kg CO_2/kWh)	Condições
Cana-de-açúcar	0,057-0,110	Ciclo completo incluindo energia indireta dos equipamentos e insumos
Madeira	0,05	Ciclo completo incluindo energia indireta dos equipamentos e insumos
Óleo combustível	0,87	Somente queima combustível
Gás natural	0,38	Somente queima combustível

Fonte: FIESP/CIESP, 2001.

Além da geração de energia, o bagaço pode ser utilizado na produção de materiais de construção. Indústrias de laminados feitos com bagaço da cana se instalaram primeiramente nos Estados Unidos, Suécia, Grã-Bretanha, Canadá e Finlândia (FREIRE, 2003).

O bagaço pode ser utilizado na produção de papel e celulose, produção de furfural (aldeído tóxico, farináceo), carvão siderúrgico e também na produção do próprio álcool. Alguns fatores como o sistema de colheita (manual ou mecanizado), temperatura, eficiência do processo, idade da cultura, estágio de corte, clima, entre outros, interferem diretamente na quantificação desse resíduo. Cerca de 95% do bagaço gerado é queimado em caldeiras para a geração de energia (FIESP, 2001).

Segundo Cordeiro (2006), o bagaço da cana-de-açúcar pode ser utilizado na produção de combustíveis (natural, briquetado, peletizado, enfardado), na hidrólise (rações, furfural, lignina), polpa de papel, celulose e aglomerados; sua composição consiste aproximadamente de: 50% de celulose, 25% de hemicelulose e 25% de lignina.

Outra destinação em estudo para o bagaço da cana-de-açúcar é na fabricação de etanol de segunda geração, que consiste em transformar o bagaço em biocombustível através de reações de hidrólise (processo químico de quebra de moléculas) (REVISTA FAPESP, 2013).

Com o excesso de bagaço produzido, as empresas estabeleceram a estrutura necessária para comercializar a energia gerada. Anteriormente este excesso era doado, comercializado para outros usos como alimentação animal e em caldeiras de outros processos industriais. Cerca de 40 unidades da região Centro-Sul implementaram sistemas de co-geração de energia utilizando o bagaço da cana-de-açúcar (JENDIROBA, 2006).

Em relação à geração de cinzas com a queima do bagaço, são geradas aproximadamente 25 kg de cinza a cada tonelada de bagaço queimado; as características destas cinzas variam de acordo com as condições de queima. Apesar da elevada umidade, o bagaço possui boa ignição devido o elevado teor de materiais voláteis (87% em base seca) e sua temperatura de chama pode ser superior a 1000°C (CORDEIRO, 2006).

Segundo trabalho apresentado pela FIESP (2001), as cinzas residuais (ou areia de cinza) do processo de queima do bagaço são utilizadas como adubo juntamente com a torta de filtro e palha nas próprias lavouras de cana. A Tabela 4 quantifica a geração de bagaço e cinzas nos anos de 2001/2002 no estado de São Paulo e no Brasil.

Tabela 4 - Total de resíduos de bagaço usados nas caldeiras e produção de cinzas – 2001/2002

Local	Geração de resíduos de bagaço (milhões de toneladas)	Geração de resíduos de cinza (milhões de toneladas)
Brasil	66,70	1,59
São Paulo	46,90	1,12

(Fonte: FIESP, 2001)

Para um teor de umidade de 50%, a temperatura de ignição pode variar de 500°C a 600°C; para uma umidade de 35% a 40% a temperatura fica na faixa de 300°C a 400°C (COELHO, 1999).

Geralmente, a cinza residual é utilizada como adubo nas lavouras de cana, mas alguns estudos comprovaram que este resíduo possui poucos nutrientes e que sua degradação é lenta (MANHÃES, 1999), o que torna pouco viável seu uso para adubação.

Estima-se que uma tonelada de cana processada gere aproximadamente 250 quilos de bagaço, e 250 quilos de bagaço queimado gere 6 quilos de areia de cinza. Cerca de 95% do bagaço são destinados para a queima em caldeiras, ficando apenas 5% para serem usados para outros fins (FIESP/CIESP, 2001).

Considerando uma produção de 595,1 milhões de toneladas de cana-de-açúcar para a safra 2012/2013 (CONAB, 2012), pode-se estimar uma produção de 3,4 milhões de toneladas de areia de cinza residual, sendo que 95% da produção de bagaço são destinados à queima em caldeiras.

Um dos grandes problemas enfrentados pelas indústrias sucroalcooleiras está relacionado à disposição da areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar. Na maior parte dos casos, a ACBC é aproveitada no campo como adubação orgânica nas lavouras de cana (apesar de ser um material com poucos nutrientes) ou descartadas na natureza sem um manejo eficiente.

2.1.4 Potencialidades do uso da ACBC na construção civil

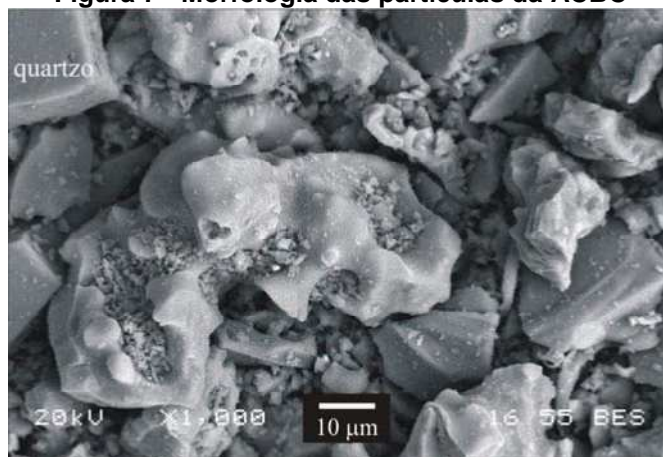
Uma proposta para a utilização da areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar, com base nos resultados conhecidos até o momento, seria a de estudar formas de aproveitamento desse resíduo como matéria-prima em artefatos para a construção civil. Dessa forma, seria possível atenuar os problemas consequentes da sua má disposição utilizando-a como matéria-prima no desenvolvimento de tecnologias alternativas para a infraestrutura das cidades.

Pesquisadores (JOHN *et al.*, 2003; CORDEIRO *et al.*, 2009; FREITAS *et al.*, 1998; SOUZA *et al.*, 2007; SINGH, 2000) vêm estudando a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) como adição mineral em concretos. Para utilizar este resíduo como substituto do aglomerante são necessários alguns tratamentos térmicos, ou moagens em tempos prolongados ou até submeter o bagaço de cana a lavagem, com a finalidade de conferir as características de pozolanicidade necessárias.

Grande parte da composição da cinza (mais de 60%, em massa) deve-se a presença de dióxido de silício. Este elemento é absorvido pelas raízes da planta na forma de ácido monossílico e deposita-se na parede externa das células da epiderme como sílica gel no processo de transpiração (BARBOZA FILHO & PRABHU, 2002). As partículas de quartzo

(areia) também são uma fonte de sílica na composição da cinza (Figura 7), pois o processo de lavagem não elimina totalmente a areia do bagaço (CORDEIRO, 2006).

Figura 7 - Morfologia das partículas da ACBC



(Fonte: Cordeiro, 2006)

O teor de sílica (amorfa ou cristalina) deve ser analisado para realizar a aplicação da cinza em concretos ou argamassas. A sílica amorfa possui grande reatividade quando incorporada na confecção de concretos e argamassas, pois sua estrutura atômica não é definida; já a sílica cristalina possui estrutura atômica definida e baixa reatividade com os materiais cimentantes (COIMBRA *et al.*, 2002).

Cinzas que possuírem maior teor de sílica cristalina incorporam melhor quando utilizadas em substituição a areia, uma vez que os agregados têm função apenas de carga, nas argamassas e concretos, e também não precisam ter função aglomerante ou cimentante.

A reatividade das cinzas depende da sua composição química, que é influenciada pelo tipo de solo, processo de produção e pelo produto que gerou a cinza. Quando o processo de queima não é eficiente a cinza apresenta um elevado teor de carbono. Cinzas predominantemente siliciosas, com finura adequada e que possam ser produzidas no estado vítreo podem ser utilizadas como aglomerantes (JOHN *et al.*, 2003).

Cordeiro (2005) realizou estudos utilizando a CBC (cinza do bagaço da cana-de-açúcar) da Companhia Açucareira Usina Barcelos do município de São João da Barra /RJ. Tanto a CBC, quanto o quartzo passaram por processo de moagem para avaliar a reatividade destes quando incorporados ao cimento Portland. A atividade pozolânica da CBC foi 81% e do quartzo moído 62%, a diferença é considerável, pois de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 1992), materiais que apresentarem valores acima de 75% são classificados como pozolana, ou seja, a cinza do bagaço da cana-de-açúcar em questão possui reatividade considerável quando incorporada ao cimento Portland. O teor de sílica

encontrado na CBC e no quartzo é elevado e a perda ao fogo reduzida, como se pode observar na Tabela 5. O quartzo possui elevada estabilidade físico-química devido sua natureza inerte.

Tabela 5 - Composição química, em termo de óxidos, e propriedades físicas da cinza residual do bagaço da cana-de-açúcar e do quartzo moído

Composto	CBC (%)	Quartzo moído (%)
SiO ₂	78,30	97,00
Al ₂ O ₃	8,60	0,40
Fe ₂ O ₃	3,60	0,10
CaO	2,20	0,50
Na ₂ O	0,10	-
K ₂ O	3,50	-
MgO	0,10	0,50
P ₂ O ₅	1,10	-
Perda ao fogo	0,42	0,50

(Fonte: Cordeiro ., 2005)

A CBC apresenta características químicas adequadas para o emprego como aditivo mineral, principalmente devido os altos teores de dióxido de silício e perda ao fogo, mas, é necessário realizar moagem dos grãos para aumentar a superfície específica das partículas garantindo melhor reatividade (CORDEIRO, 2006).

Cordeiro *et al.*, (2009) concluiu que a cinza do bagaço da cana-de-açúcar apresenta potencial para ser utilizada como matéria prima para a produção de pozolanas, desde que moídas e queimadas em temperaturas controladas. A pozolana é o material inorgânico de origem natural ou artificial, que pode apresentar propriedades aglomerantes quando finamente moído e em presença de água e hidróxido de cálcio.

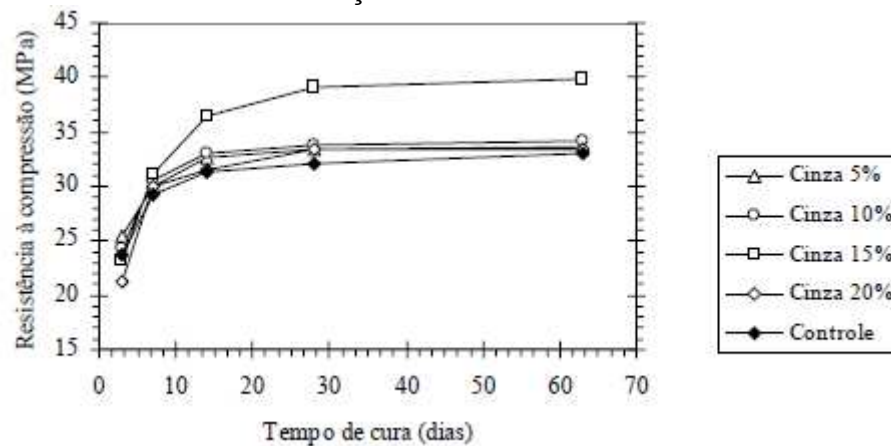
Um estudo realizado por Hernández, (1998) visando controlar a reação entre a cal e os resíduos da indústria sucroalcooleira mostram que a cinza do bagaço da cana-de-açúcar não age como pozolana reativa. Os resultados do ensaio de resistência à compressão foram melhores para as pastas onde foram incorporadas as cinzas da palha da cana-de-açúcar; os corpos-de-prova com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar apresentaram valores duas vezes menores que os corpos-de-prova com a cinza da palha da cana-de-açúcar.

Pesquisadores da Faculdade de Ciências Tecnológicas da Universidade Estadual Paulista originaram um composto cerâmico utilizando a areia extraída da cinza do bagaço da cana-de-açúcar. A massa cerâmica que é utilizada para fabricar a cerâmica vermelha tem grande potencial de aceitação quando incorporados à resíduos da indústria sucroalcooleira. São misturados fundentes químicos com a argila e a areia de quartzo para

originar a massa cerâmica que pode ser utilizada na fabricação de tijolos, telhas e placas cerâmicas (AGÊNCIA FAPESP, 2007).

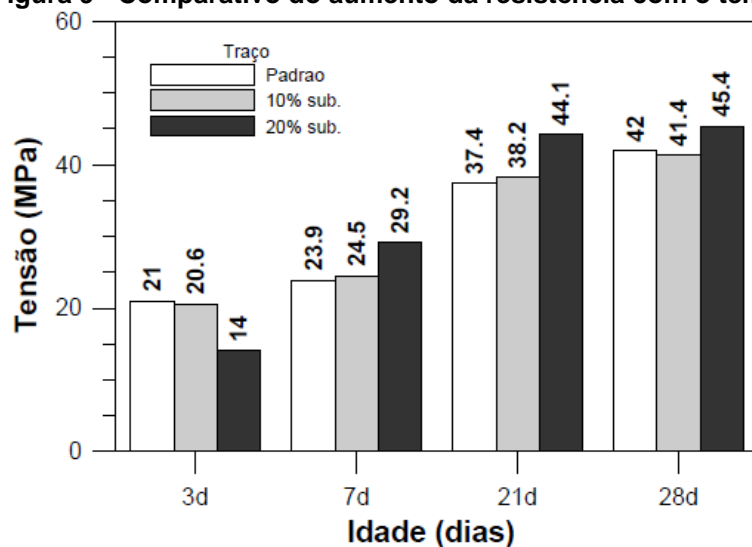
Freitas *et al.* (1998) utilizou cinza residual na substituição do cimento Portland para confeccionar argamassas com teores de 5%, 10%, 15% e 20% e verificou que a mistura de 15% apresentou melhor resultado de resistência à compressão (Figura 8); já as demais misturas não apresentaram diferenças significativas quando comparadas com a argamassa controle (sem adição de cinza).

Figura 8 - Resistência à compressão de argamassas com diferentes teores de CBC em substituição ao cimento Portland



(Fonte: Freitas, 1998)

Souza *et al.* (2007) utilizou a cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição ao cimento Portland nas proporções de 10% e 20%; estas cinzas foram queimadas em caldeiras sem controle de temperatura, mas houve controle na moagem das mesmas. Os resultados obtidos foram satisfatórios, pois as argamassas confeccionadas com a cinza obtiveram resultados de resistência à compressão superior as argamassas convencionais (sem adição de cinza) para as idades de 7, 21 e 28 dias (Figura 9).

Figura 9 - Comparativo do aumento da resistência com o tempo

(Fonte: Souza, 2007)

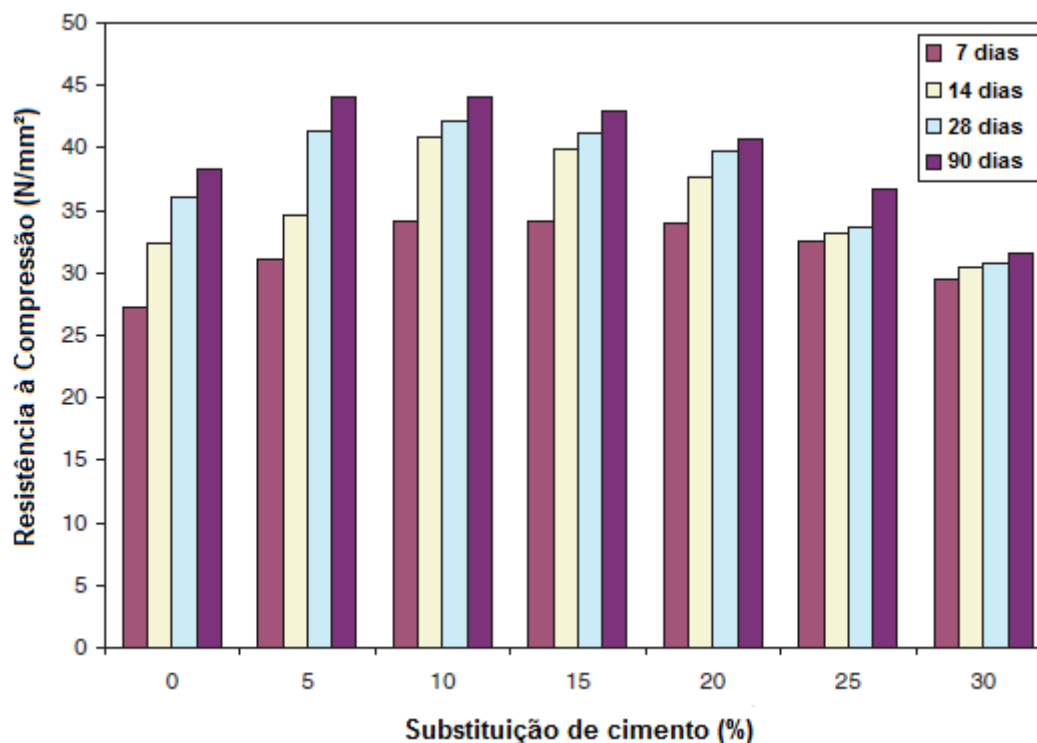
Valenciano & Freire (2004) estudaram o emprego da CBC em conjunto com solo e cimento Portland na confecção de tijolos de solo-cimento. A substituição de 20% do cimento pela ACBC aumentou a resistência à compressão simples dos tijolos nas idades de 28 e 61 dias.

Singh *et al.* (2000) realizou um estudo incorporando CBC em pastas de cimento, no ensaio de compressão, a pasta com incorporação de CBC em 10% substituindo o cimento obteve resultado 30% maior que a pasta referência (sem adição de cinza).

No trabalho realizado por Cordeiro (2006), a utilização de até 20% de CBC em substituição do cimento não alterou as propriedades mecânicas do concreto e reduziu a absorção de água por capilaridade dos mesmos. Foi verificado também um melhor abatimento de tronco de cone do concreto quando a CBC foi incorporada.

Ganesan *et al.* (2007) também estudou o emprego da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição ao cimento Portland na produção de concretos. A resistência à compressão dos concretos com teores de adição de 5%, 10%, 15% e 20% de CBC foram superiores ao concreto referência (sem adição de CBC) para todas as idades analisadas (7, 14, 28 e 90 dias) (Figura 10). Concluiu-se que a substituição de cimento pela cinza em até 20% proporcionou melhor resistência à compressão quando comparado com o concreto referência.

Figura 10 - Variação da resistência à compressão em função do teor de substituição do cimento por CBC.



(Fonte: Ganesan *et al.*, 2007)

De Paula *et al.* (2007) realizou análise de argamassas confeccionadas com cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição ao cimento Portland; foram coletados bagaço da cana-de-açúcar em uma usina de Minas Gerais e queimados em mufla para originar as cinzas. Inicialmente, o bagaço foi queimado por 6 horas com temperatura de 600°C, mas não apresentou o aspecto desejado e voltou a ser queimado por mais 3 horas à 700°C; o resfriamento foi realizado naturalmente. O teor de sílica (amorfa e cristalina) encontrado foi de 84%. As amostras de CBC apresentaram índices de atividade pozolânica. As argamassas com teores de 10% e 20% de CBC apresentaram melhores resultados de resistência à compressão aos 28 dias.

O emprego de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar como adição mineral em compósitos de matrizes cimentícias foi estudado por Zardo *et al.*, (2004). Realizou-se ensaios com cinzas sem o tratamento de moagem e com cinzas com diferentes tempos de moagem (1,5 e 3 horas), o ensaio de caracterização química apresentou teor de 77% de SiO₂ na forma cristalina. Mesmo após a moagem, as cinzas não apresentaram índice de atividade pozolânica. Os compósitos contendo cinza moída apresentaram propriedades mecânicas melhores que os compósitos com cinza não moída. A diminuição do tamanho das partículas da CBC realizados através da moagem favoreceu o preenchimento dos espaços vazios da matriz, diminuindo a porosidade e contribuindo para o melhor desempenho mecânico das mesmas.

Diversos são os estudos realizados para verificar o potencial de aplicação da cinza de bagaço da cana-de-açúcar na construção civil. Muitos autores (JOHN *et al.*, 2003; CORDEIRO, 2005; CORDEIRO, 2006; CORDEIRO *et al.*, 2009; FREITAS, 1998; SOUZA *et al.*, 2007; SINGH, 2000; GANESAN *et al.*, 2007) estudam a potencialidade de aplicação da CBC como substituta parcial do aglomerante. Poucas são as pesquisas voltadas para a aplicação da ACBC como agregado em matrizes cimentícias, embora alguns pesquisadores (SALES & LIMA, 2010; BESSA, 2012; ALMEIDA, 2013; MARTINS *et al.*, 2007) tenham obtido resultados satisfatórios com essa aplicação.

2.1.5 Utilização da ACBC como agregado em matrizes cimentícias

Conforme citado anteriormente, a maior parte das pesquisas desenvolvidas para a aplicação das cinzas residuais provenientes da queima do bagaço da cana de açúcar são voltadas para a substituição parcial do cimento, mas, essas cinzas precisam passar por tratamentos térmicos em altas temperaturas e processos de moagem para que lhes sejam atribuídas propriedades adequadas para tal aplicação. A utilização da ACBC como agregado em matrizes cimentícias é uma opção para a destinação desse resíduo. Além dos resultados satisfatórios de resistência e durabilidade obtidos nas pesquisas realizadas por Martins *et al.*, (2007), Sales & Lima (2010), Bessa (2012) e Almeida (2013), para aplicar a ACBC como agregado não é necessário submeter o material a moagens em tempos prolongados nem realizar tratamento térmicos com altas temperaturas.

Martins *et al.*, (2007) realizou estudos sobre o emprego da areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição ao agregado miúdo (areia) na confecção de argamassa. As amostras de ACBC foram coletadas nas caldeiras da Usaciga Açúcar, Álcool e Energia Elétrica S.A no Paraná. Foram realizados ensaios de compressão simples Tabela 6(Tabela 6), granulometria e massa específica. A cinza e areia apresentaram valores parecidos na análise granulométrica, dimensão máxima característica de 1,2mm para CBC e areia, módulo de finura apresentou valor de 1,29 para CBC e 1,79 para areia e materiais pulverulentos 1,6% e 1,2% para CBC e areia respectivamente.

Tabela 6 - Resistência à compressão média (MPa).

Rompimento	CP moldados com CBC	CP moldado com AREIA
Aos 3 dias	6,70	3,00
Aos 7 dias	7,00	3,20
Aos 28 dias	8,10	4,30

(Fonte: Martins *et al.*, 2007)

O aumento de resistência nas primeiras idades dos corpos de prova moldados com a areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar ocorre devido o melhor empacotamento entre as partículas (efeito filler). Pode-se visualizar na Tabela 6 que para todas as idades os corpos-de-prova moldados com CBC em substituição a areia alcançaram valores de resistência à compressão superiores (MARTINS *et al.*, 2007).

No estudo realizado por Sales e Lima (2010), foram analisadas amostras de ACBC provenientes de quatro deferentes usinas, todas as amostras apresentaram estrutura cristalina, ou seja, fato que viabiliza a aplicação do material como carga inerte (agregado). Duas amostras de ACBC apresentaram propriedades físicas muito similares ao agregado miúdo natural utilizado. A resistência à compressão das argamassas produzidas com teores de 20% e 30% de ACBC foram superiores à resistência da argamassa referência (sem ACBC).

Bessa (2012) estudou a aplicação da ACBC como agregado miúdo com teores de substituição de 30% e 50% em matrizes cimentícias. Foram utilizados três tipos de cimento, o CPV, CPIII40RS e o CPIIE32, os concretos produzidos com o cimento CPIIE32 e com os teores de 30% e 50% de ACBC apresentaram valores de resistência à compressão superiores ao concreto de referência. Os concretos com ACBC apresentaram resultados de resistência à tração similares ao concreto referência para os traços produzidos com cimento CPV, e melhores resultados para os traços com os cimentos CPIII40RS e o CPIIE32. Quanto ao módulo de elasticidade, os concretos com ACBC apresentaram resultados superiores ao concreto de referência. Em resumo, pode-se concluir que a utilização parcial da ACBC em substituição ao agregado miúdo natural melhorou as características mecânicas do concreto.

Bessa (2012) também verificou a profundidade de carbonatação natural dos concretos para as idades de 60, 120 e 210 dias. Os concretos com ACBC apresentaram maior frente de carbonatação. A acidez da ACBC pode ter contribuído com a redução da alcalinidade da matriz cimentícia desencadeando o avanço da frente de carbonatação.

No estudo realizado por Almeida (2013), a utilização de 30% e 50% de ACBC em substituição ao agregado miúdo resultou no aumento da resistência à compressão dos concretos nas idades de 28 e 168 dias. Quanto à resistência à tração, os concretos apresentaram resultados similares, ou seja, a ACBC não interferiu nesta propriedade. Os resultados de módulo de elasticidade para os concretos com ACBC foram superiores ao concreto de referência. O autor também realizou ensaios de carbonatação acelerada para argamassas com teores de 0%, 30% e 50% de ACBC nas idades de 7, 14, 28, 56 e 84 dias. Todas as amostras apresentaram uma evolução da frente de carbonatação semelhantes nas idades analisadas.

Segundo Bessa (2012) e Almeida (2013) o teor ideal de substituição de ACBC é de 30%, a utilização da ACBC em substituição ao agregado miúdo melhorou o desempenho mecânico e a durabilidade dos concretos.

Através dos resultados obtidos na literatura, foi possível concluir que a ACBC apresenta grande potencial para ser aplicada como agregado miúdo na produção de matrizes cimentícias.

2.2 RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL - RCC

Neste capítulo será apresentada uma revisão da bibliografia sobre os resíduos da construção civil e seu potencial de aplicação na indústria da construção civil.

2.2.1 Definição

Segundo a NBR 15114 (ABNT, 2004), os resíduos da construção civil são definidos como: “Resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha”.

Os resíduos da construção civil são classificados em quatro classes: A, B, C e D, sendo que:

- ✓ Classe A: resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação, obras de infraestrutura, solos provenientes de terraplenagem, edificações (tijolos, argamassa, concreto, cerâmica), etc.
- ✓ Classe B: resíduos recicláveis para outras destinações, como: plástico, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, gesso, etc.
- ✓ Classe C: resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação.
- ✓ Classe D: resíduos perigosos oriundos do processo de construção, como: tintas, solventes, óleos, e também resíduos oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

Os RCC são classificados como inertes pela NBR 10004; mas, segundo John & Agopyan (2001), alguns RCC analisados, apresentaram contaminações; tais contaminações podem vir a afetar a qualidade do produto composto pelo resíduo e também podem apresentar riscos ambientais, ou seja, nem sempre o RCC pode ser classificado como um resíduo inerte.

2.2.2 Normas e legislações

A preocupação com os resíduos da construção civil iniciou-se no ano de 2002 após a instituição da resolução CONAMA 307 (alterada pela resolução CONAMA 448/2012); tal resolução estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão sustentável dos RCC instituindo ações necessárias para minimizar os impactos ambientais causados nas cidades. De acordo com esta resolução os geradores deverão priorizar a não geração, a redução, a reutilização, a reciclagem e a destinação final dos resíduos.

Após a criação da resolução CONAMA 307, foram criadas também algumas recomendações normativas relacionadas ao processamento e aplicação dos resíduos da construção civil, são elas:

- ✓ NBR 15112 (ABNT,2004): Resíduos sólidos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação.
- ✓ NBR 15113 (ABNT, 2004): Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação.
- ✓ NBR 15114 (ABNT, 2004): Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação.
- ✓ NBR 15115 (ABNT, 2004): Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos.
- ✓ NBR 15116 (ABNT, 2004): Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos.

Um trabalho realizado por Zanutto (2011) avaliou o panorama atual de implementação das diretrizes da resolução 307 no município de São Carlos e concluiu que os agentes ligados diretamente à construção civil não possuem total conhecimento sobre tal resolução e que apesar das empresas construtoras adotarem práticas ligadas à gestão de resíduos da construção civil, tais conceitos não são aplicados como lei.

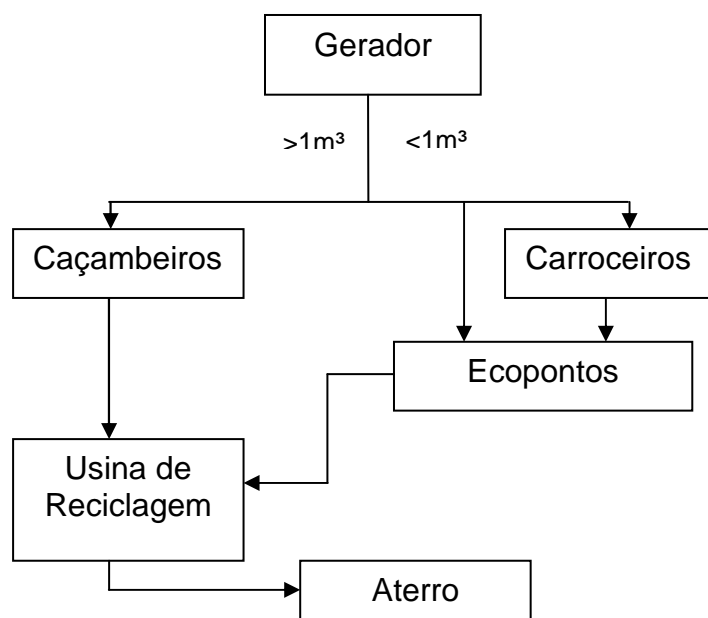
No município de São Carlos a lei 13.867 de 12 de setembro de 2006 institui o Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil e o Sistema para Gestão desses Resíduos. Dentre os diversos assuntos abordados nesta lei, cabe destaque os seguintes pontos:

- ✓ Os RCC classe A deverão prioritariamente ser transportados para a Usina de Reciclagem;

- ✓ Os RCC não poderão ser dispostos em aterros sanitários, salvo na forma de agregados reciclados ou solos descontaminados, utilizados com a finalidade de execução de serviços internos ao aterro.
- ✓ Os RCC classe A poderão ser destinados a obras de aterramento de pequeno porte devidamente licenciadas.
- ✓ Os geradores de RCC e volumosos são os responsáveis pelos resíduos originados nos imóveis de propriedade pública ou privada.
- ✓ Os transportadores e os receptores de resíduos da construção civil e resíduos volumosos são os responsáveis pelos resíduos no exercício de suas respectivas atividades.
- ✓ Os transportadores de resíduos da construção civil e resíduos volumosos deverão ser cadastrados.

O gerenciamento do RCC proposto pela lei 13.867 está representado pela Figura 11. O gerador pode contratar transportadores (carroceiros ou caçambeiros), ou encaminhar os RCC para os ecopontos, desde que o volume seja inferior a 1m³. Os carroceiros encaminham os resíduos para os ecopontos e os caçambeiros para a Usina de Reciclagem. O material que a Usina não possui capacidade para processar é encaminhado para o aterro de RCC. Infelizmente, muitos geradores e transportadores lançam seus resíduos em pontos de descarte clandestino, contribuindo com a geração de sérios problemas para o meio ambiente, para o município e para os seres humanos. Outra situação relevante refere-se a capacidade de processamento da Usina de Reciclagem de RCC, a mesma processa cerca de 140t/dia, sendo que a produção diária de RCC com potencial de reciclagem é cerca de 575t/dia, ou seja, é reciclado apenas 25% do resíduo gerado.

Figura 11- Gestão de RCC classe A segundo Lei 13.867



Com a instituição da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) em 2 de agosto de 2010, os municípios deverão apresentar um plano de gerenciamento de resíduos sólidos até o ano de 2014. Esta política visa a não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

A implementação do plano de gerenciamento de resíduos irá resultar em muitos benefícios aos municípios, uma vez que o gerenciamento adequado do RCC pode propiciar a redução de custos na limpeza urbana e recuperação de áreas degradadas, preservação de sistemas de aterros, redução dos impactos provenientes da exploração de jazidas naturais de agregados para a construção, preservação de paisagens urbanas, incentivo a parcerias para a captação, reciclagem e reutilização do RCC, geração de emprego e renda; incentivo à redução da geração nas atividades construtivas (FAGURY & GRANDE, 2007).

2.2.3 Geração de RCC

No Brasil foram coletados cerca de 33 milhões de toneladas de resíduos da construção civil no ano de 2011, este total corresponde a uma geração de cerca de 200kg/hab.ano (ABRELPE, 2011).

Cerca de 40% de toda a massa dos resíduos sólidos coletados no Brasil no ano de 2011 são resíduos da construção civil, esta quantidade corresponde a mais de 30 milhões de toneladas de RCC (ABRELPE, 2011). No Brasil, apenas 1% destes resíduos são reciclados, na Holanda este percentual chega a 90% (CASTILHO, 2009).

Na cidade de São Carlos, a taxa de geração per capita de RCC é elevada, segundo Córdoba (2010) são gerados cerca de 3kg/hab.dia. Desta forma, a cada tonelada de resíduo domiciliar são geradas 4 toneladas de resíduo da construção civil no município de São Carlos. A geração de RCC no município vem crescendo significativamente, no levantamento realizado por Marques Neto (2003), a média de geração de RCC era de 1,93kg/hab.dia, ou seja, houve um aumento na geração de cerca de 55% no período de 2003 à 2010.

A partir da década de 90, a geração dos resíduos da construção civil cresceu de maneira significativa, conseqüentemente, houve o crescimento das empresas e coletores autônomos de tais resíduos (PINTO & GONZALES, 2005).

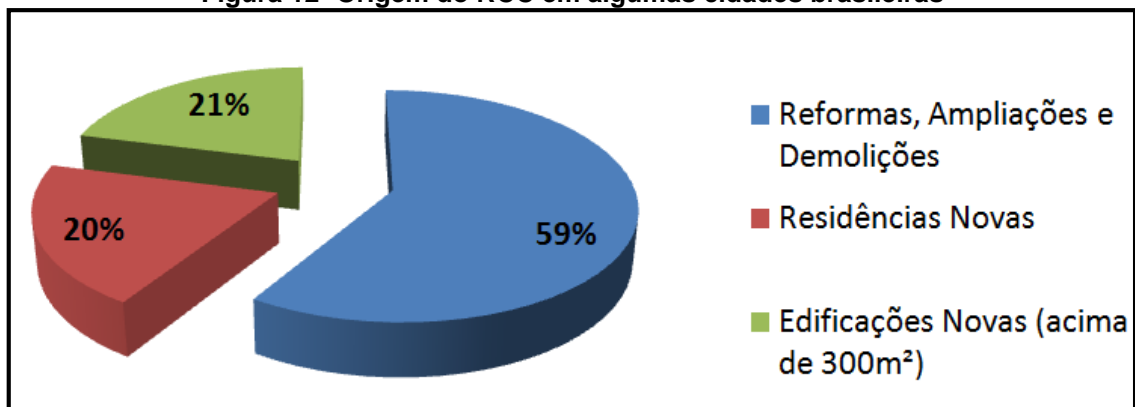
O RCC é gerado basicamente durante três fases de uma construção, são elas: fase de construção (canteiro), fase de manutenção e reformas e na demolição da edificação. São gerados os mais variados tipos de materiais que compõe o RCC, como: materiais cerâmicos, metálicos, orgânicos e solos (John, 2000).

Segundo Pinto & Gonzales (2005), para realizar um diagnóstico da geração de resíduos da construção civil é necessário considerar como maiores responsáveis os profissionais e/ou empresas ligadas à:

- ✓ Executores de reformas, ampliações e demolições - atividade que na maioria das vezes não é formalizada com a aprovação de plantas e solicitação de alvarás;
- ✓ Construtores de edificações novas, térreas ou de múltiplos pavimentos - com áreas de construção superiores a 300 m², cujas atividades quase sempre são formalizadas;
- ✓ Construtores de novas residências, tanto aquelas de maior porte, em geral formalizadas, quanto às pequenas residências de periferia, quase sempre autoconstruídas e informais.

A Figura 12 apresenta a origem dos RCC gerados em algumas cidades brasileiras que foram diagnosticadas. As atividades referentes à reformas, ampliações e demolições são responsáveis pela geração de cerca de 59% de todo o RCC gerado (PINTO & GONZALES, 2005).

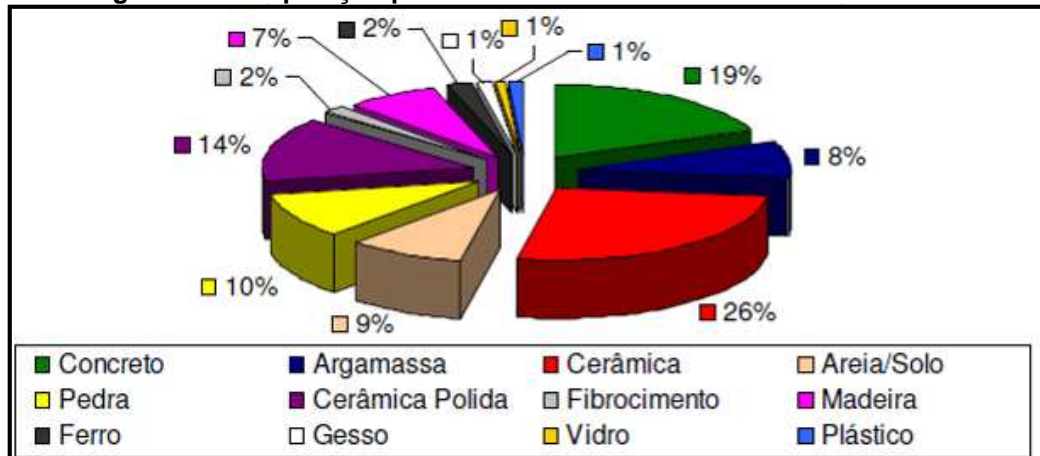
Figura 12- Origem do RCC em algumas cidades brasileiras



(Fonte: Pinto & Gonzales, 2005)

Marques Neto (2003) realizou a caracterização dos RCC coletados no aterro de resíduos inertes localizado no bairro cidade Aracy do município de São Carlos. Pode-se verificar no gráfico representado pela Figura 13 que 26% dos resíduos gerados são materiais cerâmicos, 19% concreto e 14% cerâmicas polidas.

Figura 13- Composição percentual dos RCC da cidade de São Carlos



(Fonte: Marques Neto 2003)

Diversos são os tipos de materiais utilizados em uma obra, sendo assim, pode-se afirmar que a composição dos resíduos da construção civil é bastante variável. Outro fator que pode ser destacado refere-se aos diferentes tipos de obras, por exemplo, uma obra de escavação, irá gerar com resíduo principal o solo, já uma obra de demolição residencial, irá gerar resíduos de concreto, argamassa, tijolos, blocos, etc.

Diferentes técnicas construtivas e materiais são utilizados no mundo, por exemplo, nos Estados Unidos e no Japão, a madeira é um material muito utilizado (PINTO, 1999), no Brasil, as construções são geralmente constituídas por concreto, argamassa, tijolos cerâmicos, blocos de concreto, etc. Sendo assim, a composição de resíduos da construção gerados em diferentes países é bastante variável.

2.2.4 Destinação dos resíduos da construção civil (RCC)

O grande aumento na geração de resíduos sólidos urbanos (RSU), fez com que as autoridades, pesquisadores e sociedade se preocupassem com o manejo e disposição final adequada desses resíduos (CÓRDOBA, 2010). Pode-se afirmar que grande parte dos RSU refere-se aos resíduos da construção civil (RCC), desta forma, o manejo e disposição final inadequada deste material resulta em grandes danos ao meio ambiente.

Segundo a resolução Conama nº307/2002 alterada pela resolução Conama nº 448/2012, os resíduos da construção civil classe A devem ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados ou encaminhados a aterro de resíduos classe A de reservação de material para usos futuros.

Os resíduos da construção civil (RCC) são dispostos, na maioria das vezes, em locais inadequados, como: terrenos baldios e margens de cursos d'água, causando assim,

graves problemas ambientais. A disposição incorreta dos resíduos pode acarretar também em problemas de saúde causados pela proliferação de vetores nocivos (SOUZA, 2006).

Pode-se observar na Figura 14, resíduos domiciliares (RD) e resíduos da construção civil (RCC) descartados clandestinamente na margem do Córrego Tijuco Preto no município de São Carlos/SP.

Figura 14- RD e RCC descartados na margem do Córrego Tijuco Preto-São Carlos/SP



(Fonte: Córdoba, 2010)

Diversos são os pontos de descarte clandestino de resíduos da construção civil no município de São Carlos, na Figura 15 pode-se observar um terreno baldio onde são descartados resíduos da construção civil, resíduos domiciliares e volumosos.

Figura 15- RCC, RD e volumosos descartados em terreno baldio



(Fonte: Própria autora)

O cenário de gerenciamento dos resíduos da construção civil na maioria dos municípios é preocupante, espera-se que com a instituição da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) muitas mudanças sejam realizadas com o intuito de melhorar o gerenciamento e disposição final desses materiais, uma vez que os mesmos possuem potencial para serem aplicados de diversas maneiras na indústria da construção civil.

2.2.5 Reciclagem dos Resíduos da Construção Civil (RCC)

As usinas de reciclagem começaram ser implantadas no Brasil na década de 90, nas regiões Sul e Sudeste. Empresas privadas e prefeituras municipais começaram investir recentemente em usinas de reciclagem de RCC, transformando este resíduo em materiais como agregados, para posterior aplicação (SOUZA, 2006).

Os resíduos de demolição, na maioria das vezes não são selecionados para a reciclagem, desta forma, o agregado reciclado produzido torna-se misto, contendo vários materiais em sua composição (concreto, cerâmica, solo, etc.). Em algumas usinas de reciclagem de RCC denominadas como classe A, realiza-se uma triagem visual para classificar o resíduo como cinza (resíduos à base de cimento) e vermelho (resíduos cerâmicos, solos) (ÂNGULO *et al.*, 2004).

Zordan & John (2004), propuseram uma metodologia para avaliar o potencial de reciclagem de resíduos, esta metodologia possui 3 princípios:

- ✓ Análise Científica: as características e propriedades físico-químicas dos resíduos devem ser avaliadas para que seja possível identificar suas possíveis aplicações;
- ✓ Sustentabilidade: os aspectos econômicos e de mercado devem ser considerados; e também os riscos ambientais e aos seres humanos;
- ✓ Enfoque no ciclo de vida: os estágios do ciclo de vida dos produtos reciclados devem ser considerados pela análise de sustentabilidade para que se garanta a consistência e confiabilidade dos estudos.

A reciclagem de resíduos se mostra eficiente quando atende basicamente as questões relacionadas a desempenho e custo do produto final.

Algumas das medidas propostas por Ozkan (2001) para incentivar a prática de reciclagem de RCC estão relacionadas com a formulação de sistemas que visam padronizar a qualidade para os agregados reciclados e também a institucionalização de um sistema de certificação de garantia e qualidade.

2.2.6 Usinas de Reciclagem de RCC

Para implantar uma usina de reciclagem é necessário que o município tenha implantado uma gestão de resíduos além de parcerias com construtores e caçambeiros para facilitar a triagem e transporte dos materiais até a usina. Outro aspecto a ser ressaltado refere-se ao mercado que deverá existir para absorver o material reciclado pela usina;

muitas prefeituras destinam os agregados reciclados na pavimentação e recuperação de ruas (CASTILHO, 2009).

A NBR 15114:2004 foi elaborada com a finalidade de fixar os requisitos mínimos exigidos para o projeto, implantação e operação de áreas de reciclagem para os resíduos da construção civil enquadrados na classe A (agregados de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação, obras de infraestrutura, solos provenientes de terraplenagem, edificações).

Quanto às condições de implantação, a NBR 15114 define critérios relacionados a:

- ✓ Localização;
- ✓ Isolamento e Sinalização;
- ✓ Acessos;
- ✓ Iluminação e Energia;
- ✓ Proteção das águas superficiais;
- ✓ Preparo da Área de Operação;

O projeto de instalação de uma usina de reciclagem de RCC deve conter:

- ✓ Memorial descritivo com informações sobre o local, descrição da implantação e operação, equipamentos utilizados, equipamentos de segurança, plano de operação, inspeção e manutenção;
- ✓ Projeto básico contendo confrontantes, dispositivos de drenagem superficial, acessos, edificações, locais de recebimento, triagem, armazenamento temporário de resíduos não recicláveis, processamento de resíduos e seus equipamentos, armazenamento dos produtos gerados;
- ✓ Responsabilidade e autoria do projeto com as qualificações da entidade responsável e do profissional responsável pelo projeto (vinculado ao CREA).

As condições de operação segundo a NBR 15114 englobam fatores relacionados a:

- ✓ Recebimento, triagem e processamento dos resíduos;
- ✓ Treinamento dos trabalhadores e equipamentos de segurança;
- ✓ Plano de Inspeção e Manutenção da área de reciclagem;
- ✓ Procedimentos para controle e registro da operação;

O valor de implantação de uma usina de reciclagem de RCC pode variar bastante. De acordo com o diretor comercial da empresa CRETA Tecnologias de Reciclagem, uma usina de última geração pode chegar a R\$ 3.000.000,00, enquanto para uma usina básica implantada com equipamentos usados este valor pode ser reduzido a R\$600.000 (CASTILHO, 2009).

A usina da cidade de São José do Rio Preto possui capacidade de reciclar 40 toneladas de resíduo por hora, desta forma, o município recicla cerca de 50% do resíduo gerado. Todo o resíduo reciclado é aplicado exclusivamente na manutenção pública da cidade (CASTILHO, 2009).

Segundo Jadovski (2005), o município de Belo Horizonte conta com duas usinas de reciclagem de RCC, a Usina Estoril e Pampulha, com capacidade de processar respectivamente 15t/h e 30t/h. O município recolhe diariamente de 1360 a 1800 toneladas de RCC, considerando que as usinas operem 8 horas por dia, a quantidade reciclada corresponde a 360 toneladas diárias, ou seja, menos de 30% do resíduo recolhido diariamente é reciclado.

A cidade de São Paulo recolhe cerca de 17000 t/dia de RCC e possui uma usina de reciclagem com capacidade de processar 120 t/h e uma usina privada com capacidade de 15 t/h (JADOVSKI, 2005). Considerando que as usinas operem 8 horas diárias, é reciclado aproximadamente 1080 toneladas de resíduos por dia, ou seja, apenas 7% da quantidade recolhida é reciclada.

O município de Campinas possui apenas uma usina de reciclagem privada com capacidade de processar 25 toneladas por hora de RCC. Segundo Jadovski (2005), a usina recebe cerca de 3000 toneladas por dia de RCC, ou seja, é reciclado menos que 7% do resíduo recebido pela usina, considerando operação de 8 horas diárias.

2.2.7 Tipologias de plantas e processos para o beneficiamento de RCC

Uma área de reciclagem, pode ser classificada como fixa, semi-móvel ou móvel. A classificação é realizada com base nas características de instalação (CAIRNS *et al*, 1998) .

Como o próprio nome já diz, as instalações fixas possuem localização definitiva, seu custo de instalação é mais elevado e necessita de maiores áreas para instalação e processamento. A utilização de equipamentos com maior capacidade melhora o processo de britagem, retirada de impurezas e peneiragem dos materiais, desta forma, para este tipo de instalação, os produtos obtidos podem ser mais diversificados e com melhor qualidade (CAIRNS *et al*, 1998).

As instalações semi-móveis são utilizadas em locais onde serão realizados empreendimentos de médio prazo, como por exemplo barragens hidrelétricas e pedreiras para obras de pavimentação. Neste tipo de instalação, os equipamentos são montados sobre bases de estrutura metálica e a baixa altura para facilitar a montagem e manutenção

do sistema. A vantagem desta tipologia é a facilidade, rapidez e economia de montagem (JADOVSKI, 2005).

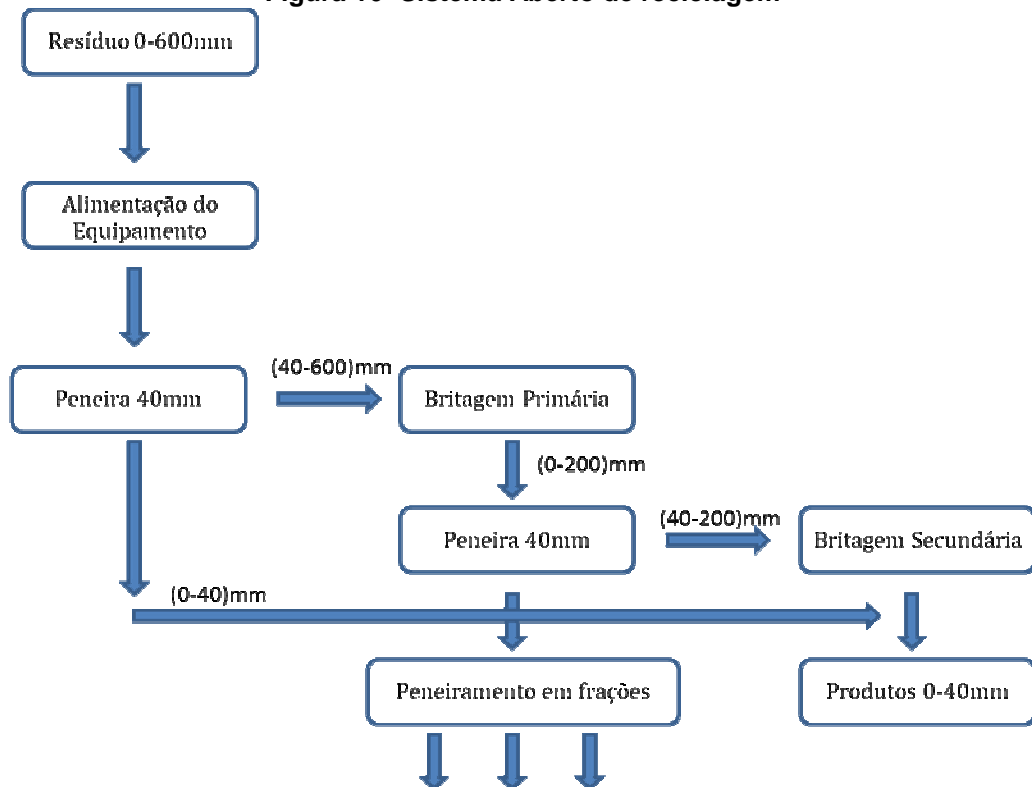
As instalações móveis possuem vantagens quanto a flexibilidade (são relocadas facilmente), o tempo de instalação e desinstalação é pequeno, são disponíveis em diferentes tamanhos e sistemas de operação. Este tipo de instalação é utilizado em empreendimentos que necessitam de constantes mobilizações, como por exemplo, em obras de manutenção de estradas. Embora a qualidade do material produzido seja inferior quando comparado com as instalações fixas, podemos ressaltar que as distâncias de transporte dos materiais são bastante reduzidas (DUARTE & LIMA, 2007).

Existem três tipos de processos para o beneficiamento de RCC, são denominados por: primeira, segunda e terceira geração. No processo de primeira geração, a remoção de contaminantes é realizada manualmente e os materiais ferrosos são identificados através de um ímã, sendo assim o processo mais simples. No caso do processo de segunda geração, os procedimentos de limpeza e triagem dos resíduos são mais sofisticados. O processo de terceira geração conta com a utilização de equipamentos mais avançados visando a eliminação da maior quantidade possível de contaminantes (JADOVSKI, 2005).

a) Primeira Geração

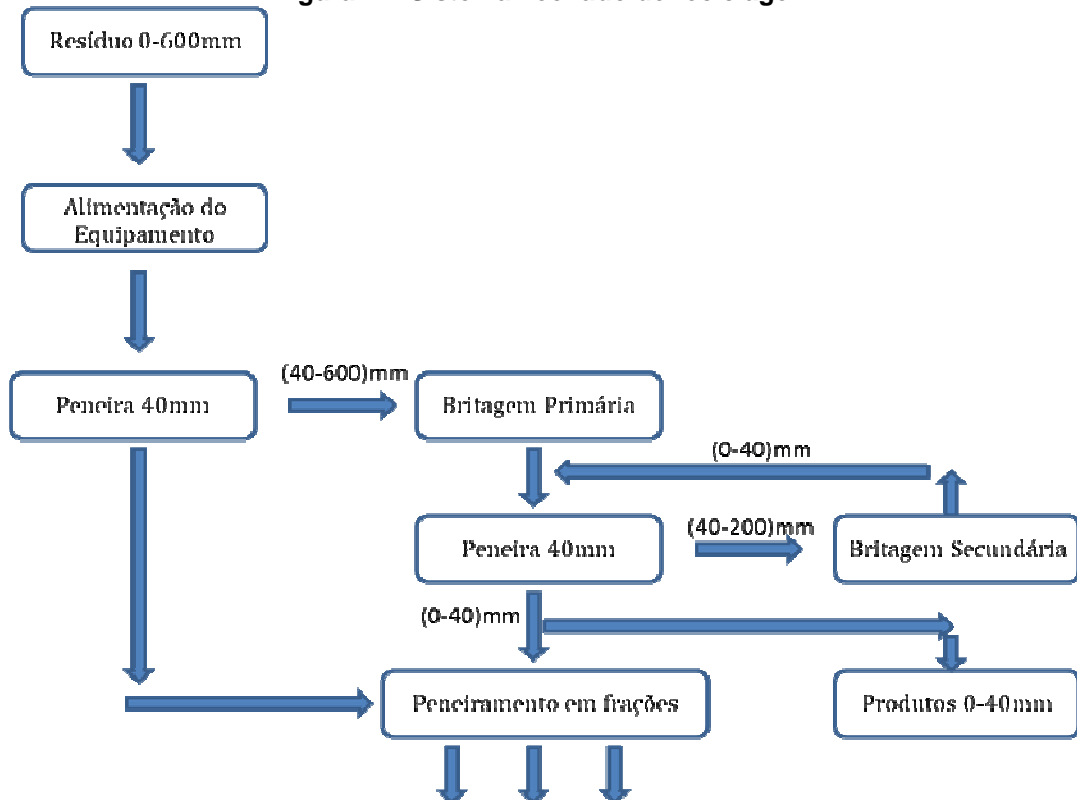
Utiliza equipamentos de britagem convencionais, podendo ser classificado como sistema aberto (Figura 16) ou fechado (Figura 17).

Figura 16- Sistema Aberto de reciclagem



(Fonte: adaptado Boesman, 1985, apud Hansen, 1992)

Figura 17- Sistema Fechado de reciclagem



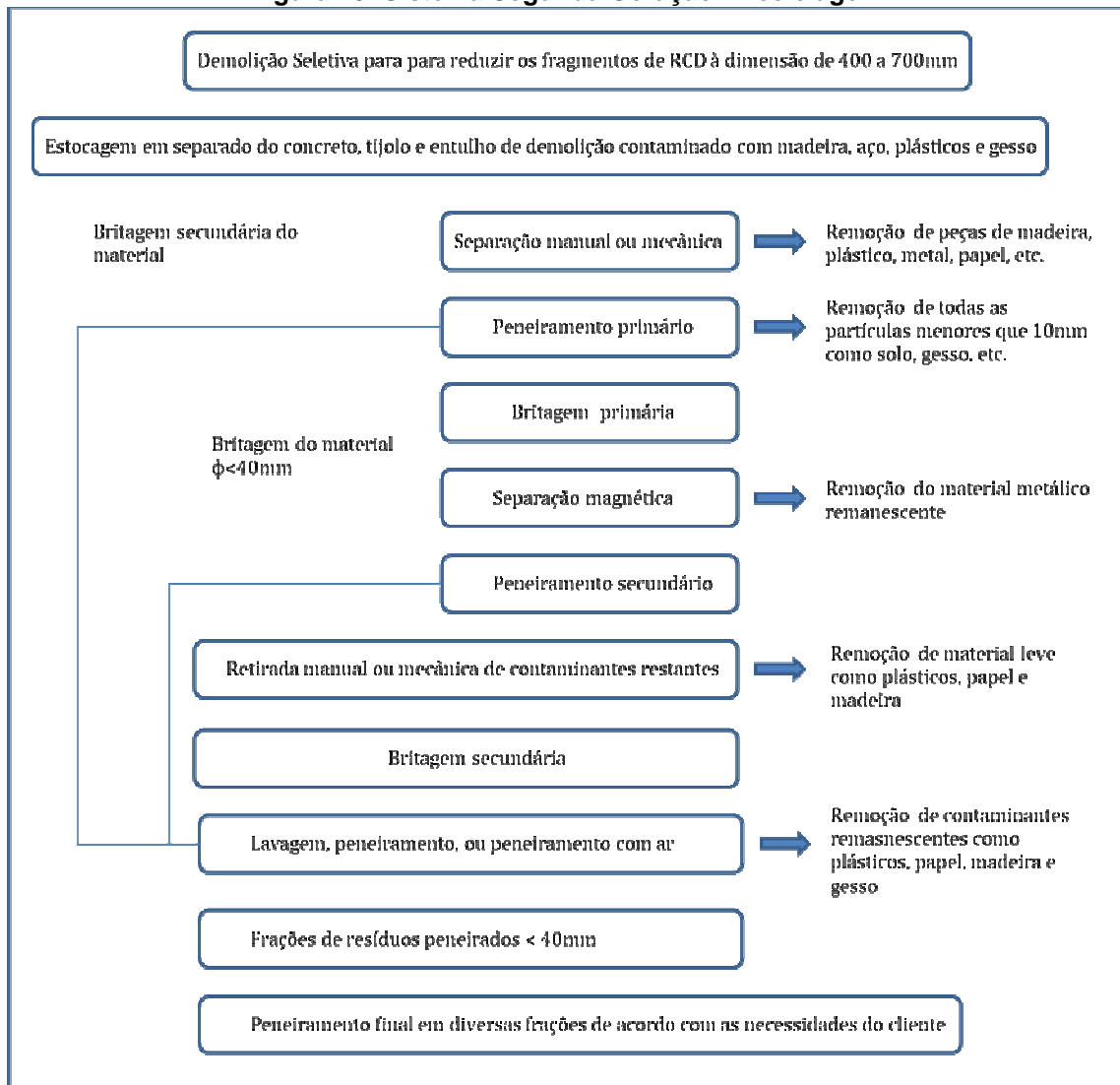
(Fonte: adaptado Boesman, 1985, apud Hansen, 1992)

No caso do sistema fechado, após o peneiramento, o material que não passa na peneira de maior malha retorna ao britador para que seja processado novamente, enquanto que no sistema aberto, o material reciclado é processado uma única vez e estocado de acordo com sua granulometria (HANSEN, 1992).

b) Segunda Geração

Neste sistema (Figura 18), os agregados são classificados após a britagem primária por via seca ou úmida, sendo que a parcela de material com granulometria inferior a 10mm é descartada com a finalidade de reduzir as impurezas. Após o descarte, é realizada a britagem secundária e novamente o peneiramento. Este procedimento elimina grande parte das impurezas orgânicas existente no RCC (HANSEN, 1992).

Figura 18- Sistema Segunda Geração - Reciclagem



(Fonte: adaptado Boesman, 1985, apud Hansen, 1992)

c) Terceira Geração

No processo de terceira geração, são realizados procedimentos via seca, úmida e/ou térmica buscando a eliminação de praticamente todos os materiais secundários (impurezas). Tais procedimentos promovem a obtenção de agregados com alta qualidade, mas a reciclagem pode se tornar economicamente inviável. Para que este tipo de processo não seja inviável, é necessário reduzir ao máximo o transporte, tanto da fonte geradora de resíduo até após a reciclagem e aplicação do material (HANSEN, 1992).

2.2.8 Equipamentos utilizados no processo de reciclagem de RCC

Uma usina de reciclagem de RCC é constituída basicamente dos seguintes equipamentos:

- ✓ alimentador vibratório: equipamento responsável por alimentar mecanicamente de maneira uniforme e contínua o britador (Figura 19).

Figura 19- Alimentador vibratório



(Fonte: TOBEMAQ, 2011)

- ✓ Britador: pode ser considerado o equipamento mais importante em uma usina, pois a maior parte das propriedades dos agregados produzidos é determinada durante a britagem do material. Existem diversos tipos de britadores no mercado: britador de mandíbulas (Figura 20), britador de martelo, britador de cone, entre outros (SBM mining and construction machinery, 2011).

Figura 20- Britador de Mandíbulas



(Fonte: SBM mining and construction machinery)

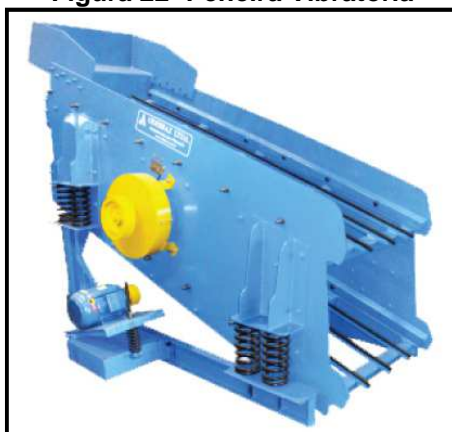
- ✓ Correias transportadoras: as correias transportam os materiais dos britadores até o local de estocagem (pilha de agregado), possuem um raio de giração regulável e são projetadas para aplicações horizontais e verticais (Figura 21) (TOBEMAQ, 2011).

Figura 21- Correias transportadoras



(Fonte: TOBEMAQ, 2011)

- ✓ Peneira vibratória: classifica os materiais de acordo com a granulometria, tal classificação ocorre através de dois processos: estratificação e separação. Através do movimento vibratório, as partículas menores do material tendem a descer, enquanto as maiores deslocam-se para cima, este processo é denominado estratificação. A separação é o processo onde as partículas se encaminham para as aberturas da peneira, se a dimensão da partícula for inferior à malha, a mesma passará, caso contrário ficará retida. Grande parte das usinas utiliza o peneiramento a seco com peneiras vibratórias inclinadas (Figura 22) (FÁBRICA DE AÇO PAULISTA, 1985).

Figura 22- Peneira Vibratória

(Fonte: ODEBRAZ, 2011)

2.2.9 Potencialidades do uso dos agregados reciclados de RCC na construção civil

Diversas são as possibilidades de aplicação dos agregados reciclados provenientes de resíduos da construção civil, como: aterros, pavimentação, produção de artefatos de cimento. Todavia, sabe-se que no Brasil, apenas 1% dos resíduos da construção civil são reutilizados e/ou reciclados, na Holanda este percentual chega a 90% (CASTILHO, 2009).

O resíduo da construção civil apresenta características e propriedades físico-químicas adequadas para sua utilização como material de construção. As principais aplicações desse resíduo são em base e sub-base de pavimentos, aterros, agregados para concretos e argamassas e matéria-prima para a fabricação de tijolos de blocos de concreto ou solo-cimento (FAGURY & GRANDE, 2007). Vale salientar que o conhecimento das propriedades físicas dos agregados reciclados é essencial para definir a resistência mecânica e durabilidade dos mesmos, e também dos concretos produzidos com tais agregados.

Touahamia *et al.*, (2002) analisaram a resistência ao cisalhamento de agregados reciclados de RCC comparando com o agregado natural (brita). A brita apresentou maior resistência ao cisalhamento que o agregado reciclado, mas, quando o agregado reciclado foi incorporado como reforço do solo, a resistência de ruptura em alguns casos foram 50% maiores que o solo sem reforço.

Santos (2007) estudou o potencial de utilização do RCC como material de aterro em estruturas de solo reforçado e concluiu que o RCC apresentou bons resultados, com baixos coeficientes de variação, comportamento mecânico e resistência adequada.

Fonseca (2002) realizou um estudo sobre o emprego de agregados reciclados de RCC em blocos de concreto. Os blocos compostos por resíduos apresentaram resistência à

compressão 21,4% maior que os blocos referência (sem adição de agregados reciclados) dos 7 aos 28 dias.

No presente trabalho, os resíduos da construção civil foram aplicados em substituição ao agregado graúdo em concretos, vários pesquisadores investigaram o comportamento dos RCC na produção de matrizes cimentícias (SAGOE-CRENTSIL *et al.*, 2001; LEITE, 2001; FONSECA, 2002; CHEN *et al.*, 2003;; VIEIRA *et al.*, 2003; BUTTLER & MACHADO, 2003; TORRES *et al.*, 2003; GALVÃO *et al.*, 2003; ALTHEMAN *et al.*, 2003; JIANZHUANG XIAO *et al.*, 2005; CABRAL, 2007; ETXEBERRIA *et al.*, 2007; KHALDOUN, 2007; GOMES & BRITO, 2009; CARNEIRO *et al.*, 2011; QIONG *et al.*, 2011).

2.2.10 Utilização do RCC como agregado em matrizes cimentícias

O agregado reciclado de RCC apresenta características que alteram as propriedades do concreto no estado fresco e no estado endurecido.

No estado fresco do concreto, a absorção de água, forma e textura do agregado reciclado são as principais características que afetam a trabalhabilidade.

Segundo a ASTM C-125 a trabalhabilidade é a propriedade que determina o esforço exigido para manipular uma quantidade de concreto fresco, com perda mínima de homogeneidade. A trabalhabilidade é medida pela consistência, o ensaio mais utilizado para medir essa propriedade é o ensaio de abatimento de tronco de cone (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

O agregado de RCC apresenta maior absorção de água devido a sua porosidade, no caso do agregado reciclado de resíduo cinza, a textura é mais áspera e os grãos angulares dificultando o deslizamento das partículas e resultando na perda de abatimento.

Quanto maior o teor de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado, maior a perda de trabalhabilidade e maior a quantidade de água necessária para corrigir a trabalhabilidade (LEITE, 2001).

Nas pesquisas realizadas por Leite (2001), Cabral (2007) e Buttler & Machado (2003), os concretos produzidos com agregados reciclados de RCC para um mesmo fator água cimento apresentaram menor abatimento.

Uma maneira de melhorar o abatimento do concreto fresco com agregado reciclado consiste em realizar a pré-molhagem do agregado. Leite (2001) verificou que concretos produzidos com agregados reciclados pré-molhados obtiveram maior abatimento que os concretos produzidos com o agregado seco. A autora afirma que a água absorvida pelo

agregado na pré-molhagem pode estar disponível na mistura após certo tempo contribuindo com a trabalhabilidade do concreto fresco.

Conforme citado no início deste capítulo, as características dos agregados reciclados interferem também nas propriedades do concreto no estado endurecido.

Chen *et al.* (2003) estudaram o comportamento de concretos produzidos com agregados reciclados de RCC mistos nos teores de 0%, 17%, 33%, 50% e 67%. O fator água cimento também variou de 0,38; 0,46; 0,50; 0,67 e 0,80. Os concretos produzidos com os agregados reciclados e fator água cimento de 0,38, atingiram apenas 60% da resistência à compressão do concreto referência. Para os traços dosados com fator água cimento superiores a 0,60, a resistência à compressão dos concretos com RCC conseguiram atingir 75% da resistência do concreto referência. O módulo de elasticidade para os concretos com RCC apresentaram uma redução de cerca de 30% quando comparados com o concreto referência.

Sagoe-Crentsil *et al.*,(2001) produziram concretos utilizando 100% de agregado graúdo reciclado proveniente de resíduo de concreto. Os concretos produzidos com o agregado reciclado apresentaram valores de resistência à compressão similares ao concreto referência, mas foi verificada uma redução significativa na resistência à tração. O desempenho dos concretos com agregado reciclado quanto à profundidade de carbonatação foi similar ao concreto referência.

Gomes & Brito (2009), utilizaram teores de 0%, 6,25%, 12,5%, 25%, 50% e 100% de agregado reciclado provenientes de concreto, argamassa e cerâmica em substituição ao agregado graúdo na produção de concretos. O agregado de concreto utilizado foi obtido em laboratório a partir da britagem de corpos de prova com resistência entre 30 e 37 MPa. A resistência à compressão dos concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de concreto foi similar ao concreto referência. O mesmo desempenho foi observado para os concretos produzidos com agregado reciclado de argamassa e cerâmica. A profundidade de carbonatação nos concretos com agregado reciclado foi superior ao concreto referência. Os autores afirmam que agregados reciclados podem ser utilizados na produção de concreto estrutural quando substituídos parcialmente.

Vieira *et al.* (2003) produziram concretos utilizando RCC em substituição ao agregado graúdo e agregado miúdo nas proporções de 0%, 50% e 100%. Foram realizados ensaios de durabilidade, quanto ao potencial de corrosão, os concretos com 100% de agregado miúdo reciclado e 0% de agregado graúdo reciclado apresentaram os melhores desempenhos. Os valores de resistência à compressão ficaram acima do concreto

referência para teores de substituição de 50% para os agregados graúdos e miúdos reciclados.

Agregados reciclados obtidos a partir da britagem de corpos-de-prova de concreto com diferentes idades de reciclagem foram utilizados por Buttler & Machado (2003) na produção de concreto. Os resultados de resistência à compressão e tração não foram afetados pela substituição parcial do agregado graúdo natural pelo agregado graúdo reciclado, sendo que foram utilizados teores de substituição na faixa de 50%.

Torres *et al.* (2003), produziram argamassas com diferentes teores de RCC em substituição ao agregado miúdo. Os teores utilizados foram: 0%, 30%, 50%, 70% e 100% de RCC em substituição à areia natural, no ensaio de resistência à compressão, o concreto com teor de 100% de resíduo apresentou o maior valor de resistência à compressão. Quanto ao ensaio de absorção de água, os valores foram maiores para os traços que possuem maior teor de resíduo.

Galvão *et al.* (2003) analisaram as propriedades mecânicas de concretos produzidos com diferentes teores de agregado reciclado de RCC em substituição ao agregado graúdo. Foram utilizados teores de 0%, 30%, 50% e 70% de agregado reciclado em substituição ao agregado graúdo, os concretos produzidos com agregados reciclados apresentaram valores de resistência à compressão 18% menores quando comparado com o traço referência (0% de agregado reciclado). O autor afirma que concretos produzidos com agregados reciclados podem ser utilizados para aplicações em contrapisos, calçadas, lajes de regularização para instalações provisórias, regularização de pisos sem função impermeabilizante, reforços não armados em edificações, execução de peças não armadas em muros de vedação.

Foi analisada a resistência à compressão em concretos produzidos com substituição total do agregado graúdo natural por agregados reciclados de RCC e comparados com concretos convencionais (agregados naturais). O consumo de cimento variou de 180kg/m³ a 366kg/m³, teor de argamassa de 50% e abatimento de tronco de cone em 80±10mm. Os concretos com agregados reciclados apresentaram um ganho de resistência com o avanço da idade (dos 28 aos 60 dias) de 12% e 27% para os traços com consumo de cimento respectivamente de 180 Kg/m³ e 366 kg/m³ (ALTHEMAN *et al.*, 2003).

Carneiro *et al.* (2011), estudaram a influência dos agregados de RCC na resistência à compressão e tração de concretos com fibras de aço. Foram produzidos concretos com teores de substituição de 25% do agregado natural miúdo e/ou graúdo em substituição ao agregado natural. Concluiu-se que a substituição de 25% de agregados naturais por agregados reciclados não influenciou de maneira significativa na resistência mecânica dos concretos.

Pereira *et al.* (2012) realizaram um estudo sobre a durabilidade de concretos produzidos com teores de 20%, 50% e 100% de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado de RCC e para três diferentes níveis de resistência à compressão (20MPa, 30MPa e 40MPa). Todos os concretos com agregados reciclados para os níveis de resistência de 20MPa e 30MPa apresentaram profundidade de carbonatação inferiores ao concreto referência. O módulo de elasticidade dos concretos com agregados reciclados foram inferiores ao concreto convencional.

Diversos autores (Etxeberria *et al.*, 2007; Jianzhuang Xiao *et al.*, 2005; Leite 2001) não recomendam a substituição integral do agregado gráudo pelo agregado reciclado de RCC; uma vez que, este material apresenta grande variabilidade e porosidade. Sendo assim, concretos produzidos com 100% de agregado reciclado apresentam maior porosidade, menor trabalhabilidade, menor resistência e menor durabilidade quando comparados com os concretos produzidos com agregados naturais. Segundo Etxeberria *et al.* (2007), para o concreto produzido com 100% de agregado reciclado de RCC atingir a mesma resistência à compressão do concreto convencional, é necessário aumentar o consumo de cimento de 20% a 30%, encarecendo consideravelmente o material.

A utilização do RCC enfrenta alguns desafios para expandir-se no mercado, sendo que o principal refere-se às dificuldades encontradas na triagem deste resíduo quando se diz respeito em atender as especificações técnicas referentes aos agregados reciclados e métodos que viabilizem a caracterização adequada dos mesmos (ÂNGULO *et al.*, 2004).

Em síntese, muitas pesquisas indicam que é possível produzir concretos com agregados reciclados de RCC que apresentem comportamento similar ao concreto convencional. Vale salientar que é importante adotar procedimentos como a pré-molhagem dos agregados para melhorar a trabalhabilidade do concreto fresco, e procedimentos que busquem reduzir a variabilidade desses materiais visando aplicações compatíveis com as exigências de desempenho na construção civil. Os agregados gráudos reciclados de RCC provenientes de resíduo cinza (argamassa, concreto) são mais indicados para a aplicação em concretos devido a menor porosidade e absorção de água quando comparados com os RCC provenientes do resíduo vermelho (cerâmica, solo).

3 AGREGADOS PARA CONCRETOS

Neste trabalho, foram utilizados dois tipos de resíduos como substitutos de agregados naturais em concretos, sendo assim, foi necessário conhecer as características, bem como a importância dos agregados na produção de concreto. Este capítulo irá tratar aspectos relacionados à classificação, disponibilidade e características dos agregados.

Segundo a NBR 9935 (ABNT,2011), o agregado é definido como: “material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassas e concretos”. Neste contexto a norma define o agregado graúdo como: “agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75mm” e o agregado miúdo como: “agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 μ m”

3.1 Agregados naturais e artificiais

Segundo Mehta & Monteiro (2008), os agregados são classificados em:

- ✓ Agregados minerais naturais: são os agregados provenientes de jazidas naturais (areia, pedregulho, pedra britada)
- ✓ Agregados artificiais: são os materiais termicamente processados (argila expandida), materiais provenientes de resíduos industriais (escória de alto-forno, cinzas volantes) e também os agregados produzidos a partir dos resíduos da construção civil.

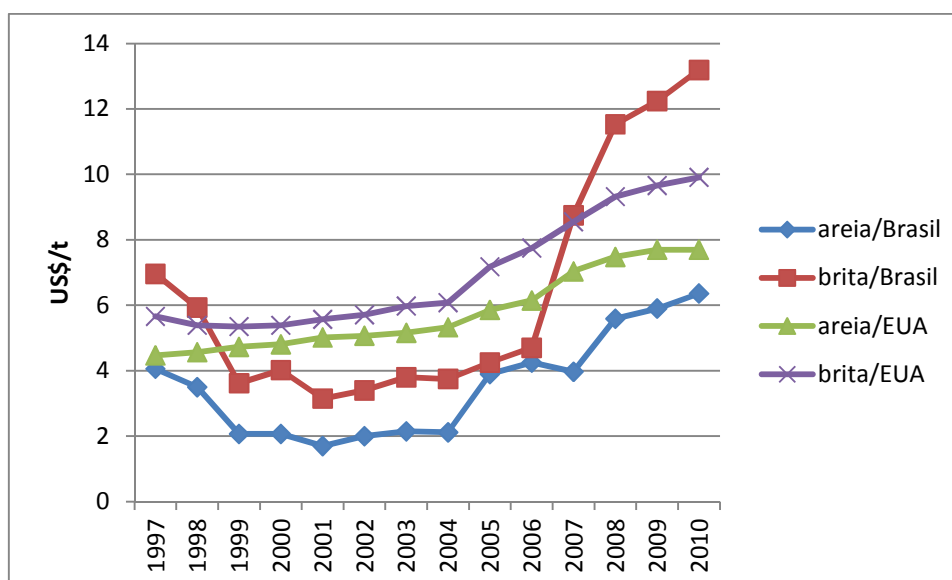
Diversos são os tipos de agregados existentes, mas, cerca de 90% dos agregados utilizados para a produção de concretos são de origem natural (MEHTA & MONTEIRO 2008).

A disponibilidade de areia e brita vem decaindo dia a dia, fato ocasionado pelo planejamento inadequado, problemas ambientais, zoneamentos restritivos e competitivo uso do solo. Outro fator que limita a extração desses recursos naturais refere-se às restrições existentes para a obtenção de licenças ambientais (VALVERDE, 2001).

A produção de areia e pedra britada é caracterizada pela extração em grande escala e pelo baixo valor unitário. O gargalo deste produto encontra-se no transporte, que corresponde cerca de 65% do custo final, desta forma, é necessário que sua produção ocorra mais próximo possível do mercado consumidor. Em regiões metropolitanas, como as de São Paulo e Rio de Janeiro, quase toda a areia consumida pela construção civil está sujeita a transporte por distâncias de até 100 km (SILVA FILHO *et al.*, 2002).

A atenuação das áreas de mineração próximas aos aglomerados urbanos é um dos fatores que contribuem com o aumento do custo dos agregados, uma vez que dependendo da distância, o custo do transporte pode ultrapassar o custo de processamento do material (LUZ & ALMEIDA, 2012). Pode-se verificar na Figura 23 o aumento do custo da areia e brita no Brasil e Estados Unidos desde o ano de 1997 até 2010.

Figura 23- Evolução no custo de areia e brita no Brasil e EUA



(Fonte: adaptado Luz & Almeida, 2012)

A atividade de mineração é uma prática insustentável, uma vez que os locais explorados não serão restaurados, ou seja, o material retirado de uma jazida nunca será recomposto (LUZ & ALMEIDA, 2012).

Cerca de 50% dos recursos naturais extraídos são consumidos pela indústria da construção civil. O consumo das matérias-primas não renováveis deve ser reduzido para contribuir com o desenvolvimento sustentável. A reciclagem gera novos produtos a partir dos resíduos, formando assim um ciclo produtivo fechado. Desta forma, novas tecnologias devem ser desenvolvidas para a realização de um processo de reciclagem eficiente e

seguro que garanta ao produto final, o desempenho técnico adequado e custo competitivo para o mercado (ROCHA & JOHN, 2003).

O segmento da construção civil que abrange a área de materiais e componentes apresentou maior desenvolvimento dentre os outros segmentos, quando se diz respeito à aplicação de conceitos relacionados à sustentabilidade. Muitos estudos sobre a incorporação de resíduos nos materiais de construção estão sendo desenvolvidos (LIMA *et al.*, 2011).

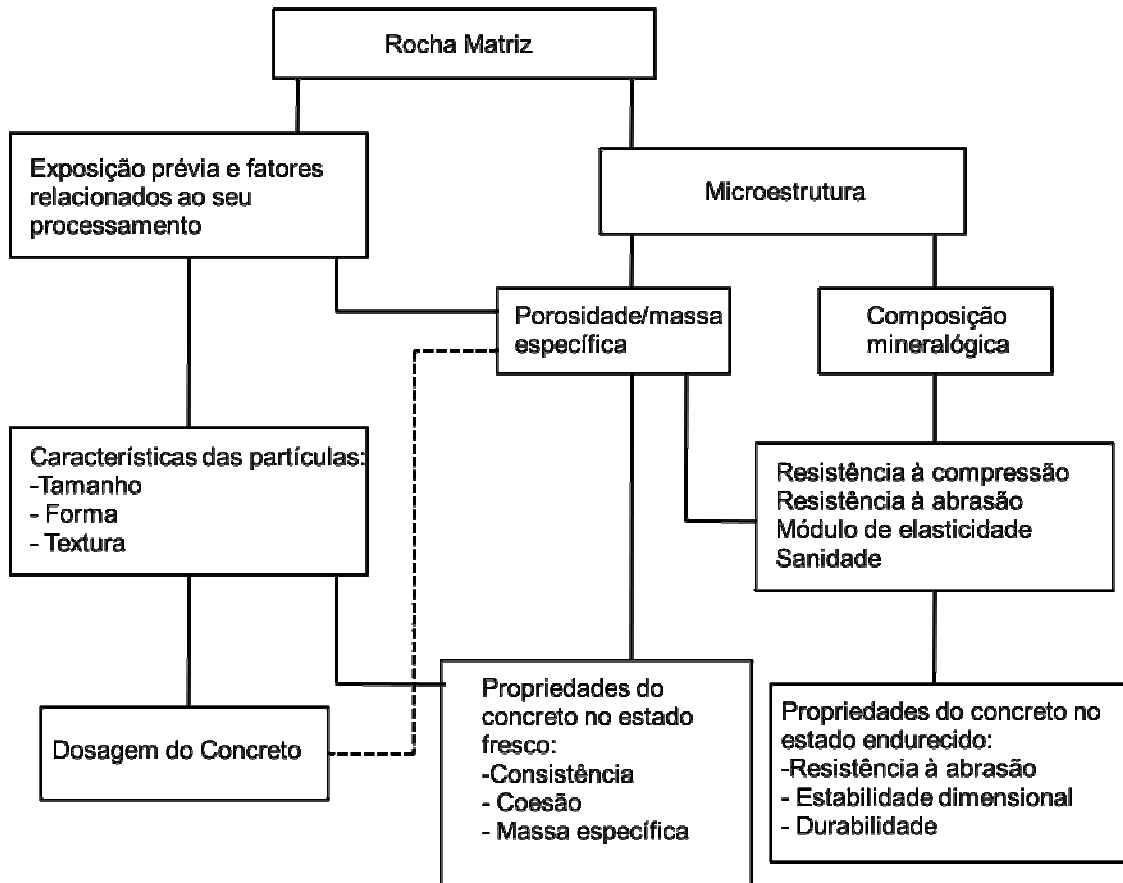
3.2 Características dos agregados

O agregado, apesar de ser considerado como material inerte e de enchimento, interfere diretamente nas propriedades do concreto, tanto no estado fresco, como no estado endurecido (MEHTA & MONTEIRO 2008).

As principais características dos agregados são: massa específica, composição granulométrica, absorção de água, forma e textura superficial, resistência à compressão, módulo de elasticidade e substâncias deletérias (torrões de argila, materiais friáveis, materiais pulverulentos, óxidos, sulfetos, matéria orgânica, etc.) (MEHTA & MONTEIRO 2008). O conhecimento dessas características é importante para a produção de concretos de qualidade adequada.

A microestrutura da rocha matriz, as condições de exposição e o processo de fabricação são fatores que determinam as características dos agregados, desta forma, tais características interferem na dosagem, propriedades do concreto fresco e propriedades do concreto endurecido (Figura 24) (MEHTA & MONTEIRO 2008).

Figura 24- Características dos agregados que interferem na dosagem e propriedades do concreto no estado fresco e endurecido



(Fonte: Mehta & Monteiro, 2008)

Os agregados ocupam de 60 a 80% do volume do concreto, sendo assim, suas características possuem grande influência sobre a trabalhabilidade, resistência, estabilidade dimensional, durabilidade e custo do concreto (MEHTA & MONTEIRO 2008).

As propriedades físicas e químicas dos agregados devem ser determinadas para que se faça a escolha adequada desses materiais quanto à aplicação desejada. A vida útil da edificação pode ser comprometida quando os agregados não são selecionados de maneira correta (VALVERDE 2001).

3.3 Características da ACBC e do RCC

Neste item será apresentada uma abordagem sobre algumas das principais características da ACBC e do RCC que podem interferir nas propriedades do concreto.

3.3.1 Massa específica e massa unitária

A determinação da massa específica e massa unitária são importantes para realizar a dosagem dos concretos. Algumas propriedades do concreto como, a consistência, a coesão, a massa específica, a resistência à compressão e resistência à abrasão são influenciadas pela massa específica do agregado (Figura 24).

Na pesquisa realizada por Nunes *et al.* (2010), as cinzas provenientes de três diferentes usinas apresentaram valor de massa específica de 2,61g/cm³.

Bessa (2012) realizou um estudo com utilização de ACBC provenientes de quatro diferentes usinas para substituição parcial do agregado miúdo em concretos e argamassas, os valores de massa específica das cinzas foram 2,65g/cm³, 2,58g/cm³, 2,23g/cm³ e 2,63g/cm³ e os valores de massa unitária foram 1,39g/cm³, 1,30g/cm³, 0,98g/cm³, 1,43 g/cm³.

Almeida (2013), também utilizou a ACBC como substituta parcial do agregado miúdo na produção de concretos e argamassas, a ACBC utilizada apresentou massa específica de 2,57g/cm³ e massa unitária de 1,69g/cm³.

No estudo realizado por Cordeiro *et al.* (2009), a CBC foi utilizada como pozolana em materiais cimentícios e a massa específica da CBC foi de 2,57g/cm³.

Os agregados reciclados de RCC apresentam valores de massa unitária e massa específica inferiores aos agregados naturais.

Na pesquisa realizada por Jianzhuang Xiao *et al.* (2005), o agregado reciclado de RCC apresentou massa específica e massa unitária cerca de 11% menores que o agregado natural. Os valores de massa específica foram de 2,52g/cm³ e 2,82g/cm³ e massa unitária de 1290Kg/m³ e 1453Kg/m³ para o agregado reciclado e agregado natural, respectivamente.

O valor da massa específica do agregado reciclado de RCC utilizado por Etxeberria *et al.* (2007) foi de 2,43g/cm³, valor 9% menor que o agregado natural utilizado (2,67g/cm³).

Qiong *et al.* (2011) utilizou agregados reciclados de RCC em sua pesquisa, o agregado reciclado apresentou valor de massa específica e massa unitária cerca de 13% e 4%, respectivamente, inferiores ao agregado natural. Os valores de massa específica foram

de 2,42g/cm³ e 2,79g/cm³ e massa unitária de 1195Kg/m³ e 1250Kg/m³ para o agregado reciclado e agregado natural, respectivamente.

O agregado reciclado utilizado na pesquisa de Khaldoun (2007) apresentou massa específica de 2,39g/cm³ e o agregado natural de 2,86g/cm³, a massa específica do agregado reciclado foi 16% menor que o agregado natural.

No trabalho realizado por Leite (2001), a diferença entre a massa específica do agregado reciclado e agregado natural foi ainda maior, cerca de 19%. Os valores de massa específica foram de 2,39g/cm³ e 2,86g/cm³ para o agregado reciclado e agregado natural, respectivamente.

Os resultados de massa específica e massa unitária encontrados na bibliografia são bastante variáveis, fato que pode ser explicado devido à variabilidade na composição e distribuição granulométrica dos agregados reciclados. No caso da ACBC, as propriedades são influenciadas pela temperatura de queima do bagaço na usina; pelo tipo de solo da lavoura de cana, uma vez que durante a etapa de lavagem da cana a areia proveniente da lavoura não é totalmente retirada e também pelos tratamentos realizados em laboratório pelos pesquisadores (moagem, desaglomeração, queima, etc.).

3.3.2 Absorção de água

Outra propriedade muito importante do agregado é a absorção de água. Concretos confeccionados com agregados que absorvem muita água tendem ser menos resistentes e menos duráveis devido o aumento da porosidade na matriz cimentícia.

As amostras de ACBC utilizadas por Bessa (2012), provenientes de quatro diferentes usinas apresentaram absorção de água de 1,53%, 2,02%, 1,57% e 1,01% e a areia natural apresentou absorção de 0,88%. Na pesquisa realizada por Almeida (2013), a ACBC apresentou absorção de água de 0,90% e a areia natural de 0,54%.

Na pesquisa realizada por Jianzhuang Xiao *et al.* (2005), o agregado graúdo reciclado de RCC apresentou absorção de 9,25% e o agregado natural de 0,4%, ou seja, a absorção do agregado reciclado utilizado foi 23 vezes superior à absorção do agregado natural.

A absorção do agregado reciclado de RCC utilizado por Etxeberria *et al.* (2007) foi de 4,45% e do agregado natural 0,89%.

Qiong *et al.* (2011) utilizou agregados reciclados de RCC em sua pesquisa, a absorção do agregado reciclado foi 5,26% e o agregado natural 0,4%.

O agregado reciclado utilizado na pesquisa de Khaldoun (2007) apresentou absorção de 3,47% e o agregado natural de 0,68%.

No trabalho realizado por Leite (2001), a absorção de água do agregado reciclado foi 16 vezes superior ao agregado natural utilizado, sendo 4,95% e 0,3% para o agregado reciclado e agregado natural respectivamente.

Silva & Arnosti (2005), realizaram ensaios para verificar a absorção de água do agregado de RCC reciclado na cidade de Piracicaba-SP. O agregado de RCC reciclado apresentou um valor de absorção de 6,12%, enquanto para o agregado natural, a faixa de absorção variou entre 0,2% e 0,4%. A absorção de água nos agregados reciclados varia de acordo com a composição dos mesmos, quanto maior a quantidade de material cerâmico, maior será a absorção.

O agregado reciclado pode ser composto por diversos materiais, como argamassa, concreto, cerâmica, e solo, tais materiais apresentam maior porosidade que a rocha natural (matéria prima do agregado natural), portanto quanto maior a porosidade, maior a absorção de água. No caso do agregado natural, os valores de absorção de água obtidos na literatura variaram de 0,3% a 0,89%, já para o agregado reciclado, a variação de absorção é maior, sendo que o mínimo valor apresentado foi 3,47% e o máximo de 9,25%. Essa diferença de absorção de água entre agregados reciclados de RCC ocorre devido à alta variabilidade da composição destes materiais.

Através dos dados obtidos na literatura, é possível afirmar que a absorção de água do RCC é muito superior à absorção do agregado natural e que as amostras de ACBC apresentaram valores de absorção bem próximos ao agregado natural. Desta forma, infere-se que o agregado reciclado de RCC poderá influenciar mais nos valores de absorção de água e porosidade de matrizes cimentícias quando comparado com a ACBC.

3.3.3 Composição granulométrica

A composição granulométrica do agregado tem grande influência sobre as propriedades do concreto.

A trabalhabilidade é diretamente influenciada pela composição granulométrica do agregado. Agregados miúdos muito grossos geram concretos pouco trabalháveis, e agregados miúdos muito finos aumentam o consumo de água da mistura de concreto (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Outro aspecto importante refere-se à dimensão máxima do agregado. Sob o ponto de vista econômico, é interessante utilizar agregados com grandes dimensões, pois a área

superficial por unidade de volume que deve ser coberta pela pasta de cimento é reduzida, e, quanto menor o consumo de cimento, menor o custo do concreto. Por outro lado, a resistência do concreto pode ser prejudicada devido às microfissuras que ocorrem na zona de transição na interface entre o agregado graúdo e a pasta de cimento (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

A utilização de agregados com diferentes distribuições granulométricas pode contribuir com a redução do teor de vazios do concreto através do melhor empacotamento das partículas.

Na pesquisa realizada por Nunes et. a. (2010), quatro amostras de ACBC provenientes de diferentes usinas apresentaram mais de 50% das partículas com diâmetro entre 0,2 e 0,6mm.

Bessa (2012) também utilizou amostras de ACBC provenientes de diferentes usinas, sendo que três das amostras apresentaram mais de 70% das partículas com diâmetro entre 0,3 e 0,15mm.

Os agregados reciclados de RCC provenientes de usinas de reciclagem apresentam distribuições granulométricas muito variadas e em função disso, alguns pesquisadores (LEITE 2001; CABRAL, 2007; SOUZA, 2006) optaram por realizar a britagem do material em laboratório antes da produção dos concretos.

A análise da distribuição granulométrica dos resíduos deve ser realizada para que seja possível confeccionar concretos de boa qualidade, principalmente quando o material apresenta grande variação na distribuição das partículas, como é o caso do RCC.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados como premissas os resultados obtidos nas pesquisas desenvolvidas pela autora durante a graduação, bem como os trabalhos de Sales & Lima (2010), Lima *et al.* (2011), Bessa (2012) e Almeida (2013).

Nesta pesquisa, as cinzas residuais da queima do bagaço da cana-de-açúcar foram utilizadas como material inerte para substituir parcialmente a areia natural, e portanto foram nomeadas como areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC). Este termo foi utilizado para diferenciar a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) utilizada como material pozolânico.

O teor ideal de substituição da areia natural pela areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC) foi identificado com base nos trabalhos citados anteriormente. Os concretos produzidos com teor de 30% de ACBC em substituição ao agregado miúdo apresentaram valores satisfatórios de propriedades físicas, mecânicas e durabilidade.

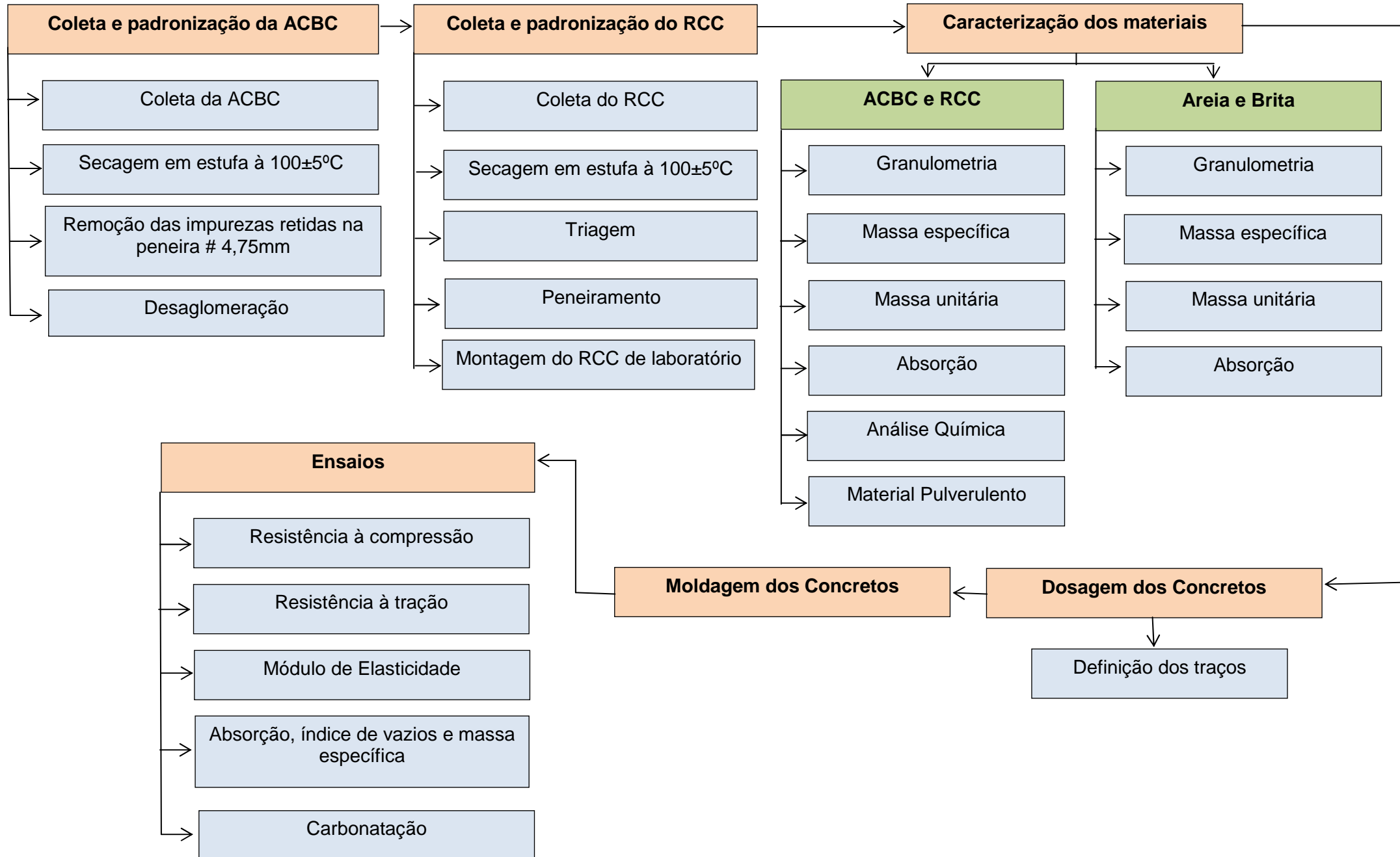
Alguns pesquisadores recomendam que o teor de substituição do agregado graúdo pelo agregado reciclado de RCC varie entre 20 e 50% (LIMBACHIYA *et al.* 2000, LEVY 2001). Neste trabalho, o teor de substituição da brita pelo agregado reciclado de RCC foi de 30% e 50% e, além disso, foram moldados corpos de prova com substituição total da brita pelo RCC com a finalidade de verificar o decréscimo de resistência evidenciado por diversos autores.

O projeto experimental foi dividido em cinco partes principais:

- a) Descrição da Usina de Reciclagem de RCC
- b) Coleta e preparo da ACBC e RCC;
- c) Caracterização dos materiais utilizados;
- d) Estudo da dosagem dos concretos;
- e) Produção dos corpos de prova para análise das propriedades físicas, mecânicas e profundidade de carbonatação.

O programa experimental pode ser verificado no organograma representado pela Figura 25.

Figura 25 – Programa experimental



4.1 Materiais

Para o desenvolvimento desta pesquisa, foram utilizados os seguintes materiais: cimento Portland CP II E 32, areia natural, pedra britada, areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC) e o agregado reciclado de RCC proveniente de resíduo cinza (concreto e argamassa).

4.1.1 Cimento Portland

O CP II E 32 (cimento Portland composto com escória) é um tipo de cimento composto por escórias granulares de alto forno o qual possui menor velocidade de hidratação em relação ao clínquer, fator que resulta em menor desenvolvimento inicial de resistência mesmo que aplicados em mesmas condições dos outros tipos de cimento. As propriedades físicas e químicas do cimento estão descritas na Tabela 7 fornecidas pelo fabricante. Foi realizado apenas o ensaio de massa específica em laboratório cujo resultado encontra-se na Tabela 7.

Tabela 7 - Propriedades físicas – CP II E 32

Propriedades	Unidade	Cimento	Elementos (%)	Cimento	
Massa específica (NM 23) ¹	Kg/dm ³	3,05	MgO	1,57	
Início de pega (NBR 6474)	min	192	PF 1000°C	5,70	
Finura	Retido # 325	%	Anidrido carbônico - CO ₂	4,78	
	Sup. Esp. Blaine	m ² /Kg			3491
Resistência à compressão (f _{cj})	3 dias	MPa	Trióxido de enxofre - SO ₃	1,54	
	7 dias	MPa			26,00
	28 dias	MPa			35,90

(Fonte: Fabricante/ ¹ Valor obtido em laboratório (LMC/UFSCar))

4.1.2 Areia Natural

A areia quartzosa proveniente do rio Mogi-Guaçú, do município de São Carlos foi utilizada nesta pesquisa como agregado miúdo natural. Na caracterização da areia foram obtidos os valores referentes à composição granulométrica, massa específica, massa unitária no estado seco e solto, massa unitária no estado seco e compactado e absorção de água.

4.1.3 Pedra Britada

O agregado graúdo utilizado nesta pesquisa foi a brita basáltica comercializada na cidade de São Carlos. Na caracterização da brita foram obtidos os valores referentes à composição

granulométrica, massa específica, massa unitária no estado seco e solto, massa unitária no estado seco e compactado e absorção de água.

4.1.4 Areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC)

As amostras de ACBC foram coletadas na Usina Diamante localizada próxima à São Carlos na cidade de Jaú, esta usina pertence ao grupo COSAN. A areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar foi utilizada como agregado miúdo na produção dos concretos, com teores de substituição de 30% em massa.

Na caracterização da ACBC, foram obtidos valores referentes à composição granulométrica, massa específica, massa unitária no estado seco e solto, massa unitária no estado seco e compactado, absorção de água, materiais pulverulentos e composição química.

4.1.5 Resíduo da construção civil (RCC)

As amostras dos agregados reciclados provenientes dos resíduos da construção civil foram coletadas na usina de reciclagem da cidade de São Carlos. Foi utilizado o agregado graúdo classificado por brita 1 proveniente de resíduos de concreto e argamassa (resíduo cinza), os agregados reciclados de RCC foram utilizados em substituição parcial do agregado graúdo natural na produção dos concretos, com teores de substituição de 30%, 50% e 100%.

Na caracterização do RCC, foram obtidos valores referentes à composição granulométrica, massa específica, massa unitária no estado seco e solto, massa unitária no estado seco e compactado, absorção de água, materiais pulverulentos e composição química.

4.2 Metodologia

Neste item serão apresentados a metodologia utilizada para a coleta e padronização das amostras de ACBC e RCC, os ensaios realizados na caracterização dos materiais, os procedimentos adotados na moldagem e cura dos corpos de prova de concreto, e os experimentos realizados com os concretos.

4.2.1 Descrição da Usina de Reciclagem de RCC

Por meio da revisão da literatura, verificou-se que existem diferentes tipos de Usinas de reciclagem de RCC, e as propriedades desses materiais são influenciadas pela forma de beneficiamento dos mesmos. Tendo em vista esta questão, foi realizada uma visita na Usina de reciclagem de RCC na qual os materiais foram coletados com o objetivo de identificar a tipologia da usina bem como o processo de beneficiamento dos resíduos.

4.2.2 Coleta e padronização da ACBC

As amostras de ACBC foram coletadas na Usina Diamante localizada próxima à São Carlos na cidade de Jaú. A ACBC foi retirada das caldeiras por um funcionário da usina (Figura 26), devido a alta temperatura do material, o mesmo foi exposto ao ar livre para o resfriamento.

Figura 26 - Retirada da ACBC da caldeira na usina

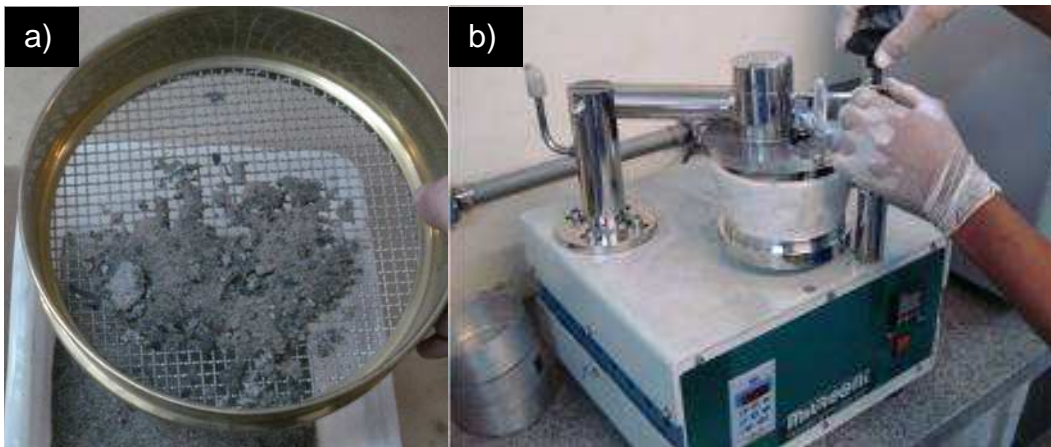


Foi possível observar uma grande quantidade de areia incorporada às cinzas, isto ocorre porque durante a etapa de lavagem da cana, a areia proveniente da lavoura não é totalmente retirada como também foi observado por CORDEIRO (2006). A cinza apresenta também pedaços de bagaço que não foram queimados totalmente, isto pode ocorrer quando a temperatura de queima está abaixo de 1000°C. Segundo COELHO (1999) um bagaço com 50% de umidade a temperatura de ignição fica entre 500°C e 600°C.

Após a coleta e resfriamento da ACBC, as mesmas foram estocadas em caixas plásticas no laboratório de Materiais e Componentes da UFSCar.

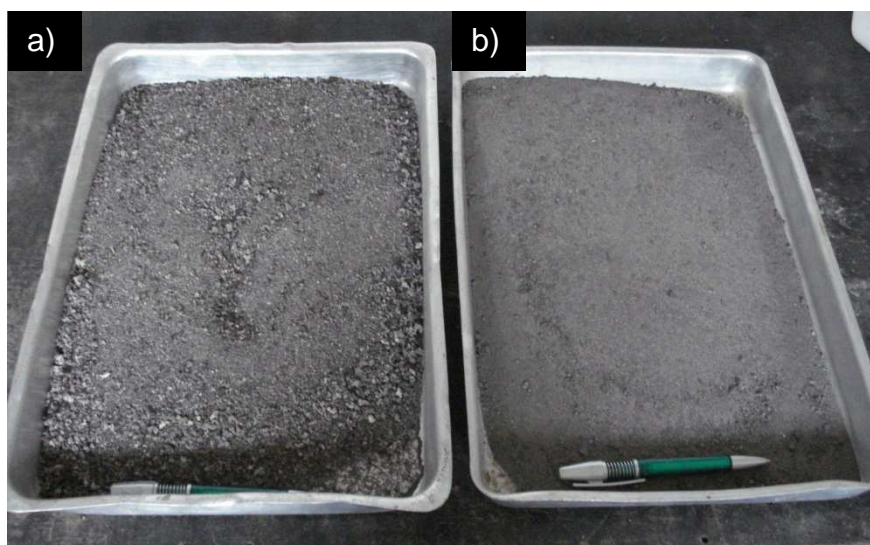
No laboratório, as amostras foram secas em estufa com temperatura de $100\pm 5^{\circ}\text{C}$ e peneiradas manualmente em peneira de malha quadrada de 4,75mm para retirar as impurezas incorporadas (torrões, gravetos, folhas, bagaço (Figura 27). Foi realizada a desaglomeração dos grãos em moinho tipo almofariz-pistilo da marca Marconi, em porções de 0,150 kg por 3 minutos na rotação de 65 RPM, apenas para padronizar as amostras (Figura 27).

Figura 27 - Peneiramento (a) e desaglomeração da ACBC (b)



Pode-se verificar o aspecto da ACBC antes e depois da desaglomeração (Figura 28).

Figura 28 – ACBC: antes da desaglomeração (a) e após a desaglomeração (b)

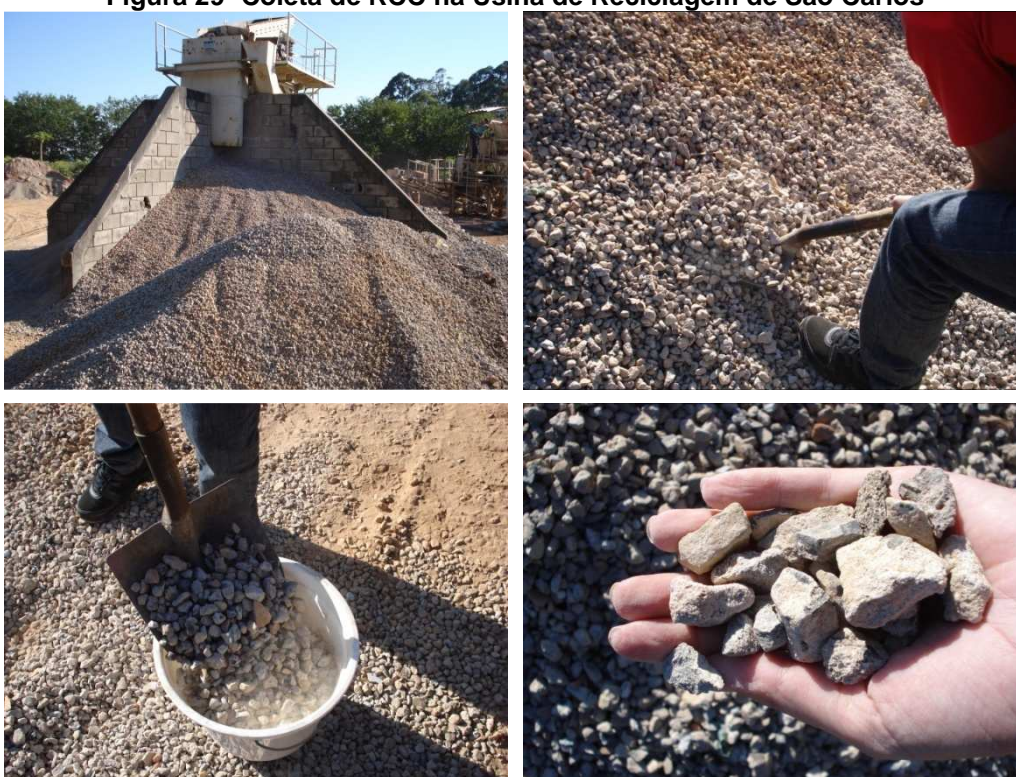


Após a padronização da ACBC, a mesma foi utilizada como substituta parcial do agregado miúdo na produção dos corpos de prova de concreto.

4.2.3 Coleta e padronização do RCC

As amostras do resíduo da construção civil foram coletadas na Usina de reciclagem da cidade de São Carlos (Figura 29) nos meses de março e agosto de 2012 e janeiro de 2013. Neste trabalho, foi utilizado o agregado reciclado classificado por brita 1, este agregado é proveniente da reciclagem de concretos e argamassas.

Figura 29- Coleta de RCC na Usina de Reciclagem de São Carlos



No laboratório (LMC – UFSCar), as amostras foram secas em estufa a $100 \pm 5^\circ\text{C}$. Verificou-se que o agregado reciclado possuía uma quantidade significativa de impurezas (cerâmica, madeira, metal, vidro, etc), e desta forma, realizou-se uma triagem visual para a retirada destas impurezas.

A triagem do agregado reciclado (Figura 30) foi realizada da seguinte forma: separou-se amostras contendo 10 kg de agregado reciclado, o material foi espalhado em uma bandeja metálica e as impurezas foram retiradas manualmente. Após a triagem, as impurezas foram separadas e pesadas.

Figura 30- Triagem do RCC (a), impurezas retiradas (b)

Além das impurezas citadas anteriormente, foi verificado também que o agregado apresentava uma quantidade significativa de material fino (que passava na peneira de malha 4,75mm) e partículas com dimensões superiores a 25 mm. As partículas finas são prejudiciais ao concreto, uma vez que as mesmas absorvem grande quantidade de água; as partículas com dimensões superiores a 25 mm dificultam o processo de moldagem dos corpos de prova, uma vez que segundo a NBR 5738 (ABNT,2003) a dimensão nominal do agregado graúdo não pode ser superior a 4 vezes o diâmetro do corpo de prova. Neste trabalho foram utilizados corpos de prova com diâmetro de 100 mm, sendo que a dimensão nominal do agregado graúdo não poderia ser superior a 25 mm. Notou-se que a maioria dos agregados que ficaram retidos na peneira de malha 19 mm possuía uma de suas dimensões superiores a 25mm, como pode ser verificado na Figura 31. Nesta figura é possível observar que a partícula possuía uma dimensão de aproximadamente 19mm e a outra de 40mm, e desse modo, optou-se por descartar o material retido na peneira de malha de 19mm. Foi realizado o peneiramento do material com o objetivo de separar os grãos retidos nas peneiras de malhas 19 mm; 12,5 mm; 9,5 mm; 6,3 mm e 4,75 mm e fundo. Após peneirar o material, para a montagem do RCC, foram descartadas as partículas que ficaram retidas na peneira de malha 19 mm e no fundo.

Figura 31 – Dimensões agregados reciclados



Após a padronização do RCC, o mesmo foi utilizado como substituto parcial do agregado graúdo na produção dos corpos de prova de concreto.

4.2.4 Caracterização dos materiais

Foi realizada a caracterização dos agregados miúdos (ACBC e areia) e agregados graúdos (RCC e brita).

6.2.3.1 Areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC)

A caracterização física e química da ACBC foi determinada a partir dos seguintes ensaios: composição granulométrica, massa específica, massa unitária e volume de vazios, absorção de água, material pulverulento e composição química.

Os ensaios de caracterização física da ACBC foram realizados no Laboratório de Materiais e Componentes (UFSCar) com amostras padronizadas de ACBC.

A composição granulométrica foi determinada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003). A NBR 7211 (ABNT, 2009) especifica a seguinte série de peneiras para a determinação da granulometria de agregados miúdos: 6,3 mm; 4,75 mm; 2,36 mm; 1,18 mm; 0,60 mm; 0,30 mm e 0,15 mm. Foram utilizadas 2 amostras secas de 500 g de ACBC, as mesmas foram agitadas mecanicamente por 10 minutos, após o peneiramento foram pesadas as porções retidas em cada peneira e calculadas as porcentagens retidas acumuladas, módulo de finura e a dimensão máxima característica dos agregados.

A massa específica das amostras de ACBC foi obtida seguindo as recomendações da norma NM 23 (MERCOSUR, 2000). Neste ensaio adicionou-se querosene no frasco de Le Chatelier até a marca compreendida entre 0 e 1 cm³ e realizou-se a primeira leitura (V1) como pode ser verificado na Figura 31 a. Foi adicionado cuidadosamente 50 g de ACBC com auxílio de um funil, após colocar todo o material, o frasco foi agitado suavemente e em seguida realizou-se a segunda leitura (V2) (Figura 32 b). A massa específica foi determinada pela equação 1:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Equação 1

onde:

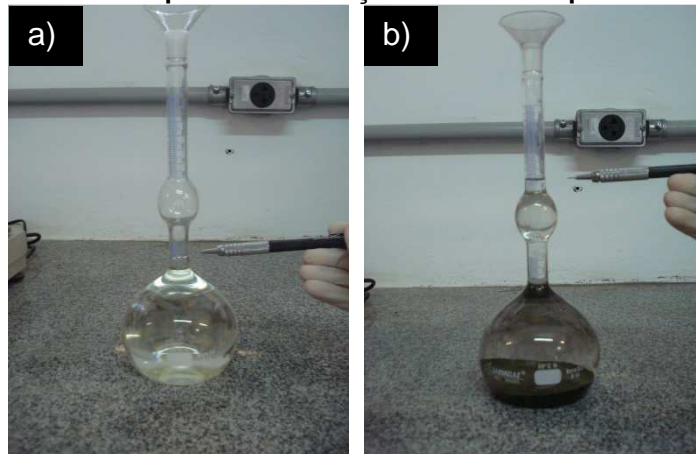
ρ = massa específica (g/cm³),

m = massa do material (g),

v = volume deslocado (V2 – V1) (cm³).

Realizou-se o experimento com 2 amostras secas de ACBC.

Figura 32 – Ensaio para determinação da massa específica da ACBC



O ensaio de massa unitária e volume de vazios foi realizado conforme especificado pela NBR NM 45 (ABNT,2006). A massa unitária é definida como a relação entre a massa do agregado lançado no recipiente e o volume do recipiente, o volume de vazios corresponde ao espaço entre os grãos de uma massa de agregado. Foi utilizado um recipiente com volume aferido de 2,98 litros, sendo 15,4 cm de diâmetro por 16,0 cm de altura. A massa unitária foi determinada no estado compactado e estado solto. O estado compactado é descrito pelo método A da NBR NM 45 (ABNT,2006), onde deve-se encher o recipiente com o material até um terço de sua capacidade e aplicar 25 golpes com a haste de adensamento, os golpes devem ser distribuídos uniformemente em toda a superfície, o mesmo procedimento deve ser realizado para as outras duas camadas, as camadas devem ser niveladas. O estado solto é descrito pelo método C da mesma norma, o agregado deve ser lançado a 50 mm acima da borda do recipiente até encher o mesmo, após o enchimento a superfície deve ser nivelada. A massa unitária foi determinada pela relação da massa obtida no preenchimento do recipiente e o volume desse recipiente, em kg/m³. O índice de vazios foi calculado pela Equação 2.

$$Ev = 100 * \frac{[(d_1 * \rho_w) - \rho_{ap}]}{d_1 * \rho_w}$$

Equação 2

onde:

Ev = índice de volume de vazios nos agregados, em porcentagem,

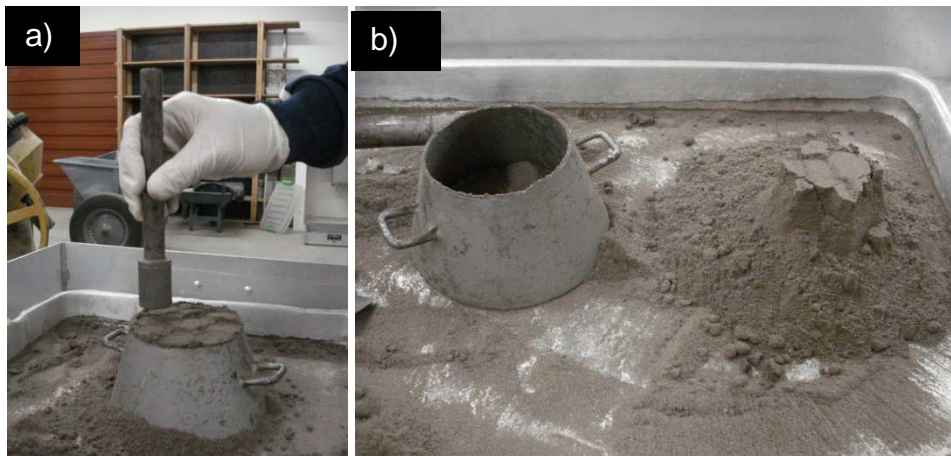
d_1 = massa específica do agregado seco (g/cm³),

ρ_w = massa específica da água (g/cm³),

ρ_{ap} = massa unitária do agregado (g/cm³).

A absorção de água da ACBC foi determinada segundo as especificações da NBR NM30 (ABNT,2001), segundo esta norma, absorção é o “incremento de massa de um corpo sólido poroso devido à penetração de um líquido (água) em seus poros permeáveis, em relação a sua massa em estado seco”. Para a realização do ensaio, foram utilizadas duas amostras de 1 kg de ACBC, as mesmas foram colocadas em uma bandeja e cobertas com água, as amostras ficaram submersas durante 24 horas. Após 24 horas, as amostras ficaram expostas a uma corrente de ar quente com a finalidade de eliminar a água da superfície dos grãos. Durante o processo de secagem, o agregado foi colocado em um molde, aplicou-se suavemente 25 golpes com a haste de compactação (Figura 33 a) e levantou-se o molde verticalmente, o aspecto saturado superfície seca é detectado quando o monte de agregado desmorona no momento em que o molde é levantado (Figura 33 b). Após o desmoronamento do monte de agregado, a massa no estado saturado superfície seca foi determinada e o material foi colocado em estufa a 105 ± 5 °C até a secagem.

Figura 33 – Ensaio para determinação da absorção de água da ACBC



A absorção de água foi determinada pela equação 3.

$$A = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_s} * 100$$

Equação 3

onde:

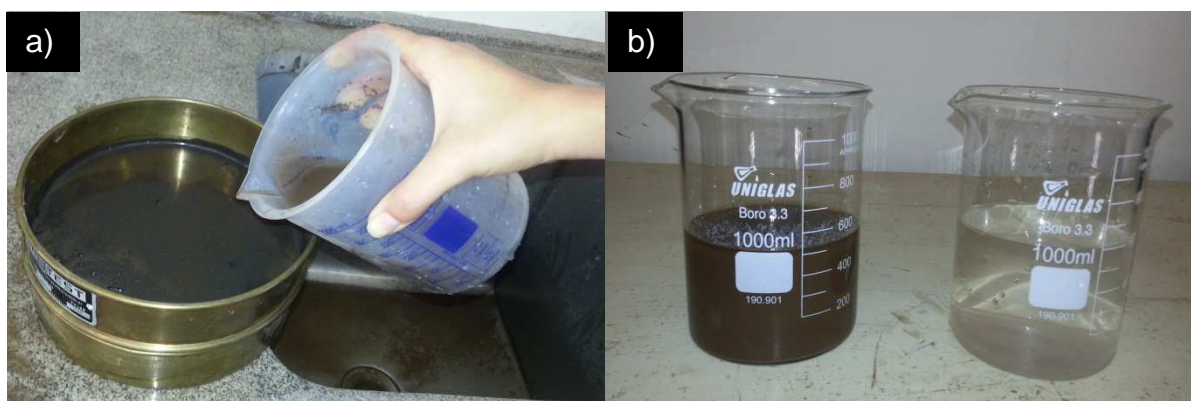
A = absorção de água, em porcentagem,

m_{sat} = massa do agregado saturado com superfície seca (g),

m_s = massa seca do agregado (g).

O ensaio de material pulverulento foi realizado de acordo com a NBR NM 46 (ABNT,2003). Foram utilizadas duas amostras secas de 500g de ACBC, e as amostras foram colocadas em um recipiente onde foi adicionada água até cobri-las. O recipiente foi agitado vigorosamente com a finalidade de separar as partículas com dimensões inferiores de 75 μ m, e desta forma, os materiais mais finos ficaram em suspensão e foram despejados na peneira de 75 μ m (Figura 34 a). Este procedimento foi repetido até que a água de lavagem ficasse límpida. Na Figura 34 b, pode-se observar a primeira e a última água de lavagem da ACBC. Após a lavagem, o material retido na peneira de malha 75 μ m foi seco em estufa. A quantidade de material pulverulento foi determinada pela diferença entre a massa inicial da amostra seca e a massa final da amostra após a lavagem.

Figura 34 – Ensaio para determinação do material pulverulento da ACBC



A análise da composição química da ACBC foi realizada no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas da Universidade Federal do Paraná (LAMIR-UFPR). Foram utilizadas duas amostra de ACBC para a determinação da composição química. Uma das amostras no estado natural, ou seja, sem a padronização em laboratório, e a outra amostra padronizada. Foi realizada a análise química semiquantitativa por espectrometria de fluorescência de raios-X, por meio de um espectrômetro da marca Philips PW 2400.

6.2.3.2 Areia

A caracterização da areia foi realizada a partir dos seguintes ensaios: composição granulométrica, massa específica, massa unitária e volume de vazios e absorção de água. Com exceção do ensaio de massa específica, todos os ensaios foram executados seguindo a mesma metodologia dos ensaios realizados com a ACBC.

A massa específica foi determinada conforme as recomendações da NBR NM 52:2009 por meio da relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis. Foram utilizadas duas amostras de 1 kg de areia, as mesmas foram colocadas em

uma bandeja e cobertas com água, as amostras ficaram submersas durante 24 horas. Após 24 horas, as amostras ficaram expostas a uma corrente de ar com a finalidade de eliminar a água da superfície dos grãos (saturado superfície seca). Durante o processo de secagem, o agregado foi colocado em um molde, aplicou-se suavemente 25 golpes com a haste de compactação e levantou-se o molde verticalmente, o aspecto saturado superfície seca é detectado quando o monte de agregado desmorona no momento em que o molde é levantado (Figura 35).

Figura 35 – Areia no estado saturado com superfície seca



Após o desmoronamento do monte de agregado, pesou-se 500 g de areia (m_s) e colocou-se em um frasco, a massa foi conjunto foi determinada (m_1). Colocou-se água no frasco até próximo da marca de 500 ml e o frasco foi mantido em repouso por 1 hora. Passada 1 hora, completou-se com água até a marca de 500 ml e determinou-se a massa do conjunto (m_2). O agregado foi retirado do frasco e secado em estufa a 105 ± 5 °C para a determinação da massa seca (m). O valor da massa específica do agregado foi determinado pela equação 4.

$$d = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}}$$

Equação 4

onde:

d = massa específica do agregado (g/cm^3),

m = massa da amostra seca em estufa (g),

V = volume do frasco (cm^3),

V_a = volume de água adicionado ao frasco (cm^3),

m_s = massa da amostra na condição saturada superfície seca (g),

ρ_a = massa específica da água (g/cm^3).

O volume de água adicionado ao frasco (V_a) é determinado pela equação 5.

$$V_a = \frac{(m_2 - m_1)}{\rho_a}$$

Equação 5

Onde:

V_a = volume de água adicionado ao frasco (cm^3),

m_1 = massa do conjunto (frasco + agregado) (g),

m_2 = massa total (frasco + agregado + água) (g),

ρ_a = massa específica da água (g/cm^3).

6.2.3.3 RCC

O RCC foi caracterizado pela composição granulométrica, massa específica, absorção, massa unitária no estado seco e solto, massa unitária compactada, material pulverulento e composição química. A determinação da quantidade de material pulverulento e composição química foram realizadas de acordo com a mesma metodologia utilizada nas amostras de ACBC.

A composição granulométrica foi determinada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003). A série de peneiras especificadas pela NBR 7211 (ABNT, 2009) utilizadas neste ensaio foram: 19,0 mm; 12,5 mm; 9,5 mm; 6,3 mm e 4,75 mm. Foram utilizadas amostras secas de 5 kg de RCC, as mesmas foram agitadas mecanicamente por 10 minutos, após o peneiramento foram pesadas as porções retidas em cada peneira e calculadas as porcentagens retidas acumuladas, módulo de finura e a dimensão máxima característica dos agregados. Pode-se verificar na Figura 36 o peneirador utilizado no ensaio.

Figura 36 – Peneirador de agregado graúdo



A massa específica foi determinada conforme especificações da NBR NM 53 (ABNT,2002). Neste ensaio, são eliminadas as partículas que passam na peneira de malha 4,75 mm. Foram utilizadas duas amostras secas de 3 kg de RCC, as mesmas ficaram submersas em água por 24 horas (Figura 37), após este período, o material foi retirado da água e seco em um pano absorvente para eliminar a água visível dos grãos (Figura 38 a), em seguida a massa do agregado saturado com superfície seca foi determinada (ms) (Figura 39 b).

Figura 37 – RCC submergido em água



Figura 38 – Secagem da água visível do grãos (a), determinação da massa saturada com superfície seca (b)



Após a determinação da massa do agregado saturado com superfície seca, foi determinada a massa submersa da amostra. Na Figura 39, pode-se verificar a balança utilizada para determinar a massa de agregado submerso.

Figura 39 – Determinação da massa submersa do RCC



Após a determinação da massa do agregado submerso, o mesmo foi seco em estufa a 105 ± 5 °C para a determinação da massa seca (m).

A massa específica do agregado foi determinado pela equação 6.

$$d = \frac{m}{m_s - m_a}$$

Equação 6

onde:

d = massa específica do agregado (g/cm^3),

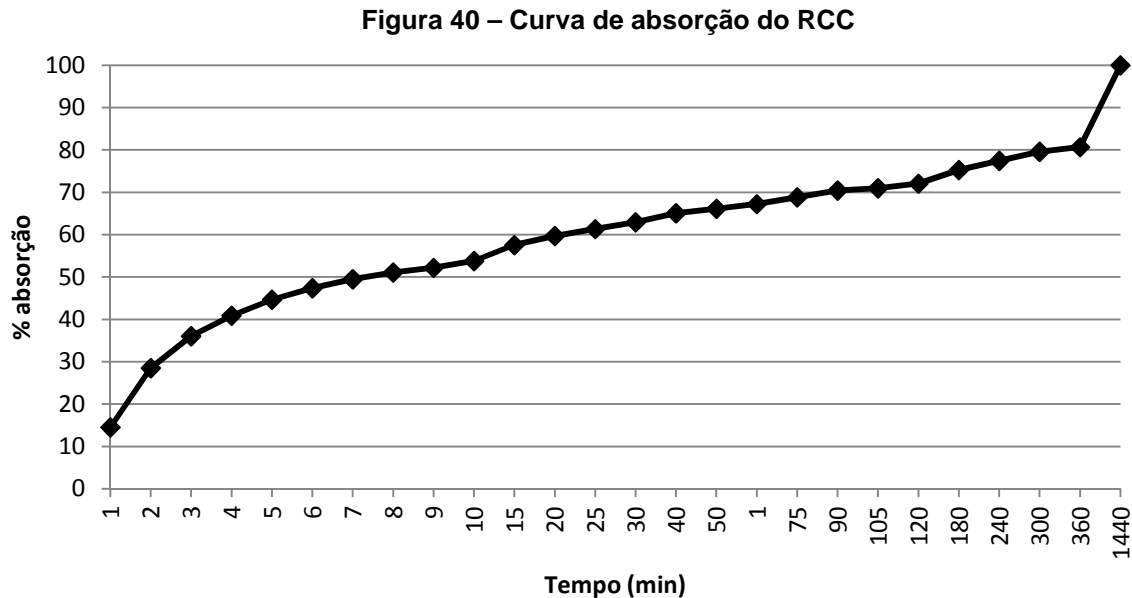
m = massa seca da amostra (g),

m_s = massa do agregado saturado com superfície seca (g),

m_a = massa do agregado imerso em água (g).

Durante o ensaio de massa específica, foi verificada a taxa de absorção do RCC de acordo com o ensaio proposto por Leite (2001). O agregado foi submergido em água e o ganho de peso foi monitorado por 24 horas, sendo a primeira leitura realizada nos primeiros 30 segundos; nos primeiros 10 minutos foi realizada uma leitura por minuto; entre 10 e 30 minutos, uma leitura a cada 5 minutos; entre 30 e 60 minutos, uma leitura a cada 10 minutos; entre 1 e 2 horas uma leitura a cada 15 minutos; entre 2 e 6 horas, uma leitura a cada uma hora e para

finalizar a última leitura foi realizada 24 horas após o início do ensaio. Após esse ensaio, foi possível verificar a porcentagem de absorção em relação ao tempo de imersão do agregado reciclado. Como pode ser verificado no gráfico representado pela Figura 40, mais de 50% da absorção de água do RCC ocorre nos primeiros 10 minutos de imersão.



O ensaio de massa unitária e volume de vazios foi realizado conforme especificado pela NBR NM 45 (ABNT,2006). A massa unitária é definida como a relação entre a massa do agregado lançado no recipiente e o volume do recipiente, o volume de vazios corresponde ao espaço entre os grãos de uma massa de agregado. Foi utilizado um recipiente com volume aferido de 2,98 litros, sendo 15,4 cm de diâmetro por 16,0 cm de altura. A massa unitária foi determinada no estado compactado e estado solto. O estado compactado é descrito pelo método A da NBR NM 45 (ABNT,2006), onde deve-se encher o recipiente com o material até um terço de sua capacidade e aplicar 25 golpes com a haste de adensamento, os golpes devem ser distribuídos uniformemente em toda a superfície, o mesmo procedimento deve ser realizado para as outras duas camadas, as camadas devem ser niveladas (Figura 41). O estado solto é descrito pelo método C da mesma norma, o agregado deve ser lançado a 50 mm acima da borda do recipiente até encher o mesmo, após o enchimento a superfície deve ser nivelada. A massa unitária foi determinada pela relação da massa obtida no preenchimento do recipiente e o volume desse recipiente, em kg/m³.

Figura 41 – Massa unitária compactada do RCC: golpes aplicados com a haste de adensamento (a), camada nivelada (b)



O índice de vazios foi calculado pela Equação 7.

$$E_v = 100 * \frac{[(d_1 * \rho_w) - \rho_{ap}]}{d_1 * \rho_w}$$

Equação 7

onde:

E_v = índice de volume de vazios nos agregados, em porcentagem,

d_1 = massa específica do agregado seco (g/cm^3),

ρ_w = massa específica da água (g/cm^3),

ρ_{ap} = massa unitária do agregado (g/cm^3).

6.2.3.4 Brita

A brita utilizada como agregado graúdo foi caracterizada pela composição granulométrica, massa específica, massa unitária no estado seco e solto, massa unitária compactada e absorção de água. Todos os ensaios foram executados seguindo a mesma metodologia dos ensaios realizados com o RCC.

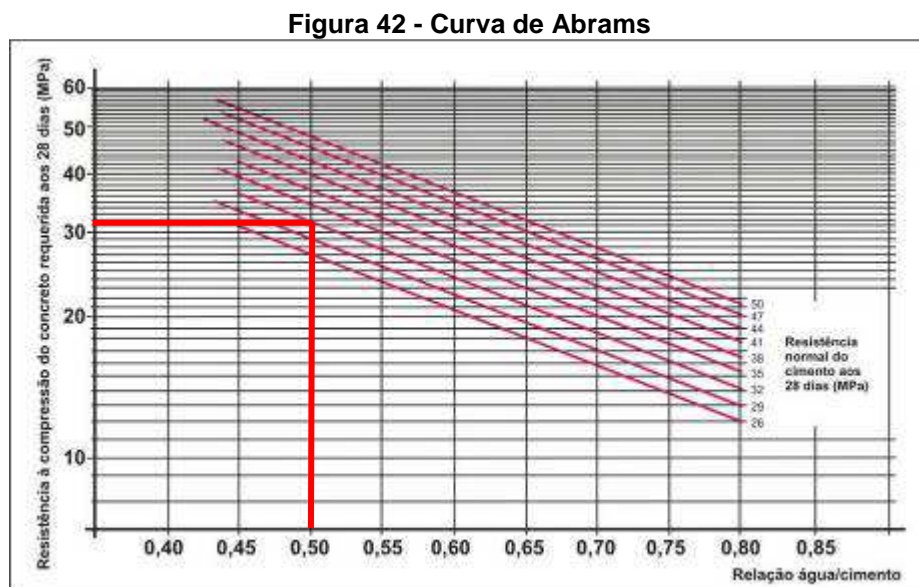
4.2.5 Dosagem dos concretos

O estudo de dosagem dos concretos foi baseado no método da ABCP adaptado do ACI (American Concrete Institute). Este método é indicado para concretos de consistência plástica e fluida. A primeira aproximação da quantidade de materiais é fornecida pelo método e após, deverão ser realizados ajustes no teor de argamassa mantendo constante a relação a/c.

Foram determinados os seguintes parâmetros iniciais de dosagem:

- Relação água/cimento (em massa) $\leq 0,60 \rightarrow$ Concreto Armado (CA) Classe de agressividade II (NBR 6118/2007 – Tabela 6.1);
- Resistência à compressão acima de 25 MPa \rightarrow Concreto exposto à classe de agressividade II (NBR 6118/2007 – Tabela 7.1);
- Abatimento do tronco de cone (NBR 7223/1992) de 70 ± 10 mm – trabalhabilidade indicada para um concreto plástico, sem uso de aditivos.
- Desvio Padrão = 4MPa, condição de preparo A: os materiais são medidos em massa (NBR 12655/2006).

Foi adotado nesta pesquisa um f_{ck} de 25 MPa para o concreto aos 28 dias, considerando o desvio padrão (sd) de 4MPa, foi obtido o valor de 32MPa para f_{c28} , sendo que $f_{c28} = f_{ck} + 1,65sd$. Utilizou-se a Curva de Abrams (Figura 42) para determinar a relação água/cimento inicial do traço básico a partir dos dados do f_{c28} do concreto desejado.



Para determinar a dosagem ideal do concreto foi utilizado como parâmetro a trabalhabilidade constante com abatimento de 70 ± 10 mm. A partir do valor alcançado do

abatimento, foram realizadas mudanças no teor de argamassa e consumo de cimento a fim de encontrar a melhor dosagem.

Após a dosagem do traço referência, foi realizada a incorporação da ACBC e do RCC nos concretos nas seguintes proporções:

- ✓ Traço referência: 0% ACBC e 0% RCC
- ✓ Traço 30ACBC: 30% ACBC e 0% RCC
- ✓ Traço 30RCC: 0% ACBC e 30% RCC
- ✓ Traço 50RCC: 0% ACBC e 50% RCC
- ✓ Traço 30ACBC30RCC: 30% ACBC e 30% RCC
- ✓ Traço 30ACBC50RCC: 30% ACBC e 50% RCC
- ✓ Traço 100RCC: 0% ACBC e 100% RCC

Vale salientar que na dosagem dos concretos com ACBC e RCC foram realizados ajustes no fator a/c mantendo constante o abatimento de 70 ± 10 mm. Todos os traços foram calculados e testados em laboratório. O abatimento foi mantido constante tendo em vista a não utilização de aditivos, evitando-se possíveis interferências dos aditivos na otimização das proporções da utilização conjunta e isolada dos resíduos em estudo. Além disso, o uso de plastificantes poderia melhorar as propriedades do concreto, em detrimento da real influência dos teores de substituição dos agregados naturais pelos resíduos em estudo. A metodologia baseada em manter o abatimento constante e, para isso, variar a relação água cimento foi utilizada por outros pesquisadores que trabalharam com resíduos (LIMA et. al., 2011; TABSH & ABDELATAH 2009; CORINALDESI, 2009; Casuccio et. al., 2008; SALES & SOUZA, 2009; ZORDAN, 1997).

Na definição dos traços com o RCC, foi realizada a compensação do volume de material, uma vez que a massa específica do RCC é inferior à massa específica da brita. Desta forma, se a substituição tivesse sido realizada apenas em massa, haveria um volume maior de RCC e, devido ao alto teor de absorção de água do RCC, seria necessária uma quantidade ainda maior de água na mistura para produzir misturas equivalentes à referência. Essa metodologia de compensação foi utilizada por diversos pesquisadores (LEITE 2001, VIEIRA *et al*, 2003, CABRAL 2007). Utilizou-se a Equação 8 para calcular a compensação do volume do RCC.

$$Mrcc = Mbrita \frac{\gamma_{rcc}}{\gamma_{brita}}$$

Equação 8

Onde:

$Mrcc$ = massa do RCC (kg)

$Mbrita$ = massa da brita (kg)

γ_{rcc} = massa específica do RCC (kg/dm³)

γ_{brita} = massa específica da brita (kg/dm³)

Posteriormente, foi determinado o tempo de pré-molhagem do agregado reciclado de RCC através da curva de absorção *versus* tempo (Figura 40). O procedimento de pré-molhagem visou evitar que o agregado reciclado absorvesse parte da água de amassamento da mistura, comprometendo a trabalhabilidade do concreto. Este procedimento foi utilizado por diversos pesquisadores (LEITE, 2001; CABRAL, 2007; BUTTLER & MACHADO, 2003; VIEIRA *et al*, 2003). O tempo de pré-molhagem dos agregados reciclados foi de 10 minutos, tempo que corresponde à absorção de cerca de 50%, e nesta condição, o agregado apresentava-se semi-saturado. Segundo Buttler e Machado (2003) a presença de água no agregado reciclado faz com que grande quantidade de partículas de cimento fiquem aderidas na superfície do agregado ocasionando melhor aderência pasta/agregado. Outra vantagem da pré-molhagem refere-se ao efeito da “cura interna” que ocorre no estado endurecido do concreto quando a água absorvida pelo agregado é mobilizada na matriz de cimento ocasionando a hidratação das partículas remanescentes de cimento não hidratado (BUTTLER & MACHADO, 2003).

Para realizar a pré-molhagem, os agregados reciclados de RCC foram colocados em um balde com cerca de 80% da água da mistura por 10 minutos antes do início da moldagem (Figura 43).

Figura 43 – Pré-molhagem do RCC



Os materiais foram misturados em betoneira com capacidade de 120 litros. Primeiramente foram misturados os agregados (brita, RCC, areia e ACBC) com cerca de 80% da

água da mistura durante 2,5 minutos (Figura 44 a), e em seguida, foi adicionado o cimento e o restante da água e misturados por mais 2,5 minutos (Figura 44 b).

Figura 44 – Agregados misturados na betoneira (a) concreto fresco (b)



Após a obtenção do concreto, foi realizado o ensaio de abatimento de tronco de cone de acordo com a NBR 7223 (ABNT, 1992) para verificar se o abatimento do concreto está dentro do limite estabelecido de 70 ± 10 mm. Neste ensaio, o tronco de cone foi preenchido em três camadas, em cada camada foram aplicados 25 golpes com auxílio de uma haste metálica, após o adensamento, o molde foi levantado cuidadosamente na direção vertical (Figura 45 a). O valor do abatimento foi obtido por meio da diferença de altura entre o tronco de cone e o concreto (Figura 45 b).

Figura 45 - Levantamento do tronco de cone (a) e medição do abatimento (b)



As dosagens obtidas em laboratório estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Dosagem dos concretos

Traço	Teor de ACBC	Teor de RCC	Composição do traço de concreto (em massa)						Abatimento (mm)
			Cimento	ACBC	Areia	RCC	Brita	a/c	
Referência	0%	0%	1,00	-	2,00	-	2,62	0,49	77
30ACBC	30%	0%	1,00	0,60	1,40	-	2,62	0,51	62
30RCC	0%	30%	1,00	-	2,00	0,68	1,83	0,50	65
50RCC	0%	50%	1,00	-	2,00	1,13	1,31	0,52	65
30ACBC30RCC	30%	30%	1,00	0,60	1,40	0,68	1,83	0,52	73
30ACBC50RCC	30%	50%	1,00	0,60	1,40	1,13	1,31	0,54	64
100RCC	0%	100%	1,00	-	2,00	2,26	-	0,55	70

Foi necessário variar o fator água/cimento para os traços produzidos com os resíduos com a finalidade de manter constante o abatimento (70 ± 10 mm). A elevada absorção de água do RCC interfere diretamente na consistência do concreto, sendo necessário aumentar a quantidade de água para manter a consistência constante. Vale salientar que parte da água adicionada nas misturas ficou retida nos poros do RCC, desta forma, infere-se que nem toda a água representada pelo fator a/c reagiram na hidratação com o cimento.

O consumo de cimento e teor de argamassa dos traços produzidos estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Consumo de cimento e teor de argamassa dos traços

Traço	Consumo de cimento (Kg/m ³)	Teor de Argamassa (%)
Referência	385,28	53,38
30ACBC	386,28	53,38
30RCC	383,82	54,43
50RCC	380,86	55,14
30ACBC30RCC	384,82	54,43
30ACBC50RCC	381,84	55,14
100RCC	376,66	57,03

Ocorreu uma leve variação no consumo de cimento (2% para o traço 100RCC e menos de 1% para os demais traços) e no teor de argamassa comparativamente ao traço referência. Essa variação é justificada pelos ajustes de dosagem realizados, e pela necessidade de manter a mesma consistência para todos os traços estudados.

4.2.1 Moldagem dos corpos de prova de concreto

Após a determinação dos traços, foram moldados corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. As quantidades de corpos de prova moldados para a realização de cada ensaio estão apresentadas na Tabela 10. Nos dias de moldagem, a umidade relativa do ar permaneceu entre 62% e 73% e a temperatura entre 20,5°C e 22,8°C.

Tabela 10 – Quantidades de corpos de prova moldados

Ensaio / Traços	REF	30ACBC	30RCC	50RCC	30ACBC30RCC	30ACBC50RCC	100RCC
Resistência à compressão	6	6	6	6	6	6	6
Módulo de elasticidade	6	6	6	6	6	6	6
Resistência à tração	2	2	2	2	2	2	2
Absorção, índice de vazios e massa específica	3	3	3	3	3	3	3
Carbonatação	4	4	4	4	4	4	4
Total para cada traço	21	21	21	21	21	21	21
Total	147						

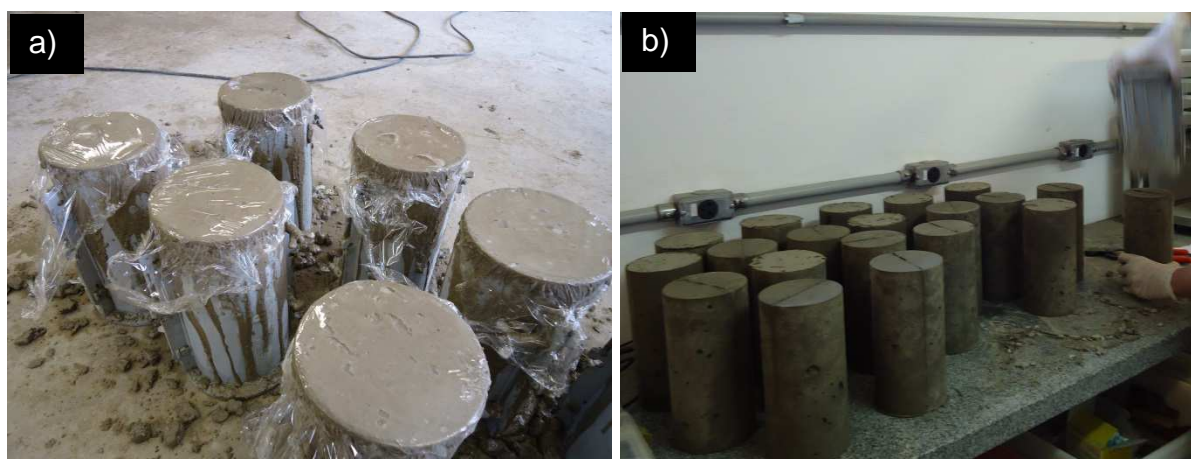
A moldagem e cura dos corpos de prova de concreto foram realizadas de acordo com as especificações da NBR 5738 (ABNT, 2003). Antes do preenchimento dos moldes, os mesmos foram untados com desmoldante para facilitar a desforma. O concreto foi colocado no molde com auxílio de uma concha (Figura 46 a) e adensado com vibrador tipo agulha (Figura 46 b).

Figura 46 – Preenchimento dos moldes (a) e adensamento dos concretos (b)



Após o adensamento, os corpos de prova foram cobertos com plástico filme para impedir a perda de água (Figura 47 a). A desforma foi realizada 24 horas após a moldagem (Figura 47 b).

Figura 47 – Cobertura dos corpos de prova com plástico filme (a) e desforma (b)



O processo de cura dos concretos foi realizado de acordo com as especificações da NBR 5738 (ABNT, 2003). Os corpos de prova foram acondicionados em caixas plásticas identificadas contendo água saturada de cal conforme pode ser verificado na (Figura 48).

Figura 48 – Cura dos corpos de prova de concreto



4.2.2 Propriedades mecânicas dos concretos

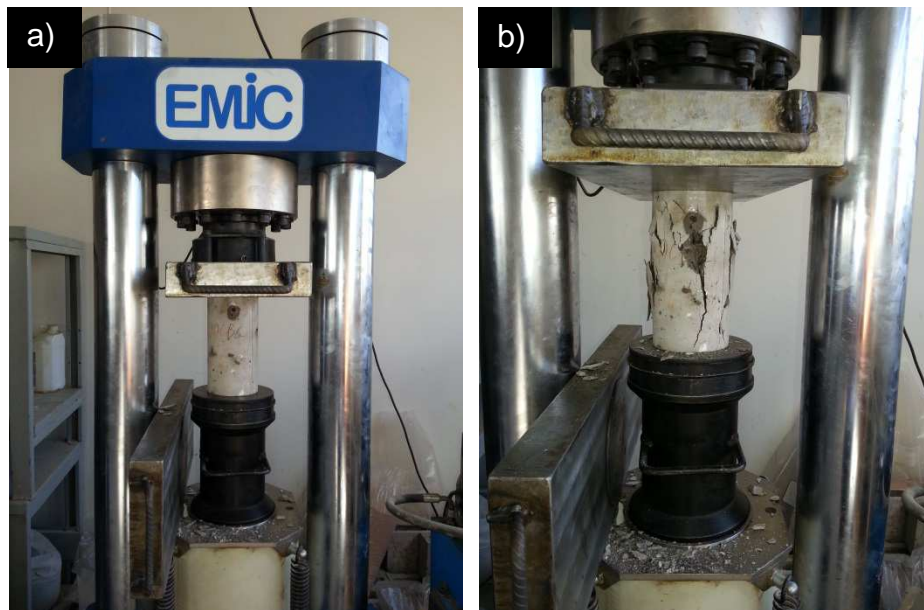
Neste item serão descritos os procedimentos utilizados na realização dos ensaios para a determinação das seguintes propriedades mecânicas dos concretos: resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração.

Os corpos de prova utilizados nos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade foram retificados com a finalidade de regularizar as superfícies de contato para garantir a melhor distribuição da carga aplicada pela prensa.

Os ensaios de resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade foram realizados no laboratório de Sistemas Estruturais (LSE) da UFSCar em prensa denominada EMIC DL60000 (Figura 49 a).

O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com as especificações da NBR 5739 (ABNT, 1994) para os concretos nas idades de 7, 28 e 91 dias, e foram ensaiados quatro corpos de prova para cada traço. O ensaio consistiu na aplicação de carga com velocidade constante até a ruptura do corpo de prova (Figura 49 b), o valor da resistência à compressão foi determinado pela relação entre a carga máxima de ruptura e a área da seção transversal do corpo de prova.

Figura 49 – Ensaio de resistência à compressão (a) e ruptura do corpo de prova (b)



O ensaio de módulo de elasticidade foi realizado de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2003) para os concretos nas idades de 7, 28 e 91 dias, e foram utilizados dois corpos de prova para cada traço. A norma define uma tensão fixa de 0,5 MPa denominada σ_a e uma tensão σ_b que corresponde a 30% da carga de ruptura concreto obtida no ensaio de resistência à compressão. Neste ensaio foram utilizados extensômetros para a medição da deformação dos corpos de prova (Figura 50).

O módulo de elasticidade foi determinado pela Equação 9:

$$E_{ci} = \frac{\sigma_B - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} * 10^{-3}$$

Equação 9

Onde:

σ_B = tensão correspondente a 30% de f_c

ε_b = deformação específica para a tensão 30% f_c

ε_a = deformação específica para a tensão 0,5MPa

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado de acordo com as especificações da NBR 7222 (ABNT, 1994) para os concretos na idade de 28 dias, e foram utilizados dois corpos de prova para cada traço. Neste ensaio, o corpo de prova foi posicionado horizontalmente entre os pratos da prensa (Figura 52) e foi aplicada uma carga constante de compressão até a ruptura, e desta forma, a tensão gerada provocou a ruptura no eixo longitudinal do corpo de prova.

Figura 52 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral



A resistência à tração foi determinada pela Equação 10.

$$f_{t,D} = \frac{2 * F}{\pi * d * L}$$

Equação 10

$f_{t,D}$ = Resistência à tração em MPa

F = Carga de ruptura em KN

d = Diâmetro do corpo de prova em mm

L = Altura do corpo de prova em mm

4.2.3 Propriedades físicas dos concretos

O ensaio para determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica dos concretos foi realizado de acordo com as especificações da NBR 9778 (ABNT, 1987). Foram moldados três corpos de prova para cada traço.

Os corpos de prova de concreto foram acondicionados em estufa à temperatura de 105 ± 5 °C por 72h (Figura 53 a) para a determinação da massa seca (m_s). Após esse período, os mesmos foram resfriados a temperatura ambiente (Figura 53 b) e imersos em água por 72h. A imersão foi realizada da seguinte maneira: a amostra foi mantida com 1/3 de seu volume imerso em água nas primeiras 4 horas (Figura 53 c), 2/3 nas 4 horas subsequentes (Figura 53 d) e completamente imerso nas 64 horas restantes (Figura 53 e). Após a saturação dos corpos de prova, foi determinada a massa saturada com superfície seca (m_{sat}) e a massa saturada imersa em água (m_i).

Figura 53 – Procedimento do ensaio de absorção, índice de vazios e massa específica, (a) secagem dos corpos de prova na estufa, (b) resfriamento dos corpos de prova, (c) imersão de 1/3 do volume dos corpos de prova, (d) imersão de 2/3 do volume dos corpos de prova, (e) imersão total dos corpos de prova



A absorção de água, em porcentagem, foi calculada pela Equação 11.

$$A = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_s} * 100$$

Equação 11

O índice de vazios é a relação entre o volume dos poros permeáveis e volume total da amostra, e esse índice foi calculado, em porcentagem, pela Equação 12.

$$I.V. = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_{\text{sat}} - m_i} * 100$$

Equação 12

A massa específica, em kg/cm³, foi calculada através da Equação 13.

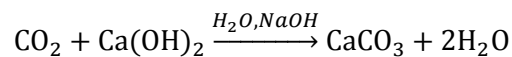
$$\rho = \frac{m_s}{m_{\text{sat}} - m_i}$$

Equação 13

4.2.4 Carbonatação

A avaliação da profundidade de carbonatação foi realizada com o intuito de avançar um pouco na questão da durabilidade dos concretos produzidos com resíduos neste trabalho.

A carbonatação é uma reação físico-química que leva o pH da solução dos poros do concreto a valores próximos da neutralidade, ou seja, ocorre uma redução da alcalinidade que pode resultar na despassivação da armadura que encontra-se nesta região. Por meio da despassivação, o aço fica vulnerável à propagação da corrosão. Segundo Helene (1986), a reação da carbonatação pode ser resumida pela seguinte equação:

**Equação 14**

O ensaio de carbonatação acelerada foi realizado no Laboratório de Materiais e Componentes (LMC) da UFSCar. Os corpos de prova cilíndricos ($\varnothing 100\text{mm}$, h 200mm) permaneceram acondicionados em uma câmara de CO_2 (Figura 54). A câmara foi conectada a um cilindro de CO_2 e o gás injetado através de um solenoide; no interior da câmara existem duas ventoinhas para distribuir o gás de maneira uniforme. O teor de CO_2 foi controlado com auxílio de um sensor da marca Tecnovip, que mede teores acima de 100.000 ppm, e precisão de 0,1%. A umidade relativa do ar e a temperatura interna foram monitoradas através de um termo-higrômetro.

Figura 54 – Câmara de carbonatação

Segundo um estudo da arte realizado por Pauletti *et al.* (2007), diversos autores recomendam a realização de ensaios de carbonatação acelerada com teores de CO₂ inferiores a 20%, pois a utilização de teores superiores a 20% pode acarretar em mudanças microestruturais das amostras. Desta maneira, considerando o desempenho da câmara e baseado na metodologia utilizada por Almeida (2012), foi adotado um teor de gás carbônico de 15 ± 5%.

Além do teor de CO₂, a umidade também é um fator determinante para ocorrer o fenômeno da carbonatação. De acordo com o estudo da arte realizado por Pauletti *et al.* (2007), muitos autores indicam valores de umidade entre 50% e 85%, nesta pesquisa, a umidade relativa do ar no interior da câmara foi mantida entre 60% e 85%. Amostras de sílica gel foram utilizadas para controlar a umidade.

Segundo Kulakowski (2002) e Pauletti *et al.* (2007), temperaturas habituais não provocam influência significativa em ensaios de carbonatação acelerados, e desta forma, foi considerada a temperatura ambiente no interior da câmara.

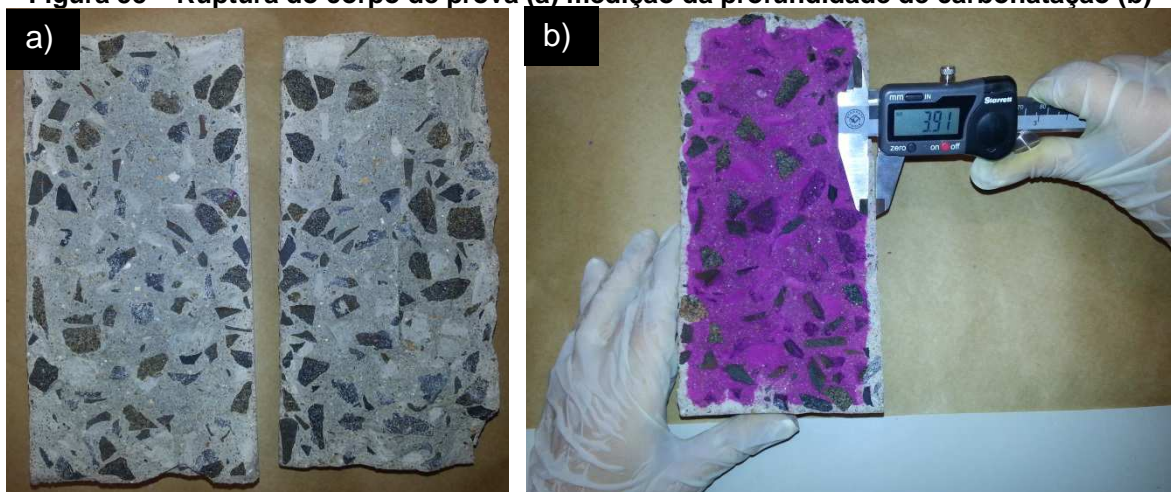
Após a cura dos corpos de prova, foi iniciado o período de sazonalidade com a finalidade de padronizar a temperatura e umidade das amostras antes do acondicionamento na câmara de carbonatação. Os corpos de prova permaneceram sete dias em estufa para secagem com temperatura de 50 ± 5 °C. Após esse período, as amostras permaneceram sete dias em sala climatizada com temperatura de 23 ± 1 °C e umidade relativa do ar de 60% ± 5%.

Após o sazonalamento, as amostras foram acondicionadas na câmara de carbonatação com teor de $15 \pm 5\%$ de CO_2 , e umidade relativa entre 60% e 85%, e o monitoramento da câmara foi realizado diariamente. Devido a grande quantidade de corpos de prova, primeiro foram acondicionados as amostras para ensaio aos 56 dias e depois as amostras para ensaio aos 112 dias. As amostras para ensaio aos 112 dias permaneceram em cura imersa até o início do sazonalamento. Foram utilizados dois corpos de prova de cada traço para cada idade analisada.

A avaliação da profundidade de carbonatação foi realizada pelo método calorimétrico seguindo as recomendações de RILEM (1984). Primeiramente os corpos de prova foram rompidos à tração por compressão diametral, e após o rompimento (Figura 55 a), uma solução de fenolftaleína (1% de fenolftaleína, 29% de água destilada, 70% de álcool isopropílico) foi aspergida na superfície do corpo de prova. O hidróxido de cálcio adquire uma coloração rosada, enquanto a parte carbonatada permanece incolor. Vale salientar que a coloração rosada na análise pode indicar a presença de CH, mas não a ausência total de carbonatação, desta forma, a frente de carbonatação não deve ser considerada rígida, mas gradual (VILLAIN *et al.*, 2007).

A medição da profundidade de carbonatação foi feita com o auxílio de um paquímetro digital (Figura 55 b), e foram obtidas 10 medidas para cada superfície do corpo de prova (5 de cada lado), totalizando 20 medidas por corpo de prova e 40 medidas por traço. Vale salientar que esta técnica é qualitativa e pode ser utilizada como método comparativo entre amostras.

Figura 55 – Ruptura do corpo de prova (a) medição da profundidade de carbonatação (b)



4.2.5 Análise estatística dos resultados

Os resultados obtidos nos ensaios para determinação das propriedades físicas, mecânicas e profundidade de carbonatação dos concretos foram analisados pelo método

ANOVA e teste de Tukey. Neste item, será apresentada uma breve explicação sobre esses dois testes.

A análise de variância ou ANOVA tem como objetivo avaliar se as diferenças observadas entre as médias de determinadas amostras são estatisticamente significantes. Neste teste existem duas hipóteses, a hipótese nula H_0 e a hipótese alternativa H_1 . A hipótese H_0 afirma que as médias das populações são idênticas, enquanto a hipótese H_1 afirma que há alguma diferença entre as médias. Como o teste é realizado sob a hipótese nula, cabe rejeitar ou aceitar H_0 . A aceitação ou rejeição da hipótese nula irá depender da distribuição F de Snedecor e do valor de F crítico. A análise foi realizada com auxílio do EXCEL. Ao selecionar os dados a serem analisados, o programa EXCEL gera uma tabela (Tabela 11).

Tabela 11 – Tabela gerada para a análise ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos						
Dentro dos grupos						
Total						

Onde:

SQ = soma dos quadrados

gl =grau de liberdade

MQ = quadrado médio

F = valor calculado para o teste F

$valor-P$ = maior valor do nível de significância α que rejeita H_0

F crítico = é o valor tabelado do teste F para a fonte de variação.

Foi utilizado um nível de significância $\alpha = 5\%$ para as análises. A hipótese nula é aceita se $F \leq F_{crítico}$, caso contrário a hipótese H_0 é rejeitada. Caso a hipótese nula seja rejeitada, conclui-se que há diferença entre as médias, para saber entre quais populações existe essa diferença é necessário realizar outro teste de hipótese. Neste trabalho, foi realizado o teste de Tukey.

No teste de Tukey, as hipóteses testadas são H_0 ($\mu_i = \mu_j$) e H_a ($\mu_i \neq \mu_j$). Neste teste são analisadas apenas duas populações, ou seja, é necessário fazer combinações para verificar todas as populações. No caso deste trabalho, através da ANOVA foi verificado se há diferença entre os resultados dos traços REF, 30ACBC, 30RCC, 50RCC, 30ACBC30RCC, 30ACBC50RCC e 100RCC, se a hipótese nula for rejeitada, significa que há diferença, sendo assim foi necessário verificar entre quais traços há essa diferença. Essa verificação foi realizada

pelo teste de Tukey através da combinação dos traços, e para analisar todos os traços, foram feitas 21 combinações. As análises das combinações estão apresentadas de forma sintética em tabelas.

Foi realizada uma verificação da homoscedasticidade das amostras antes de aplicar o teste de Tukey, pois esse teste pode ser aplicado presumindo que as variâncias sejam equivalentes ou diferentes. Quando a relação entre duas variâncias (variância maior / variância menor) de um grupo for menor do que 4, as amostras são homoscedásticas (VOLPATO & BARRETO, 2011), ou seja, possuem variâncias equivalentes e quando essa relação for maior que 4, as variâncias são diferentes. A tabela gerada pelo programa EXCEL pode ser verificada a seguir (Tabela 12).

Tabela 12 – Tabela gerada para o Teste de Tukey

	POPULAÇÃO1	POPULAÇÃO2
Média	XXXXXXXX	XXXXXXXX
Variância	XXXXXXXX	XXXXXXXX
Observações	XXXXXXXX	XXXXXXXX
Variância agrupada	XXXXXXXX	
Hipótese da diferença de média	XXXXXXXX	
gl	XXXXXXXX	
Stat t	XXXXXXXX	
P(T<=t) uni-caudal	XXXXXXXX	
t crítico uni-caudal	XXXXXXXX	
P(T<=t) bi-caudal	XXXXXXXX	
t crítico bi-caudal	XXXXXXXX	

Para aceitar ou rejeitar a hipótese nula, é necessário verificar os resultados apresentados no item *Stat t* e *t crítico bi-caudal*. O *Stat t* é o valor calculado para as populações analisadas e o valor do *t crítico bi-caudal* é o valor de t encontrado na tabela t-Student. A hipótese nula é aceita se $Stat T < t_{crítico\ bi-caudal}$.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item são apresentados e discutidos os resultados dos procedimentos experimentais descritos no capítulo 4.

5.1 Descrição da Usina de Reciclagem de RCC

A Usina de Reciclagem de RCC é gerenciada pela Secretaria Municipal de Desenvolvimento Sustentável, Ciência e Tecnologia e Progresso Habitação de São Carlos (PROHAB) e foi projetada pela empresa I&T Informações e Técnicas LTDA.

Os materiais reciclados pela usina são:

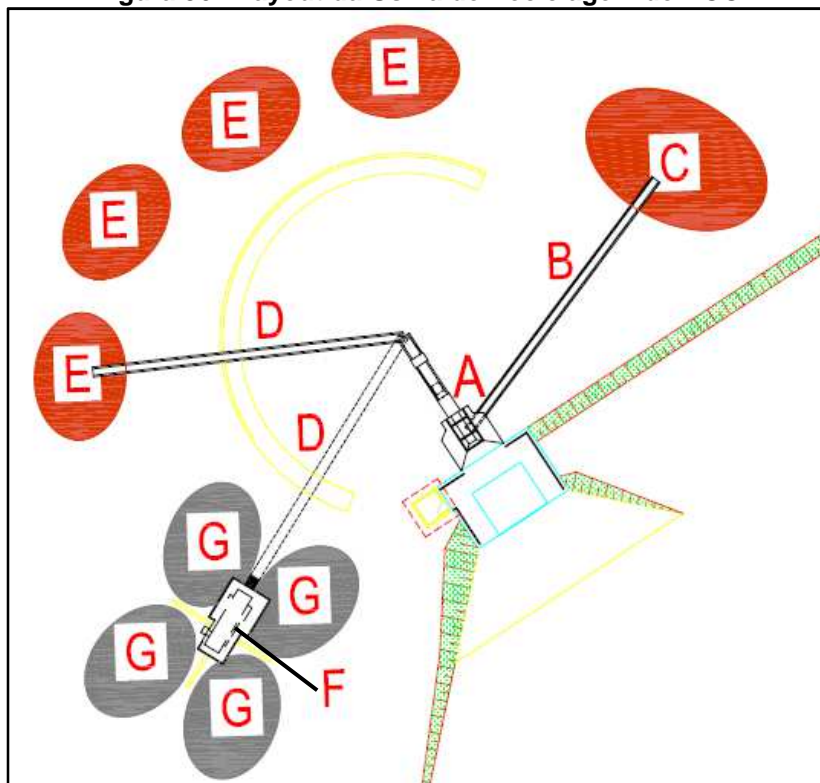
- ✓ Fragmentos de alvenaria de componentes cerâmicos;
- ✓ Fragmentos de alvenaria de blocos de concreto;
- ✓ Fragmentos de concreto, armado ou não, sem fôrmas;
- ✓ Fragmentos de lajes e de pisos;
- ✓ Argamassas de cal, de cimento ou mistas, de assentamento ou revestimento;
- ✓ Componentes de concreto ou cerâmicos: blocos, tijolos, telhas, tubos, lajotas para laje etc;
- ✓ Fragmentos de pedra britada e de areia naturais, sem presença significativa de terra ou outros materiais proibidos (classificação Classe A - CONAMA nº. 307).

Os materiais não reciclados pela usina são:

- ✓ Gesso;
- ✓ Fragmentos de cimento amianto em quantidades expressivas;
- ✓ Madeira, vegetação e matéria orgânica;
- ✓ Papel, papelão, plástico, isopor e similares;
- ✓ Tecidos, borracha, espuma e demais materiais sintéticos;
- ✓ Metais;
- ✓ Vidro;
- ✓ Tintas, impermeabilizantes e asfalto;
- ✓ Líquidos em geral.

A usina de reciclagem foi implantada em localização definitiva, enquadrando-se na tipologia de planta fixa, e seu layout está apresentado na Figura 56.

Figura 56 - Layout da Usina de Reciclagem de RCC



(Fonte: adaptado do projeto desenvolvido pela I&T Informações e Técnicas LTDA)

O RCC a ser britado é transportado pela pá carregadeira e colocado no alimentador vibratório/britador (A), no alimentador existe uma grelha que retira os materiais finos e encaminham ao transportador de correia fixo (B) formando uma pilha de agregado fino (solo) (C). Esse processo de retirada dos finos evita o desgaste desnecessário das mandíbulas do britador.

O transportador de correia móvel (D) pode ser posicionado tanto na direção da pilha de agregado vermelho (E) quanto para a peneira vibratória (F) onde são processados os resíduos de concreto.

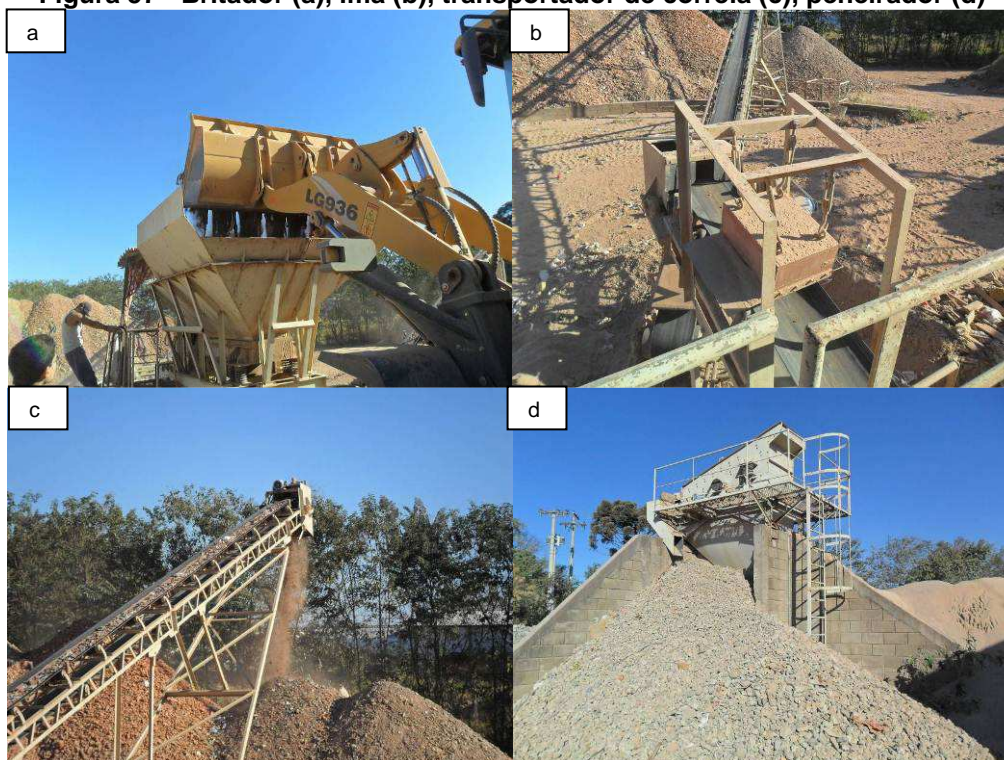
Da peneira vibratória (F), os agregados são separados em baias de acordo com sua granulometria (G).

Os resíduos são despejados no pátio da Usina para que seja realizado o processo de triagem. Após a separação do material a ser reciclado, o mesmo é transportado com auxílio de uma pá-carregadeira até o britador (Figura 57 a) onde o material será processado e reciclado. O resíduo tipo cinza (argamassa e concreto) e vermelho (cerâmico e solo) são processados separadamente.

O britador possui capacidade de processar até 27 toneladas de resíduo por hora. Foi instalado um imã (Figura 57 b) sobre a esteira de transporte do material reciclado com a finalidade de retirar os materiais metálicos que não foram identificados na primeira triagem.

Os materiais reciclados são transportados pelas esteiras e estocados em montes até a utilização (Figura 57 c). O material cerâmico reciclado geralmente é utilizado como sub-base para pavimentação de ruas e estradas, recuperação de estradas rurais, enchimento de fundações de construções e aterro de vias de acesso. Grande parte dos agregados cerâmicos são vendidos para o SAAE (Serviço Autônomo de Água e Esgoto) de São Carlos para serem empregados na operação “tapa buraco”.

Figura 57 - Britador (a), imã (b), transportador de correia (c), peneirador (d)



No caso dos materiais de concreto, a peneira vibratória possui baias separadas pela granulometria do agregado reciclado (rachão, brita 1, pedrisco e areia grossa), e desta forma o material britado fica estocado nas baias até sua utilização (Figura 57 d). Os agregados reciclados de concreto são geralmente aplicados como substituto parcial de agregados naturais em concretos e argamassas sem função estrutural e também no controle de erosões. A fábrica de artefatos de cimento da PROHAB de São Carlos utiliza os agregados reciclados para produzir blocos, bloquetes, guias, bancos, pisos entre outros artefatos (Figura 58 e Figura 59).

Figura 58 - Produtos fabricados na FAC**Figura 59 - Mostruário dos produtos comercializados**

A Usina de Reciclagem de RCC do município de São Carlos se enquadra no processo de beneficiamento mais simples, denominado por primeira geração. Neste processo a remoção de contaminantes é realizada manualmente e os materiais ferrosos são identificados através de um ímã.

5.2 Coleta e padronização do RCC

As quantidades coletadas de RCC e quantidades de impurezas retiradas (cerâmica, vidro, madeira, metal, etc) referente a cada coleta estão apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Quantidade de RCC coletado e impurezas retiradas

Coleta	Quantidade Coletada (kg)	Quantidade de Impurezas (kg)	% de impurezas
Janeiro/12	59,74	1,71	2,86
Agosto/12	166,30	2,35	1,41
Janeiro/13	141,38	3,27	2,32
Total	367,41	7,33	2,00

Considerando o total de RCC coletado, foi retirado cerca de 2% de impurezas. Foi analisada também a porcentagem de impurezas retiradas em cada coleta, pode-se verificar na Tabela 13 que o RCC coletado no mês de março apresentou maior porcentagem de impurezas.

Durante a triagem do material, foi verificado que a maior parte das impurezas retiradas refere-se a materiais cerâmicos, fato que demonstra os problemas e dificuldades de triagem do RCC na usina de reciclagem. Apesar da instrução recebida pelos caçambeiros para separar os resíduos de origem vermelha (cerâmica e solo) dos resíduos cinza (concreto e argamassa), observou-se durante a visita realizada na usina que os resíduos chegam misturados nas caçambas, dificultando ainda mais o trabalho de triagem dos funcionários.

5.3 Caracterização dos materiais

Os resultados obtidos pela caracterização da areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (ACBC), da areia, do agregado reciclado proveniente de resíduos da construção civil (RCC) e da brita serão apresentados neste item.

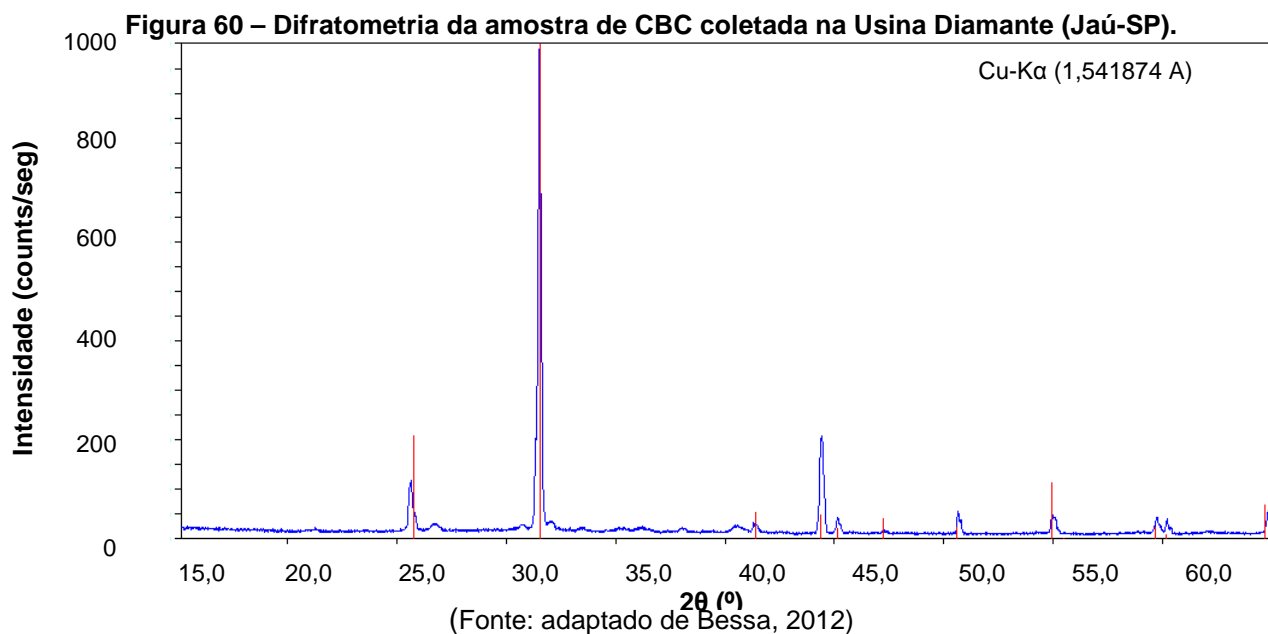
Os resultados da caracterização química da ACBC estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Composição química da ACBC (em %)

Elementos	ACBC <i>in natura</i>	ACBC padronizada
SiO ₂	80,2	80,8
Fe ₂ O ₃	5,6	5,8
K ₂ O	4,0	3,9
Al ₂ O ₃	2,6	2,5
CaO	1,8	1,6
MgO	1,6	1,5
P ₂ O ₅	1,4	1,4
TiO ₂	1,4	1,3
Na ₂ O	0,2	0,2
MnO	0,2	0,1
SO ₃	0,1	0,1
Cr ₂ O ₃	< 0,1	< 0,1
V ₂ O ₅	< 0,1	< 0,1
ZrO ₂	< 0,1	< 0,1
SrO	< 0,1	< 0,1
Perda ao fogo	0,80	0,70

A análise semi-quantitativa possui certo caráter subjetivo e interpretativo, portanto, são aceitáveis variações na ordem de $\pm 10\%$ nas concentrações obtidas, assim como falsas indicações positivas e/ou negativas de elementos em baixas concentrações. A areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar é composta por cerca de 80% de dióxido de silício, fato que viabiliza sua aplicação como agregado. As amostras de ACBC utilizadas por Cordeiro (2006) e Paula *et al.* (2009) também apresentaram altos teores de sílica. Pode-se afirmar através dos resultados apresentados que a padronização da ACBC não alterou sua composição química.

Bessa (2012) realizou ensaio de difratometria da amostra de ACBC coletada na mesma usina onde foram coletadas as amostras para este trabalho, portanto, pode-se inferir que a ACBC se apresenta na estrutura cristalina de quartzo-alfa. A identificação pelo difratograma pode ser verificada na Figura 60, na qual se verifica a amostra de CBC (traçado azul), em coincidência predominante com o padrão de quartzo-alfa (linha vermelha). A estrutura apresenta alto grau de cristalinidade devido a presença de picos de difração bem definidos.



Todos os ensaios da caracterização física da ACBC foram realizados com as amostras padronizadas. Pode-se verificar na Tabela 15 a análise granulométrica da ACBC padronizada, a dimensão máxima característica foi 1,18 mm e o módulo de finura 1,04. Pelo valor apresentado do módulo de finura, a ACBC não é classificada dentro das faixas definidas pela NBR 7211:2009, como pode ser verificado na Figura 61.

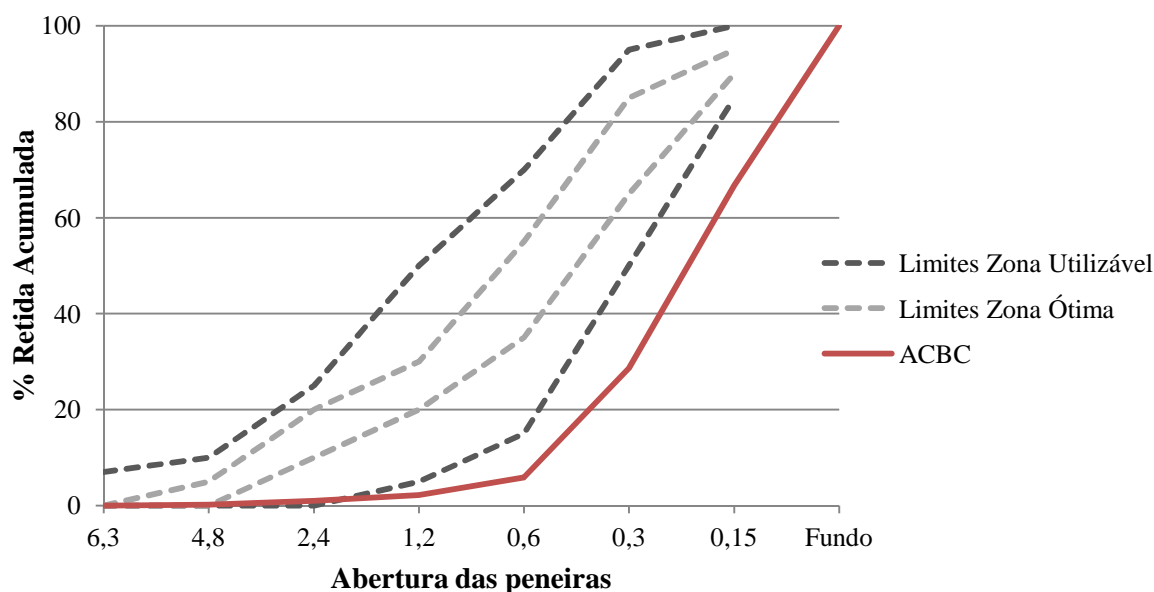
Tabela 15 – Granulometria da ACBC

Peneira (mm)	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)
6,30	0,0	0
4,75	0,2	0
2,36	0,8	1
1,18	1,2	2
0,60	3,6	6
0,30	22,8	29
0,15	38,1	67
Fundo	33,3	100
DMC⁽¹⁾	1,18mm	
MF⁽²⁾	1,04	

⁽¹⁾ Dimensão máxima característica

⁽²⁾ Módulo de finura

Figura 61 – Curva granulométrica da ACBC



A NBR 7211:2009 estabelece que quando o agregado miúdo for composto de duas ou mais origens, deve-se considerar proporcionalmente à presença de cada um deles na mistura, sendo assim, foi realizado o ensaio de granulometria da ACBC juntamente com a areia com a composição de 30% (em massa) de ACBC e 70% de areia.

Estão apresentados na Tabela 16 os valores da composição granulométrica do agregado miúdo considerando o teor (em massa) de 30% de ACBC em substituição a areia. A dimensão máxima característica foi 2,36 mm e o módulo de finura 1,95. Pelo valor apresentado do módulo de finura, a composição de 30% ACBC + 70% areia ficaram classificadas na zona utilizável inferior, como pode ser verificado na Figura 62.

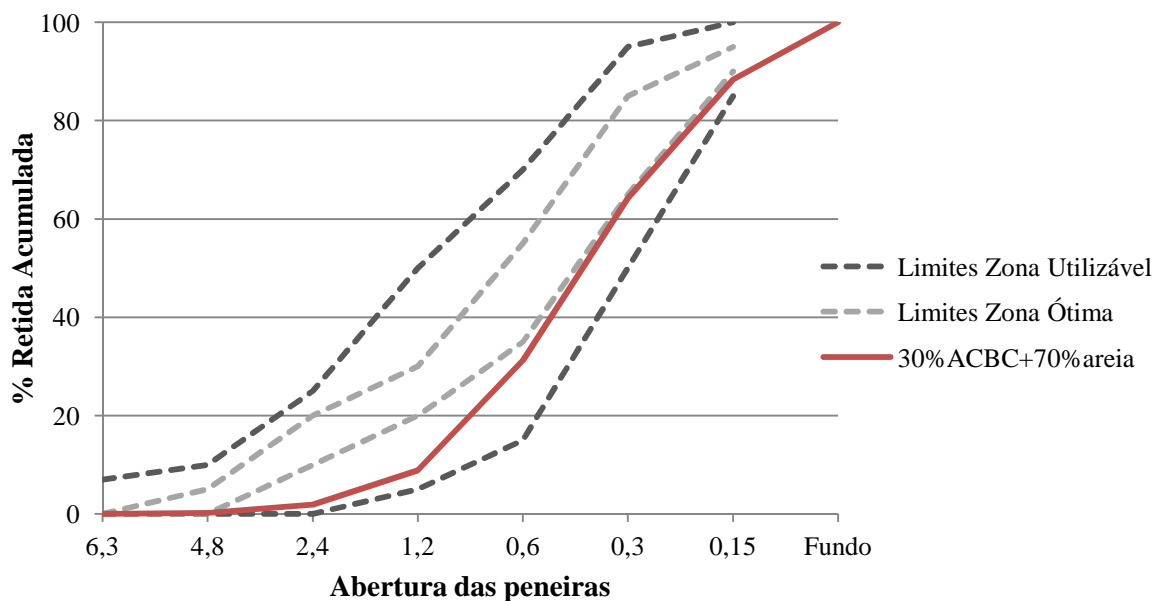
Tabela 16 – Granulometria do agregado miúdo (30% ACBC + 70% areia)

Peneira (mm)	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)
6,30	0,0	0
4,75	0,2	0
2,36	1,7	2
1,18	7,0	9
0,60	22,3	31
0,30	33,1	64
0,15	24,1	88
Fundo	11,7	100
DMC⁽¹⁾	2,36mm	
MF⁽²⁾	1,95	

⁽¹⁾ Dimensão máxima característica

⁽²⁾ Módulo de finura

Figura 62 – Curva granulométrica do agregado miúdo (30% ACBC + 70% areia)



A composição granulométrica da areia natural está apresentada na Tabela 17, a dimensão máxima característica do agregado foi de 2,36 mm e módulo de finura de 2,30.

Tabela 17 – Granulometria da areia natural

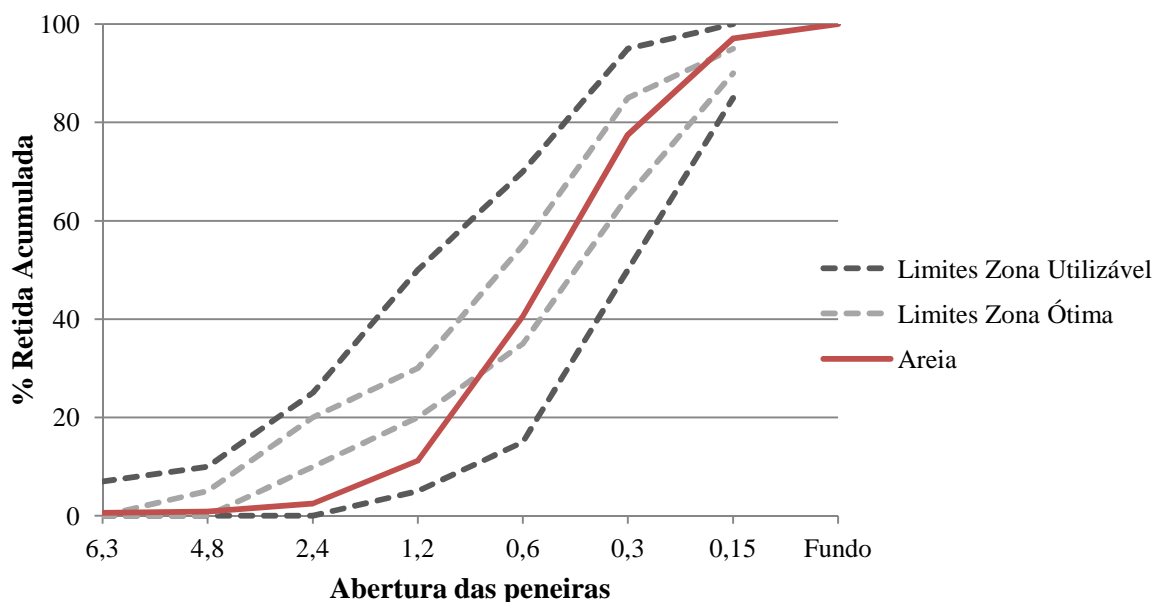
Peneira (mm)	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)
6,30	0,6	1
4,75	0,3	1
2,36	1,7	3
1,18	8,7	11
0,60	29,4	41
0,30	36,9	78
0,15	19,6	97
Fundo	2,9	100
DMC⁽¹⁾	2,36mm	
MF⁽²⁾	2,30	

⁽¹⁾ Dimensão máxima característica

⁽²⁾ Módulo de finura

A NBR 7211:2009 define que o módulo de finura na zona ótima pode variar de 2,20 a 2,90, sendo assim, areia utilizada encontra-se na zona ótima. A Figura 63 representa a curva de distribuição granulométrica da areia, pode-se notar que a mesma encontra-se em parte na zona utilizável e sua maior parte na zona ótima.

Figura 63 – Curva granulométrica da areia natural



Os resultados da caracterização química do RCC estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Composição química do RCC (em %)

Elementos	RCC
SiO ₂	58,1
CaO	14,2
Fe ₂ O ₃	8,2
Al ₂ O ₃	7,0
MgO	2,1
TiO ₂	1,9
Na ₂ O	1,1
K ₂ O	1,1
SO ₃	0,6
P ₂ O ₅	0,4
MnO	0,1
SrO	0,1
Rb ₂ O	< 0,1
Perda ao fogo	5,17

A sílica é o principal constituinte do RCC, com teor de 58%. A origem deste elemento está associada principalmente aos agregados naturais presentes no concreto e na argamassa que compõe o RCC. O óxido de cálcio (CaO), é o segundo elemento mais representativo, com teor de 14,2%, e a presença deste óxido está associada ao aglomerante (cimento, cal) presente no RCC uma vez que na região de São Carlos não se utilizava agregados de origem calcária. Foi detectada também a presença de óxido de ferro III, cerca de 8% e alumina, cerca de 7%. Durante a triagem do RCC, foi verificada a presença de aço advindo de elementos da construção

civil, fato que pode explicar a presença do óxido de ferro III (Fe_2O_3). A alumina (Al_2O_3) é um elemento presente na composição do cimento, da cerâmica vermelha e também do solo. Apesar do RCC utilizado nesta pesquisa ser proveniente de concreto e argamassa, na triagem do material foi identificado vestígios de cerâmica vermelha e solo, fato que pode explicar a presença da alumina na composição do agregado reciclado.

Ulsen, *et al*, 2010, caracterizaram alguns agregados reciclados provenientes de usinas de reciclagem do estado de São Paulo. Os resultados do ensaio da composição química para agregados graúdos reciclados de origem cinza (argamassa e concreto) foram similares aos resultados obtidos nesta pesquisa, apresentando os seguintes teores de SiO_2 , CaO e Al_2O_3 respectivamente 65%, 9% e 9%.

A composição granulométrica das amostras de RCC coletados em janeiro/2012, agosto/2012 e janeiro/2013 estão apresentadas respectivamente nas tabelas 19, 20 e 21.

Tabela 19 – Granulometria do RCC coletado em janeiro/2012

Peneira (mm)	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)
25,00	0,0	0
19,00	19,2	19
12,50	58,7	78
9,50	16,0	94
6,30	4,9	98
4,75	0,2	99
Fundo	1,1	100
DMC⁽¹⁾		25mm
MF⁽²⁾		2,12

⁽¹⁾ Dimensão máxima característica

⁽²⁾ Módulo de finura

Tabela 20 – Granulometria do RCC coletado em agosto/2012

Peneira (mm)	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)
25,00	0,0	0
19,00	5,5	5
12,50	58,3	64
9,50	21,1	85
6,30	10,8	96
4,75	0,9	97
Fundo	3,4	100
DMC⁽¹⁾		25mm
MF⁽²⁾		1,87

⁽¹⁾ Dimensão máxima característica

⁽²⁾ Módulo de finura

Tabela 21 – Granulometria do RCC coletado em janeiro/2013

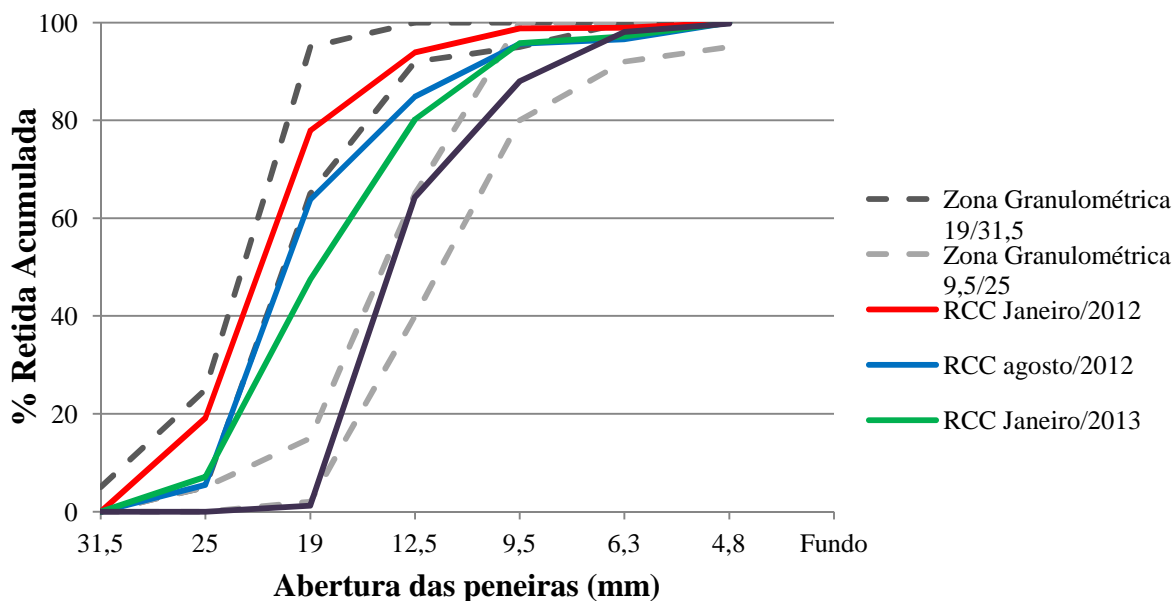
Peneira (mm)	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)
25,00	0,0	0
19,00	7,1	7
12,50	40,4	47
9,50	32,8	80
6,30	15,6	96
4,75	1,4	97
Fundo	2,8	100
DMC⁽¹⁾	25mm	
MF⁽²⁾	1,84	

⁽¹⁾ Dimensão máxima característica

⁽²⁾ Módulo de finura

Pode-se observar no gráfico representado pela Figura 64 as curvas granulométricas do RCC nas coletas realizadas em janeiro/2012, agosto/2012 e janeiro/2013. Na coleta de janeiro/2012, a curva granulométrica do agregado se enquadrou na zona granulométrica 19/31,5, nas coletas de agosto/2012 e janeiro/2013 as curvas granulométricas ficaram enquadradas entre as zonas granulométricas 19/31,5 e 9,5/25.

Figura 64 – Curva granulométrica das amostras de RCC



Devido a variabilidade apresentada nas coletas, todo o material foi peneirado com a finalidade de montar uma granulometria para o RCC utilizado na moldagem dos concretos. As quantidades de material retidas em cada peneira estão apresentadas na Tabela 22.

Tabela 22 – Quantidade de RCC em cada peneira

Peneiras	Quantidade (kg)
19 mm	35,83
12,5 mm	173,83
9,5 mm	90,15
6,3 mm	42,60
4,8 mm	4,52
fundo	18,55
Total	365,47

Para montar a granulometria do RCC foram descartados os materiais que ficaram retidos na peneira de malha de 19 mm e no fundo, conforme justificado no capítulo 6.2.1 referente a coleta e preparo do RCC.

O material da peneira de malha 19 mm corresponde a 9,8% do total de RCC coletado e o material do fundo corresponde a 5,1%, desta forma, serão descartados 14,9% de material coletado para montar o RCC de laboratório.

A composição do RCC de laboratório pode ser verificada na Tabela 23, o material apresenta dimensão máxima característica de 19 mm e módulo de finura de 1,85, se enquadrando na zona granulométrica 9,5/25 como pode ser verificado na Figura 65.

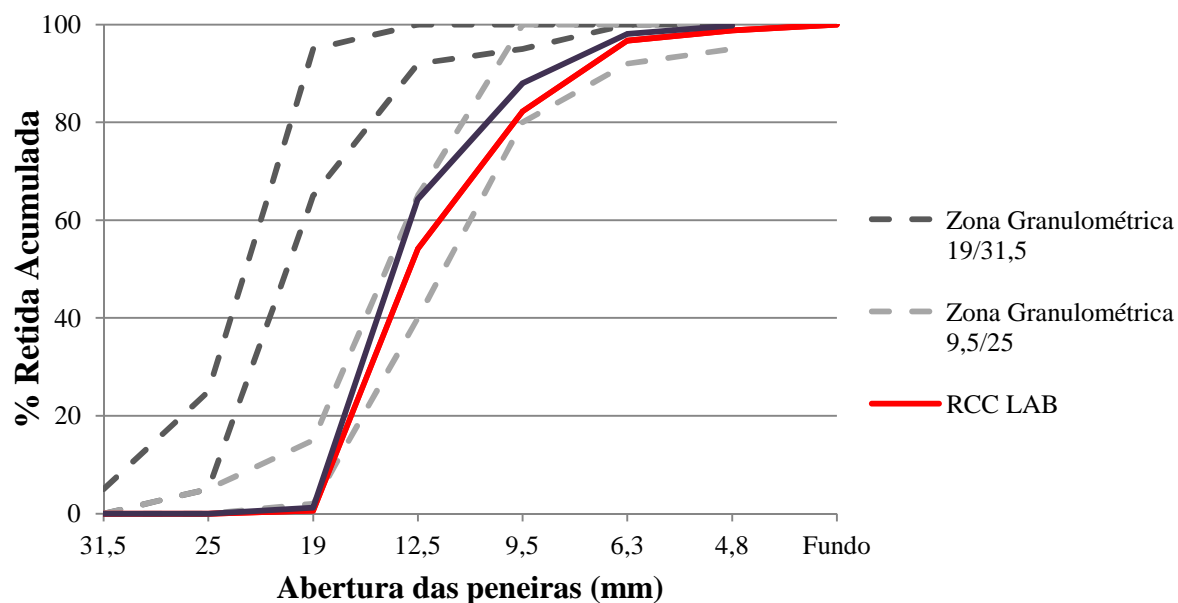
Tabela 23 – Granulometria do RCC LAB

Peneira (mm)	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)
25,00	0,6	1
19,00	53,6	54
12,50	28,1	82
9,50	14,4	97
6,30	2,1	99
4,75	1,2	100
Fundo	0,6	-
DMC⁽¹⁾	19mm	
MF⁽²⁾	1,85	

⁽¹⁾ Dimensão máxima característica

⁽²⁾ Módulo de finura

Figura 65 – Curva granulométrica do RCC LAB



A composição da brita pode ser verificada na Tabela 24, o material apresenta dimensão máxima característica de 19 mm e módulo de finura de 1,89, se enquadrando na zona granulométrica 9,5/25 como pode ser verificado na Figura 66.

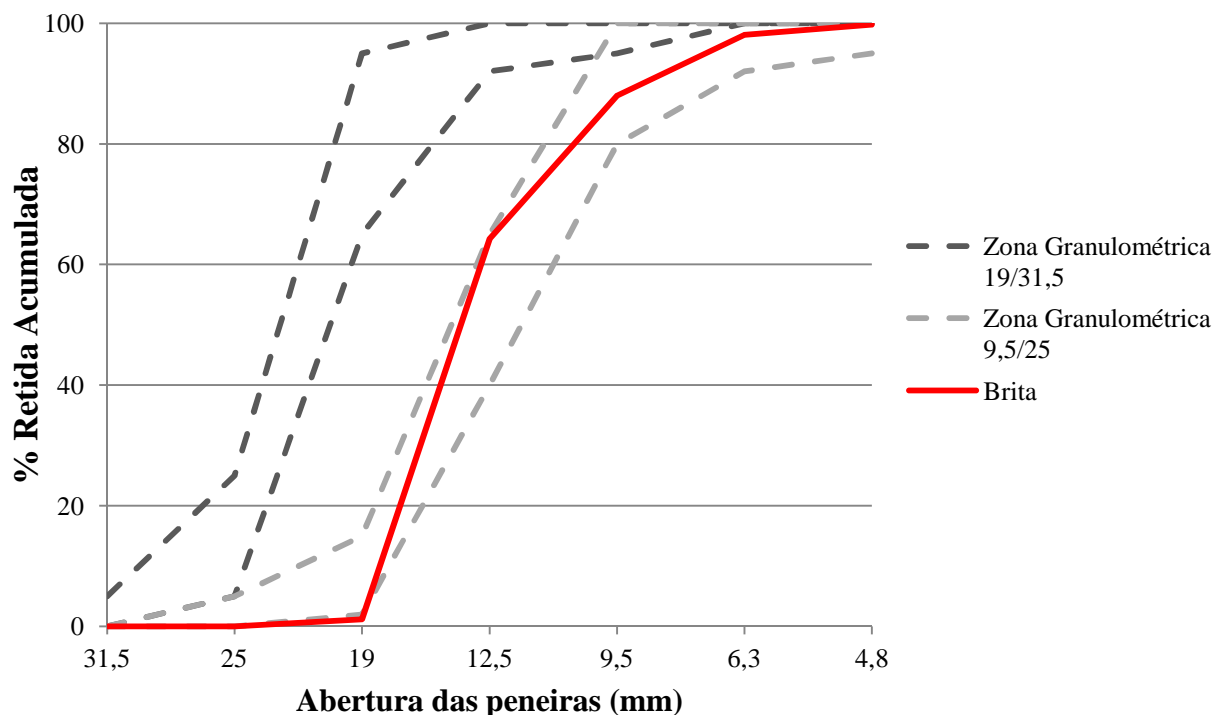
Tabela 24 – Granulometria da brita

Peneira (mm)	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)
19,00	1,2	1
12,50	63,1	64
9,50	23,7	88
6,30	10,1	98
4,75	1,7	100
Fundo	0,2	-
DMC⁽¹⁾	19mm	
MF⁽²⁾	1,89	

⁽¹⁾ Dimensão máxima característica

⁽²⁾ Módulo de finura

Figura 66 – Curva granulométrica da Brita



Podem-se verificar na Tabela 25 os resultados dos demais ensaios realizados na caracterização dos materiais.

Tabela 25- Resultados da caracterização física dos agregados

Características	Unidade	Areia	ACBC	Brita	RCC
Massa específica	g/cm ³	2,33	2,60	2,85	2,46
Massa unitária no estado seco e solto	kg/m ³	1.531,32	1.424,94	1.484,51	1.302,80
Massa unitária compactada	kg/m ³	1.639,09	1.611,35	1.642,90	1.437,47
Absorção de água	%	0,74	0,79	1,10	4,16
Material pulverulento	%	-	19,49	-	0,2

As cinzas utilizadas por Bessa (2012) apresentaram valores de massa específica de 2,65g/cm³ e massa unitária de 1,39g/cm³, como pode ser verificado na Tabela 25, esses valores são bem próximos aos valores determinados nesta pesquisa.

Os valores de absorção de água e material pulverulento das cinzas utilizadas por Almeida (2012) foram de 0,9% e 16,18% respectivamente, a ACBC utilizada nesta pesquisa apresentou absorção de água de 0,79% e teor de material pulverulento de 19,49% (Tabela 25).

Segundo as especificações da NBR 7211 (ABNT, 2009), o limite máximo aceitável de material pulverulento nos agregados miúdos utilizados na produção de concretos é de 3% para concreto submetido a desgaste superficial de 5% para concreto protegido do desgaste superficial. A ACBC utilizada neste trabalho apresentou teor de material pulverulento de 19,49%,

este elevado teor pode ter agido como *filler* nas misturas de concreto, ou seja, esta cinza pode ter provocado um efeito físico de empacotamento granulométrico. Este efeito também foi verificado por Almeida 2013.

O agregado graúdo proveniente de RCC utilizado por Leite (2001) apresentou absorção de 4,95%, massa específica de 2,51g/cm³ e massa unitária de 1,12gcm³, valores bem próximos aos obtidos nesta pesquisa (Tabela 25).

Por meio dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização da brita e do RCC, foi possível verificar que a absorção de água do RCC é aproximadamente quatro vezes superior à absorção da brita e o valor da massa específica do RCC é cerca de 13% menor que a massa específica da brita. Os agregados de RCC são mais porosos que a brita, fato que interfere diretamente na absorção de água e massa específica do material.

5.4 Propriedades dos Concretos

Neste item são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados para determinação das propriedades físicas e mecânicas dos concretos produzidos com a ACBC e o RCC.

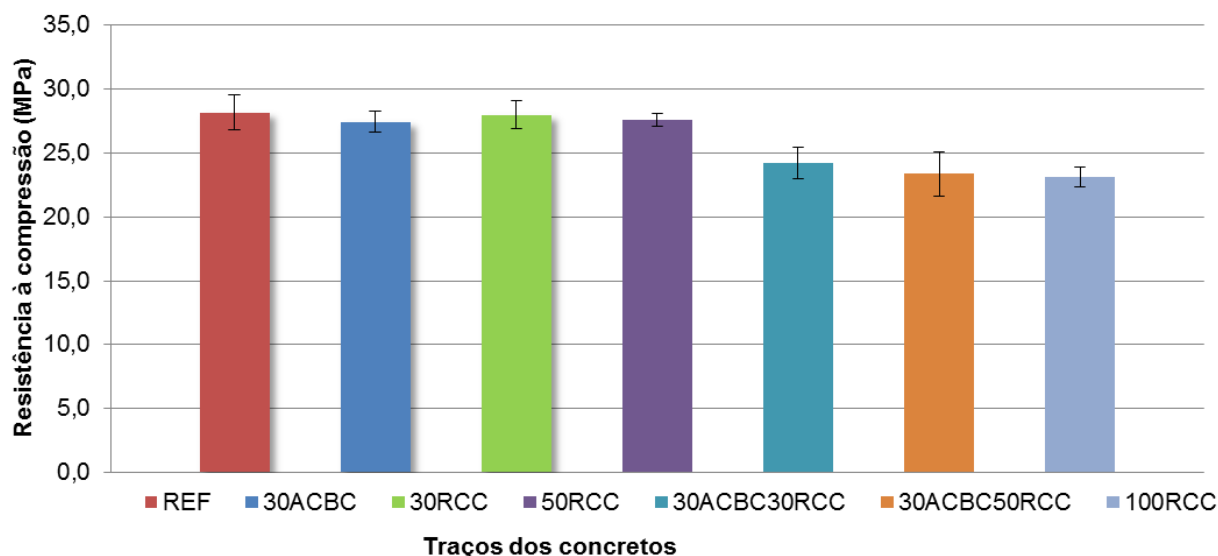
5.4.1 Resistência à compressão

Os valores do ensaio de resistência à compressão aos 7 dias dos concretos estão apresentados na Tabela 26 e no gráfico representado pela Figura 67.

Tabela 26 – Resistência à compressão aos 7 dias

Traços	Resistência à Compressão (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
REF	28,2	1,4	5
30ACBC	27,5	0,8	3
30RCC	28,0	1,1	4
50RCC	27,6	0,5	2
30ACBC30RCC	24,2	1,3	5
30ACBC50RCC	23,4	1,7	7
100RCC	23,1	0,7	3

Figura 67 – Resistência à compressão dos concretos aos 7 dias



Os concretos Referência, 30ACBC, 30RCC e 50RCC apresentaram valores médios de resistência à compressão aos 7 dias superiores a 25 MPa, como pode ser verificado na Tabela 26 e na Figura 67. Os traços 30ACBC30RCC, 30ACBC50RCC e 100RCC apresentaram valores de resistência à compressão inferiores ao do concreto referência. Considerando o valor médio da resistência dos traços 30ACBC30RCC, 30ACBC50RCC e 100RCC, houve uma redução de resistência de 14%, 17% e 18% respectivamente, em comparação ao concreto referência.

Para verificar estatisticamente se houve diferença entre as resistências médias dos traços apresentados, foi realizado o teste ANOVA (Tabela 27).

Tabela 27 – ANOVA - Resistência à compressão aos 7 dias

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	104,3055	5	20,8611	17,2384	2,62443E-06	2,7729
Dentro dos grupos	21,7827	18	1,2102			
Total	126,0882	23				significativo

No teste ANOVA, a hipótese H_0 considera que as médias apresentadas são estatisticamente equivalentes. Como o valor de F é superior ao valor de F crítico então a hipótese H_0 é rejeitada, ou seja, realmente houve diferença significativa para as resistências médias entre os traços apresentados. Sendo assim, realizou-se o teste de Tukey para verificar entre quais traços existem essa diferença. Os resultados do teste estão apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 – Resumo do Teste de Tukey para a resistência à compressão dos concretos aos 7 dias

Traços	30ACBC	30RCC	50RCC	30ACBC30RCC	30ACBC50RCC	100RCC
REF	não	não	não	sim	sim	sim
30ACBC		não	não	sim	sim	sim
30RCC			não	sim	sim	sim
50RCC				sim	sim	sim
30ACBC30RCC					não	não
30ACBC50RCC						não

Obs: não = não significativo / sim = significativo

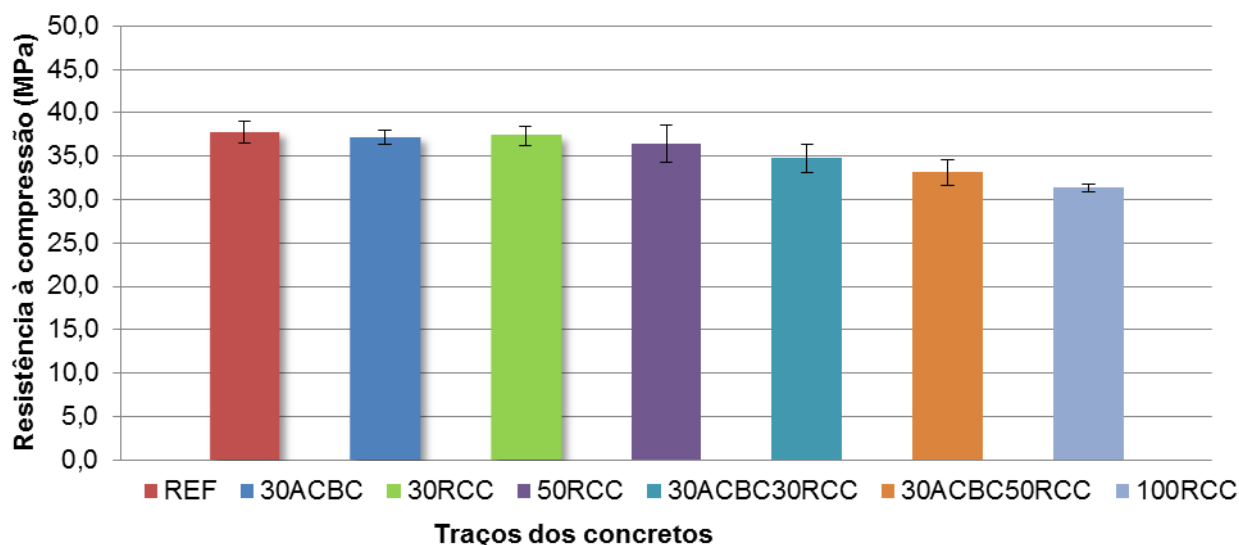
Por meio da análise realizada, pode-se afirmar que os valores médios de resistência à compressão aos 7 dias para os traços 30ACBC, 30RCC e 50RCC são estatisticamente equivalentes ao valor médio de resistência do concreto referência (Tabela 38). Para os traços 30ACBC30RCC, 30ACBA50RCC e 100RCC essas diferenças são significativamente diferentes (Tabela 28). Pode-se afirmar, através da análise estatística, que a utilização de 30% de ACBC (traço 30ACBC), de 30% de RCC (traço 30RCC) e de 50% de RCC (traço 50RCC) não interferiu no comportamento mecânico do concreto aos 7 dias, pois os resultados apresentados são estatisticamente equivalentes. Mas a substituição de 100% do agregado natural pelo RCC e o uso conjunto da ACBC e do RCC reduziu a resistência à compressão do concreto aos 7 dias de idade quando comparado com o concreto de referência.

Os valores de resistência à compressão aos 28 dias estão apresentados na Tabela 29 e no gráfico representado pela Figura 68. Todos os traços, com exceção do traço 100 RCC, apresentaram valores médios de resistência à compressão superiores à resistência de dosagem (32 MPa) aos 28 dias adotada nesta pesquisa.

Tabela 29 – Resistência à compressão aos 28 dias

Traços	Resistência à Compressão (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
REF	37,8	1,3	3
30ACBC	37,2	1,8	5
30RCC	37,4	0,6	2
50RCC	36,4	2,2	6
30ACBC30RCC	34,8	1,6	5
30ACBC50RCC	33,2	1,5	4
100RCC	31,4	0,4	1

Figura 68 – Resistência à compressão dos concretos aos 28 dias



A resistência à compressão dos concretos aos 28 dias (Figura 68) seguiu o mesmo comportamento observado aos 7 dias (Figura 67). Os traços 30ACBC30RCC, 30ACBC50RCC e 100RCC apresentaram valores de resistência à compressão inferiores ao concreto de referência. Considerando o valor médio da resistência dos traços 30ACBC30RCC, 30ACBC50RCC e 100RCC, houve uma redução de resistência de 8%, 12% e 17% respectivamente, em comparação ao concreto referência.

A análise da variância da resistência à compressão dos concretos foi realizada pelo método ANOVA (Tabela 30).

Tabela 30 – ANOVA - Resistência à compressão aos 28 dias

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	142,6647	6	23,7775	11,2471	1,21893E-05	2,5727
Dentro dos grupos	44,3959	21	2,1141			
Total	187,0607	27				significativo

Como o valor de F é maior que F crítico (Tabela 30), pode-se afirmar que houve diferença significativa entre os valores médios de resistência à compressão aos 28 dias dos traços analisados. Para verificar quais traços apresentaram essa diferença, foi aplicado o teste de Tukey.

Através do teste de Tukey, cujo resumo está apresentado na Tabela 31, e pode-se afirmar que os traços 30ACBC, 30RCC e 50RCC apresentaram valores de resistência à compressão aos 28 dias estatisticamente similares ao do concreto referência. Da mesma forma que para a idade de 7 dias, a utilização de 30% de ACBC conjuntamente com 30% e 50% de RCC (traços 30ACBC30RCC e 30ACBC50RCC) e a substituição de 100% do agregado natural

pelos RCC (traço 100RCC) resultaram na redução da resistência à compressão do concreto aos 28 dias de idade quando comparado com o concreto referência.

Tabela 31 – Resumo do Teste de Tukey para a resistência à compressão dos concretos aos 28 dias

Traços	30ACBC	30RCC	50RCC	30ACBC30RCC	30ACBC50RCC	100RCC
REF	não	não	não	sim	sim	sim
30ACBC		não	não	não	sim	sim
30RCC			não	sim	sim	sim
50RCC				não	sim	sim
30ACBC30RCC					não	sim
30ACBC50RCC						não

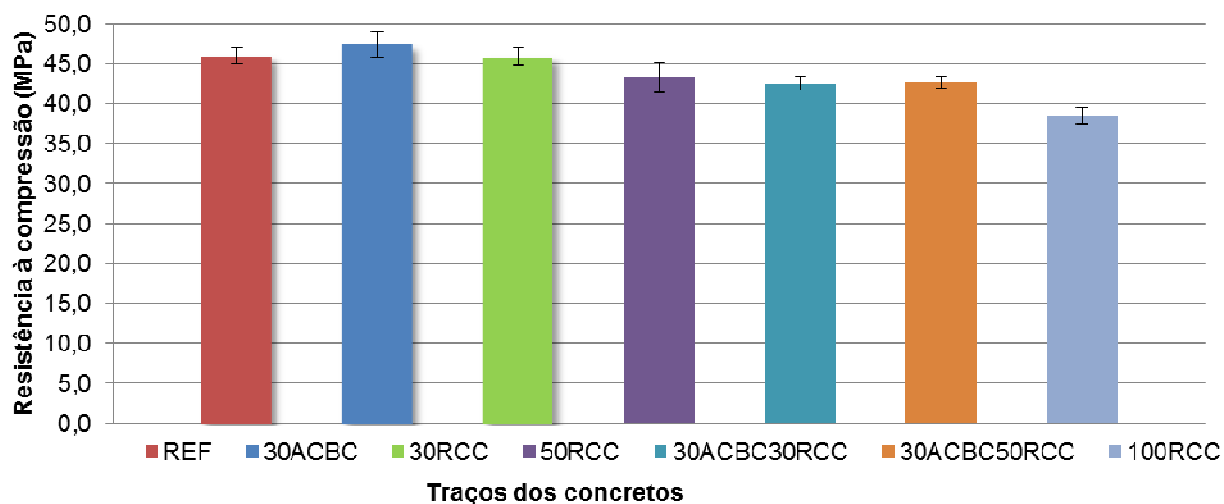
Obs: não = não significativo / sim = significativo

Os valores do ensaio de resistência à compressão dos concretos aos 91 dias estão apresentados na Tabela 32 e no gráfico representado pela Figura 69. Todos os traços, com exceção do traço 100RCC, apresentaram valores de resistência média aos 91 dias superiores a 40 MPa.

Tabela 32 – Resistência à compressão aos 91 dias

Traços	Resistência à Compressão (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
REF	46,0	1,0	2
30ACBC	47,4	1,5	3
30RCC	45,9	1,1	2
50RCC	43,2	1,8	4
30ACBC30RCC	42,5	0,8	2
30ACBC50RCC	42,7	0,7	2
100RCC	38,5	1,1	3

Figura 69 – Resistência à compressão dos concretos aos 91 dias



Foi realizada a análise de variância (Tabela 33) para verificar se houve diferença entre os valores médios de resistência para os traços.

Tabela 33 – ANOVA - Resistência à compressão aos 91 dias

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	211,1851	6	35,1975	23,8868	3,9533E-08	2,5990
Dentro dos grupos	29,4702	20	1,4735			
Total	240,6553	26				significativo

Como o valor de F é maior que F crítico (Tabela 33), pode-se afirmar que existem diferenças significativas entre as médias das amostras. Para verificar quais traços apresentaram essa diferença, foi aplicado o teste de Tukey, cujo resumo está apresentado na Tabela 34.

Tabela 34 – Resumo do Teste de Tukey para a resistência à compressão dos concretos aos 91 dias

Traços	30ACBC	30RCC	50RCC	30ACBC30RCC	30ACBC50RCC	100RCC
REF	não	não	não	sim	sim	sim
30ACBC		não	sim	sim	sim	sim
30RCC			sim	sim	sim	sim
50RCC				não	não	sim
30ACBC30RCC					não	sim
30ACBC50RCC						sim

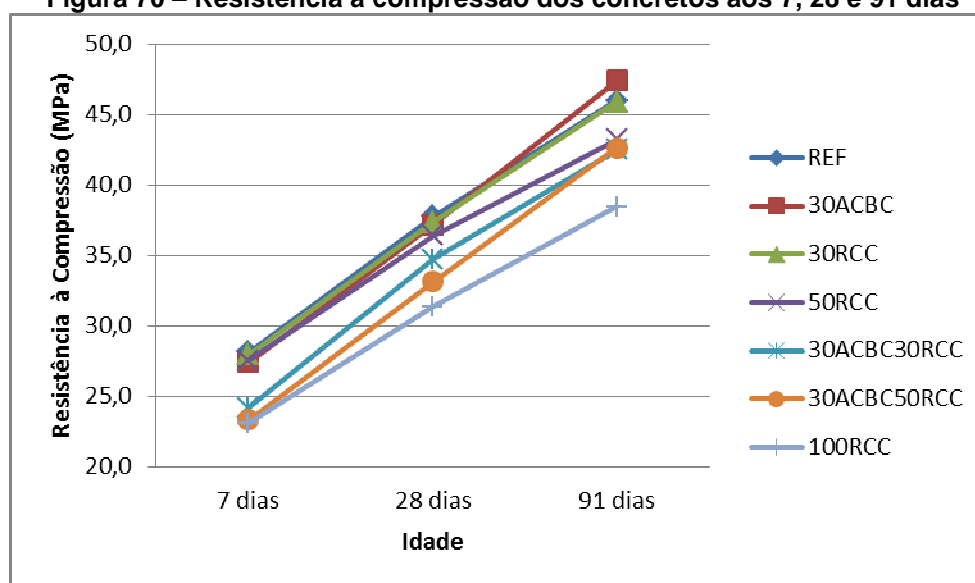
Obs: não = não significativo / sim = significativo

Da mesma maneira que para as idades de 7 e 28 dias, foi possível verificar que não houve diferença significativa das médias de resistência à compressão aos 91 dias dos traços 30ACBC, 30RCC e 50RCC comparando com o traço referência. Para os traços 30ACBC30RCC, 30ACBC50RCC e 100RCC, o teste de Tukey identificou diferenças significativas, ou seja, os concretos apresentaram uma redução de resistência. Considerando o valor médio das resistências para esses traços, a redução foi de 8%, 7% e 16% respectivamente para os traços 30ACBC30RCC, 30ACBC50RCC e 100RCC.

Para todas as idades analisadas, pode-se afirmar, com 95% de confiabilidade, que os traços REF, 30ACBC, 30RCC e 50RCC apresentaram valores de resistência à compressão estatisticamente equivalentes. Os traços 30ACBC30RCC e 30ACBC50RCC apresentaram um comportamento similar entre si para todas as idades analisadas. A evolução da resistência à compressão dos concretos pode ser verificada no gráfico representado pela Figura 70 e na Tabela 35.

Tabela 35 – Resistência à compressão dos concretos aos 7, 28 e 91 dias

Traços	Resistência à compressão (MPa)		
	7 dias	28 dias	91 dias
REF	28,2	37,8	46,0
30ACBC	27,5	37,2	47,4
30RCC	28,0	37,4	45,9
50RCC	27,6	36,4	43,2
30ACBC30RCC	24,2	34,8	42,5
30ACBC50RCC	23,4	33,2	42,7
100RCC	23,1	31,4	38,5

Figura 70 – Resistência à compressão dos concretos aos 7, 28 e 91 dias

Embora a análise estatística indique que o concreto produzido pelo traço 30ACBC seja similar ao concreto de referência, na idade de 91 dias, a resistência média do concreto 30ACBC superou a resistência média do concreto de referência (Figura 70).

Almeida (2013) concluiu em sua pesquisa que a substituição de 30% de areia pela ACBC aumentou em cerca de 7% a resistência à compressão do concreto aos 28 dias quando comparado ao concreto referência.

Sales e Lima (2010) verificaram que a substituição de 30% de areia pela ACBC provocou um aumento de cerca de 17% na resistência à compressão do concreto quando comparado com o concreto referência.

O resultado obtido pela substituição de 30% e de 50% de brita pelo RCC (traços 30RCC e 50RCC) foi satisfatório, uma vez que a resistência à compressão aos 7, 28 e 91 dias são similares à resistência do concreto referência.

Vieira *et al.* (2003) verificou que a substituição de 50% de agregados naturais por agregados reciclados de RCC não afetou a resistência à compressão do concreto.

Leite (2001) concluiu que os concretos produzidos com agregados reciclados de RCC e fator $a/c > 0,6$ apresentaram um desempenho melhor ou semelhante ao concreto convencional.

Por meio dos resultados obtidos através da análise estatística, pode-se afirmar que a substituição de 30% de areia natural pela ACBC (traço 30ACBC), 30% da brita pelo RCC (traço 30RCC) e 50% da brita pelo RCC (traço 50RCC) não prejudicou a resistência à compressão do concreto.

A utilização conjunta da ACBC e do RCC provocou uma redução na resistência à compressão dos concretos para todas as idades analisadas. Considerando a média dos valores obtidos nos ensaios, para a idade de 7 dias foi notada a maior redução, sendo de 14% para o traço 30ACBC30RCC e 17% para o traço 30ACBC50RCC, mas, essa redução foi atenuada para as idades mais avançadas. Na idade de 91 dias, a redução de resistência foi de apenas 8% para o traço 30ACBC30RCC e de 7% para o traço 30ACBC50RCC.

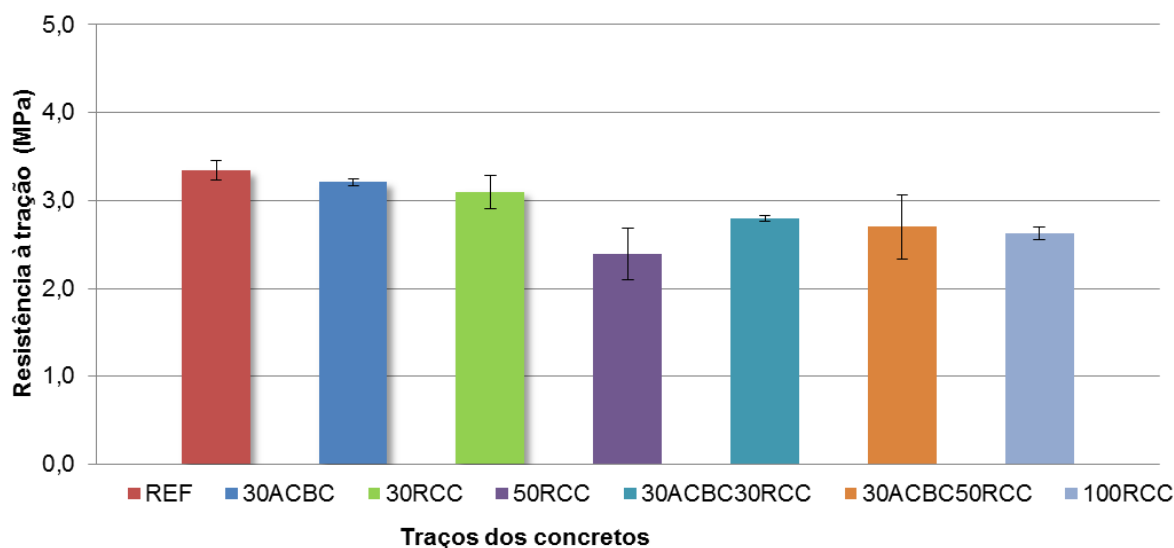
5.4.2 Resistência à tração

Os valores do ensaio de resistência à tração por compressão diametral dos concretos aos 28 dias estão apresentados na Tabela 36 e no gráfico representado pela Figura 71.

Tabela 36 – Resistência à tração aos 28 dias

Traços	Resistência à Tração (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
REF	3,3	0,1	3
30ACBC	3,2	0,0	1
30RCC	3,1	0,2	6
50RCC	2,4	0,3	12
30ACBC30RCC	2,8	0,0	1
30ACBC50RCC	2,7	0,4	14
100RCC	2,6	0,1	3

Figura 71 – Resistência à tração aos 28 dias



Os valores obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral indicaram uma relação de 9% sobre o valor da resistência à compressão para os traços REF e 30ACBC, 8% para os traços 30RCC, 30ACBC30RCC, 30ACBC50RCC e 100RCC e 7% para o traço 50RCC. Segundo Mehta e Monteiro (2008), para concretos de média resistência a relação entre resistência à tração e a resistência à compressão é de 8 a 9%, ou seja, com exceção do traço 50RCC, os demais traços apresentaram as mesmas relações de resistência à compressão e tração indicadas na bibliografia.

Como pode ser verificado no gráfico representado pela Figura 71 e na Tabela 36, os traços REF, 30ACBC e 30RCC apresentaram valores médios de resistência à tração superiores a 3MPa. Os traços 50RCC, 30ACBC30RCC, 30ACBC50RCC e 100RCC apresentaram valores médios de resistência à tração com redução de 27%, 15%, 18% e 21% em relação ao concreto referência.

Foi realizada a análise de variância (Tabela 37) para verificar se houve diferença entre os valores médios de resistência para os traços.

Tabela 37 – ANOVA - Resistência à tração

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,4179	6	0,2363	5,8932	0,0173	3,8660
Dentro dos grupos	0,2807	7	0,0401			
Total	1,6986	13				significativo

Como o valor de F é maior que F crítico (Tabela 37), pode-se afirmar que existem diferenças significativas entre as médias das amostras. Para verificar quais traços apresentaram essa diferença, foi aplicado o teste de Tukey, cujo resumo está apresentado na Tabela 38.

Tabela 38 – Resumo do Teste de Tukey para a resistência à tração dos concretos

Traços	30ACBC	30RCC	50RCC	30ACBC30RCC	30ACBC50RCC	100RCC
REF	não	não	não	não	não	sim
30ACBC		não	não	sim	não	sim
30RCC			não	não	não	não
50RCC				não	não	não
30ACBC30RCC					não	não
30ACBC50RCC						não

Obs: não = não significativo / sim = significativo

Apesar do valor da resistência à tração do traço 30ACBC50RCC estar entre os valores de resistência dos traços 30ACBC30RCC e 100RCC, o teste de Tukey indicou uma diferença significativa entre as médias dos valores apenas para os traços 30ACBC30RCC e 100RCC. Isso pode ser explicado devido ao grande coeficiente de variação apresentado pelo traço 30ACBC50RCC (14%).

Ao visualizar o gráfico, é notada uma diferença significativa entre os valores de resistência à tração do concreto de referência comparando com o concreto 50RCC, mas, devido ao alto coeficiente de variação apresentado pelo traço 50RCC (12%), o teste de Tukey não apontou diferença significativa entre os valores médios de resistência à tração.

O teste de Tukey indicou que houve diferença significativa entre os valores médios de resistência à tração apenas para o concreto 100RCC, quando comparado com o traço de referência.

Ao analisar o gráfico representado pela Figura 71, é notada uma queda de resistência à tração principalmente nos traços 30RCC, 50RCC e 100RCC, sendo assim, pode-se inferir que o agregado reciclado de RCC contribuiu com a diminuição da resistência à tração do concreto. Essa redução de resistência pode ser explicada devido a maior porosidade da matriz cimentícia para concretos confeccionados com o agregado reciclado de RCC.

Leite (2001) também observou uma redução da resistência à tração para os concretos confeccionados com agregados graúdos reciclados. A autora afirma que essa diminuição de resistência foi ocasionada pela maior porosidade dos concretos produzidos com agregados reciclados.

O traço produzido com a ACBC (30ACBC) apresentou resistência à tração similar ao traço de referência, ou seja, a ACBC não interferiu nesta propriedade.

Nos estudos realizados por Bessa (2012) e Almeida (2013), os concretos produzidos com 30% de ACBC também apresentaram valores de resistência à tração similares ao concreto de referência.

De maneira geral, o incremento da resistência à tração para os diversos traços acompanhou o crescimento da resistência à compressão observada para os traços estudados. Salienta-se que os traços 30ACBC, 30RCC e 50RCC apresentaram valores de propriedades mecânicas equivalentes ao concreto referência, sendo que para os demais traços houve decréscimo tanto para a resistência à compressão quanto à resistência à tração. O traço 50RCC foi o único que não seguiu esse comportamento observado, sendo que isso pode ser atribuído à problemas durante o ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

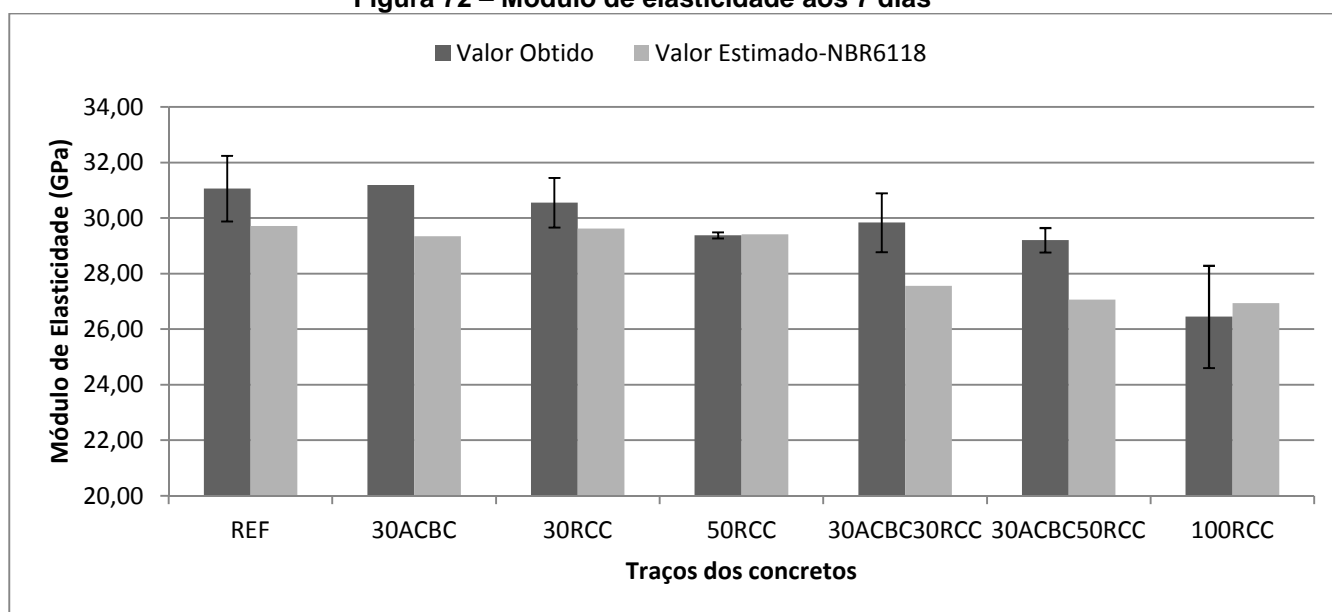
5.4.3 Módulo de elasticidade

Os valores obtidos no ensaio de módulo de elasticidade para os concretos aos 7 dias de idade estão apresentados na Tabela 39 e no gráfico representado pela Figura 72.

Tabela 39 – Módulo de Elasticidade aos 7 dias

Traços	Módulo de Elasticidade (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Coefficiente de Variação (%)
REF	31,1	1,2	4
30ACBC	31,2	0,0	0
30RCC	30,6	0,9	3
50RCC	29,4	0,1	0
30ACBC30RCC	29,8	1,1	4
30ACBC50RCC	29,2	0,4	2
100RCC	26,5	1,8	7

Figura 72 – Módulo de elasticidade aos 7 dias



Na Figura 72 pode-se verificar os valores de módulo de elasticidade obtidos nos ensaios para cada traço em comparação com o valor estimado de acordo com a NBR 6118. O módulo de elasticidade estimado pela NBR6118 é determinado pela seguinte equação:

$$E_{ci} = 5600\sqrt{fck}$$

Equação 15

Na qual:

E_{ci} = módulo de elasticidade (MPa)

fck = resistência característica do concreto (MPa)

Com exceção do traço 100RCC, todos os traços apresentaram valores médios de módulo de elasticidade superiores ao valor estimado pela norma.

Foi realizada a análise de variância (Tabela 40) para verificar se houve diferença significativa entre os valores médios de módulo de elasticidade para os traços.

Tabela 40 – ANOVA - Módulo de Elasticidade aos 7 dias

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	31,4773	6	5,2462	5,3248	0,0226	3,8660
Dentro dos grupos	6,8967	7	0,9852			
Total	38,3740	13				significativo

Como o valor de F é maior que F crítico (Tabela 40), pode-se afirmar que existem diferenças significativas entre as médias das amostras. Para verificar quais traços apresentaram essa diferença, foi aplicado o teste de Tukey, cujo resumo está apresentado na Tabela 41

Tabela 41 – Resumo do Teste de Tukey para módulo de elasticidade dos concretos aos 7 dias

Traços	30ACBC	30RCC	50RCC	30ACBC30RCC	30ACBC50RCC	100RCC
REF	não	não	não	não	não	não
30ACBC		não	sim	não	não	não
30RCC			não	não	não	não
50RCC				não	não	não
30ACBC30RCC					não	não
30ACBC50RCC						não

Obs: não = não significativo / sim = significativo

O teste de tukey indicou que não houve diferença significativa entre os valores de módulo de elasticidade obtidos para todos os traços quando comparado com o concreto de referência. Os únicos traços que apresentaram diferença significativa entre as médias foram os traços 30ACBC e 50RCC, essa diferença foi indicada pelo teste devido ao baixo coeficiente de variação desses traços (0%). Ao visualizar o gráfico, é notada uma diferença significativa entre os valores

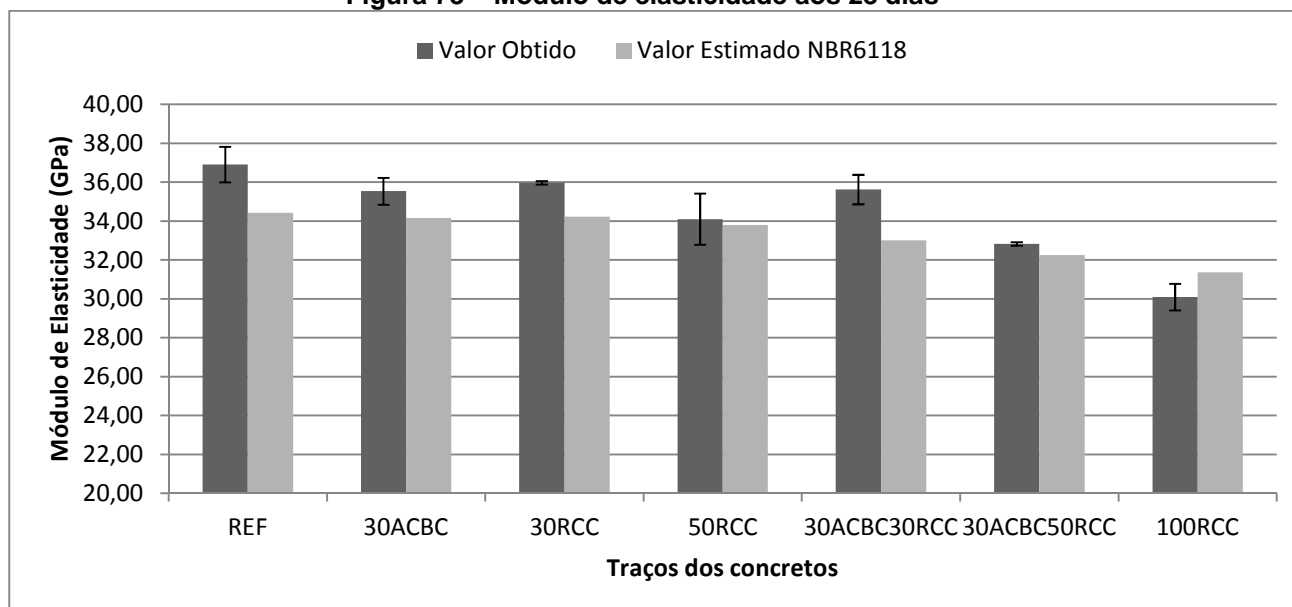
de módulo do traço 100RCC quando comparado com os outros traços, mas, devido ao alto coeficiente de variação apresentado pelo traço 100RCC (7%), o teste T não apontou diferença significativa entre os valores médios do módulo de elasticidade.

Os valores obtidos no ensaio de módulo de elasticidade para os concretos aos 28 dias de idade estão apresentados na Tabela 42 e no gráfico representado pela Figura 73.

Tabela 42 – Módulo de Elasticidade aos 28 dias

Traços	Módulo de Elasticidade (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Coefficiente de Variação (%)
REF	36,9	0,9	2
30ACBC	35,5	0,7	2
30RCC	36,0	0,1	0
50RCC	34,1	1,3	4
30ACBC30RCC	35,6	0,8	2
30ACBC50RCC	32,8	0,1	0
100RCC	30,1	0,7	2

Figura 73 – Módulo de elasticidade aos 28 dias



Da mesma maneira que para a idade de 7 dias, todos os traços, com exceção do traço 100RCC, apresentaram valores médios de módulo de elasticidade superiores ao valor estimado pela norma.

A análise de variância também foi realizada (Tabela 43) para verificar se houve diferença significativa entre os valores médios de módulo de elasticidade para os traços.

Tabela 43 – ANOVA - Módulo de Elasticidade aos 28 dias

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítica
Entre grupos	65,2463	6	10,8744	18,6075	0,0006	3,8660
Dentro dos grupos	4,0909	7	0,5844			
Total	69,3371	13				significativo

A análise de variância indicou que houve diferença significativa entre as médias das amostras (Tabela 43). Foi aplicado o teste de Tukey para verificar quais traços apresentaram essa diferença (Tabela 44).

Tabela 44 – Resumo do Teste de Tukey para módulo de elasticidade dos concretos aos 28 dias

Traços	30ACBC	30RCC	50RCC	30ACBC30RCC	30ACBC50RCC	100RCC
REF	não	não	não	não	não	sim
30ACBC		não	não	não	não	sim
30RCC			não	não	sim	não
50RCC				não	não	não
30ACBC30RCC					não	sim
30ACBC50RCC						não

Obs: não = não significativo / sim = significativo

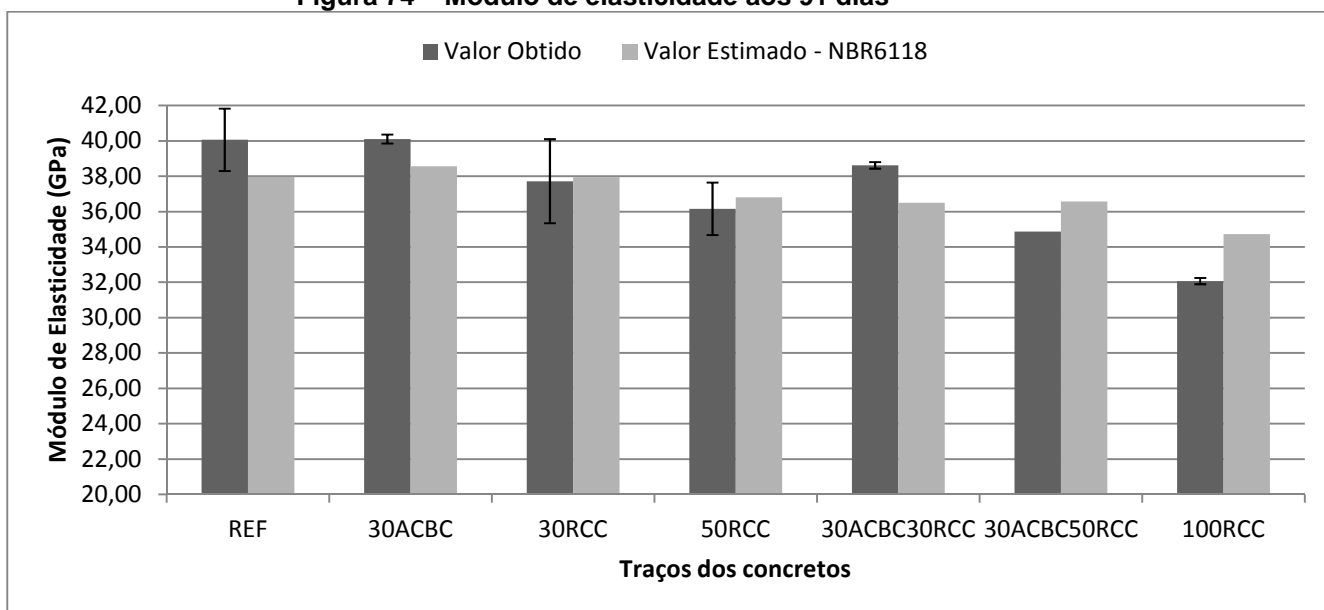
Através do teste de Tukey, foi possível verificar que, quando comparado com o concreto de referência, houve diferença significativa entre os valores médios de módulo de elasticidade apenas para o traço 100RCC. Essa diferença também ocorre entre os traços, 30ACBC x 100RCC, 30RCC x 30ACBC50RCC e 30ACBC30RCC x 100RCC. Sendo assim, pode-se concluir, com 95% de confiabilidade, que a substituição total da brita pelo RCC prejudicou o desempenho do concreto quanto ao módulo de elasticidade.

Os valores obtidos no ensaio de módulo de elasticidade para os concretos aos 91 dias de idade estão apresentados na Tabela 45 e no gráfico representado pela Figura 74

Tabela 45 – Módulo de Elasticidade aos 91 dias

Traços	Módulo de Elasticidade (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Coefficiente de Variação (%)
REF	40,1	1,8	4
30ACBC	40,1	0,3	1
30RCC	37,7	2,4	6
50RCC	36,2	1,5	4
30ACBC30RCC	38,6	0,2	0
30ACBC50RCC	34,9	0,0	0
100RCC	32,1	0,2	1

Figura 74 – Módulo de elasticidade aos 91 dias



No gráfico representado pela Figura 74, é possível verificar que os traços 30RCC, 50RCC, 30ACBC50RCC e 100RCC apresentaram valores médios de módulo de elasticidade inferiores aos valores estimados pela NBR 6118.

A análise de variância também foi realizada (Tabela 46) para verificar se houve diferença significativa entre os valores médios de módulo de elasticidade para os traços.

Tabela 46 – ANOVA - Módulo de Elasticidade aos 91 dias

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	103,2639	6	17,2106	10,8490	0,0030	3,8660
Dentro dos grupos	11,1047	7	1,5864			
Total	114,3685	13				Significativo

A análise de variância indicou que houve diferença significativa entre as médias das amostras (Tabela 46). Foi aplicado o teste de Tukey para verificar quais traços apresentaram essa diferença (Tabela 47).

Tabela 47 – Resumo do Teste de Tukey para módulo de elasticidade dos concretos aos 91 dias

Traços	30ACBC	30RCC	50RCC	30ACBC30RCC	30ACBC50RCC	100RCC
REF	não	não	não	não	não	não
30ACBC		não	não	sim	sim	sim
30RCC			não	não	não	não
50RCC				não	não	não
30ACBC30RCC					sim	sim
30ACBC50RCC						sim

Obs: não = não significativo / sim = significativo

O teste de Tukey indicou que houve diferença significativa entre os traços 30ACBC e 30ACBC30RCC, 30ACBC e 30ACBC50RCC, 30ACBC e 100RCC, 30ACBC30RCC e 30ACBC50RCC, 30ACBC30RCC e 100RCC e 30ACBC50RCC e 100RCC.

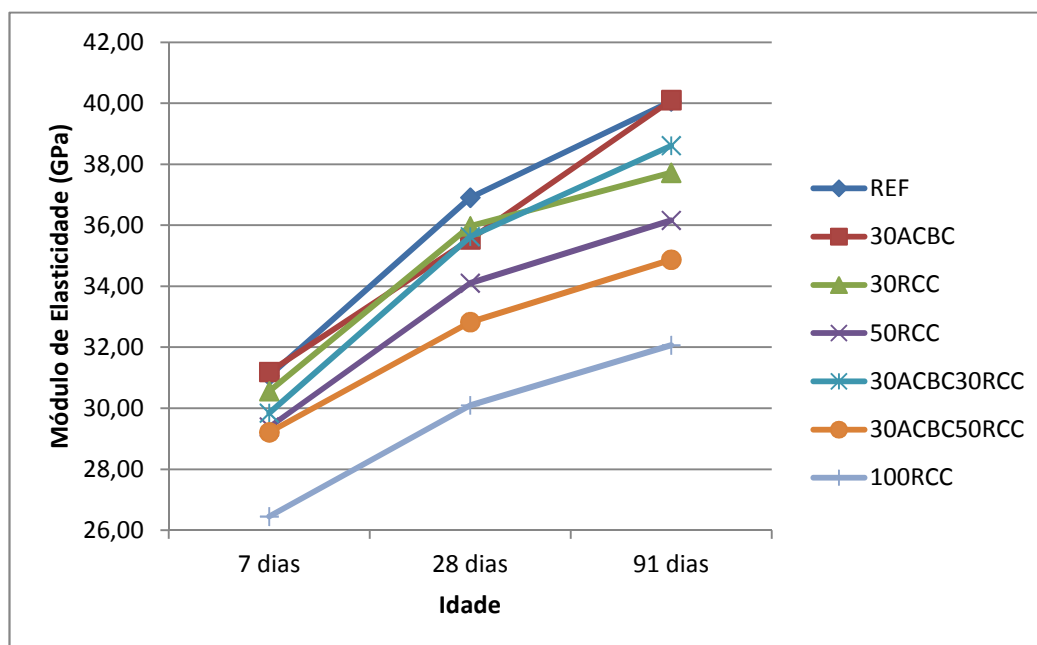
Por meio dos resultados obtidos no ensaio para determinação do módulo de elasticidade do concreto, observou-se um menor valor de módulo para os traços produzidos com o RCC, especialmente para o traço 100RCC que apresentou módulo de elasticidade inferior ao valor previsto pela NBR 6118 para todas as idades analisadas.

Os resultados obtidos no ensaio de módulo de elasticidade para todas as idades dos concretos podem ser verificados na Tabela 48 e no gráfico representado pela Figura 75.

Tabela 48 – Módulo de Elasticidade dos concretos aos 7, 28 e 91 dias

Traços	Módulo de Elasticidade (GPa)		
	7 dias	28 dias	91 dias
REF	31,1	36,9	40,1
30ACBC	31,2	35,5	40,1
30RCC	30,6	36,0	37,7
50RCC	29,4	34,1	36,2
30ACBC30RCC	29,8	35,6	38,6
30ACBC50RCC	29,2	32,8	34,9
100RCC	26,5	30,1	32,1

Figura 75– Módulo de Elasticidade dos concretos aos 7, 28 e 91 dias



A porosidade do agregado graúdo é uma das principais características que afetam o módulo de elasticidade do concreto, pois, quanto mais poroso o agregado, menor sua rigidez e também menor a capacidade do agregado restringir a deformação da matriz. Outra característica

importante refere-se à densidade, geralmente agregados densos possuem um alto módulo de elasticidade (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

O RCC apresenta maior porosidade e menor densidade quando comparado com a brita basáltica, fato que explica o menor módulo de elasticidade obtido para os traços onde a brita foi substituída parcialmente ou totalmente pelo RCC.

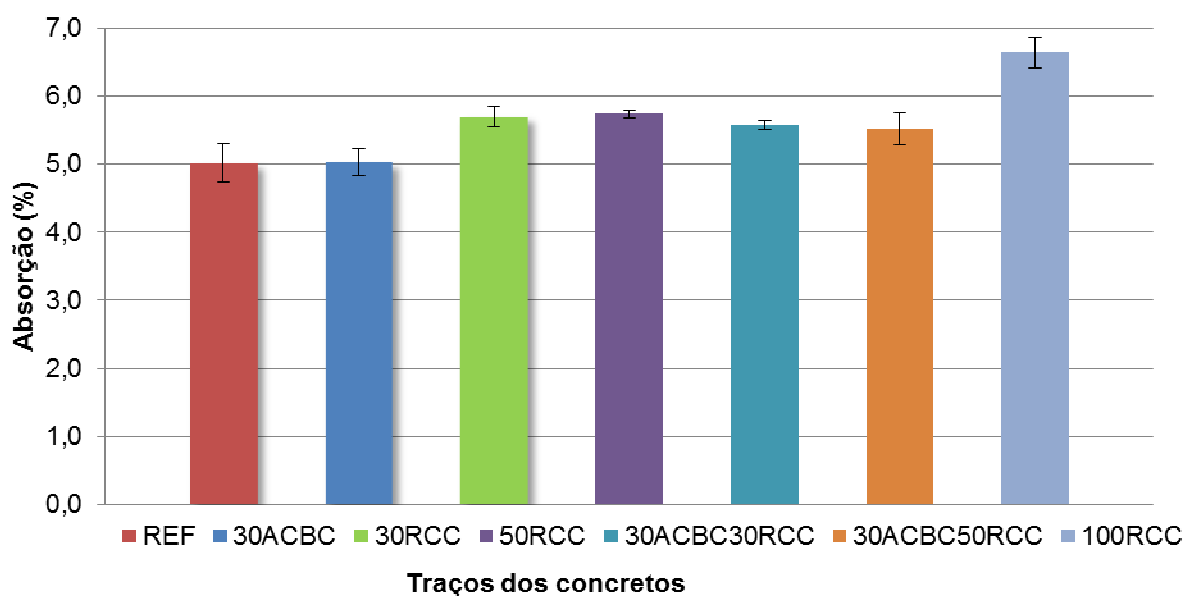
5.4.4 Absorção

Os resultados obtidos no ensaio de absorção estão apresentados na Tabela 49 e no gráfico representado pela Figura 76.

Tabela 49 – Resultados do ensaio de absorção dos concretos

Traços	Absorção (%)	Desvio Padrão (%)	Coefficiente de Variação (%)
REF	5,0	0,3	6
30ACBC	5,0	0,2	4
30RCC	5,7	0,1	3
50RCC	5,7	0,1	1
30ACBC30RCC	5,6	0,1	1
30ACBC50RCC	5,5	0,2	4
100RCC	6,7	0,2	3

Figura 76 – Resultados do ensaio de absorção dos concretos



Os concretos REF e 30ACBC apresentaram resultados médios de absorção similares (Tabela 49 e Figura 76). Os traços com a incorporação de RCC apresentaram absorção superior ao concreto de referência. Apesar da pequena diferença dos resultados médios de absorção entre os traços 30RCC x 30ACBC30RCC e 50RCC x 30ACBC50RCC, pode-se observar que os traços com adição conjunta de ACBC e RCC apresentaram valores médios de absorção inferiores aos traços onde foi substituído apenas o RCC, e desta forma, pode-se inferir que a cinza preencheu os poros do RCC e conseqüentemente, reduziu a absorção dos concretos.

A análise de variância também foi realizada (Tabela 50) para verificar se houve diferença significativa entre os valores médios de absorção para os traços.

Tabela 50 – ANOVA - Absorção dos concretos

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	5,4200	6	0,9033	24,8567	0,0000	2,8477
Dentro dos grupos	0,5088	14	0,0363			
Total	5,9288	20				significativo

A análise de variância indicou que houve diferença significativa entre as médias das amostras (Tabela 50). Foi aplicado o teste de Tukey para verificar quais traços apresentaram essa diferença. (Tabela 51).

Tabela 51 – Resumo do Teste de Tukey para a absorção dos concretos

Traços	30ACBC	30RCC	50RCC	30ACBC30RCC	30ACBC50RCC	100RCC
REF	não	sim	sim	não	não	sim
30ACBC		sim	sim	sim	sim	sim
30RCC			não	não	não	sim
50RCC				sim	não	sim
30ACBC30RCC					não	sim
30ACBC50RCC						sim

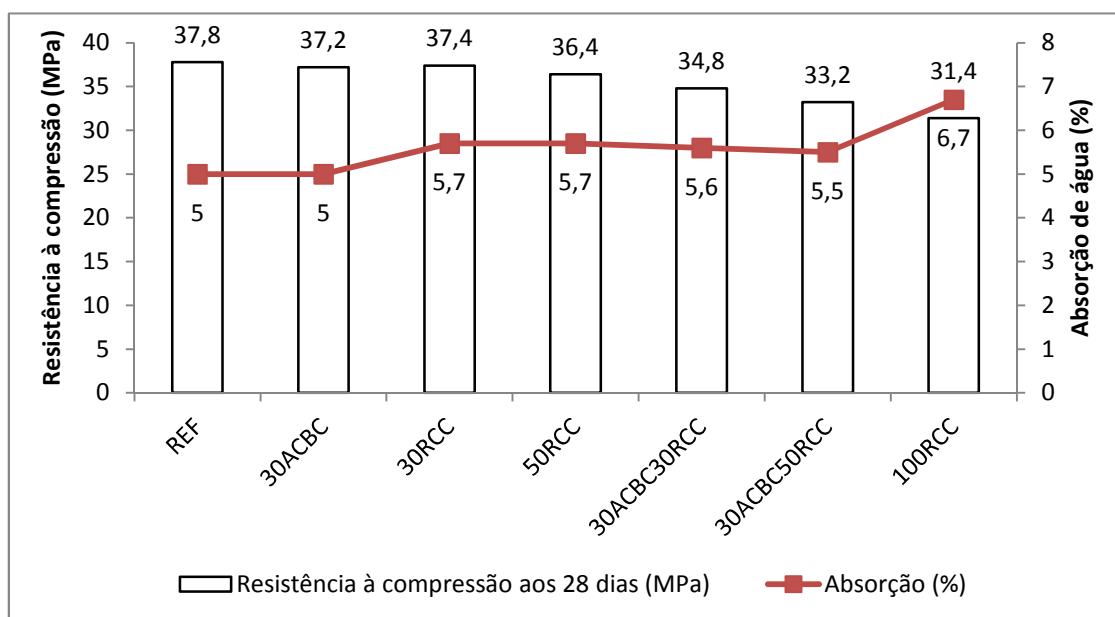
Obs: não = não significativo / sim = significativo

O teste de Tukey indicou que os valores de absorção dos traços 30ACBC, 30ACBC30RCC e 30ACBC50RCC são similares ao traço referência. O traço 100RCC apresentou valor de absorção superior a todos os traços.

Pode-se concluir que a utilização do RCC provocou um aumento na absorção de água dos concretos. A ACBC apresentou um desempenho satisfatório quanto à absorção de água dos concretos, uma vez que os traços com utilização conjunta de ACBC e RCC apresentaram valores médios de absorção inferiores aos traços onde foi utilizado apenas o RCC, e o traço com utilização apenas da ACBC (30ACBC) apresentou absorção de água similar ao concreto de referência.

Infere-se que quanto maior a absorção de água, maior a porosidade da matriz, e, a porosidade possui uma relação inversa com a resistência do concreto, ou seja, o aumento da porosidade acarreta na redução da resistência da matriz. No gráfico representado pela Figura 77, pode-se observar os valores de resistência à compressão aos 28 dias e a absorção de água dos concretos. De modo geral, o aumento da absorção de água resulta na redução da resistência à compressão dos concretos.

Figura 77 – Resistência à compressão e absorção de água dos concretos



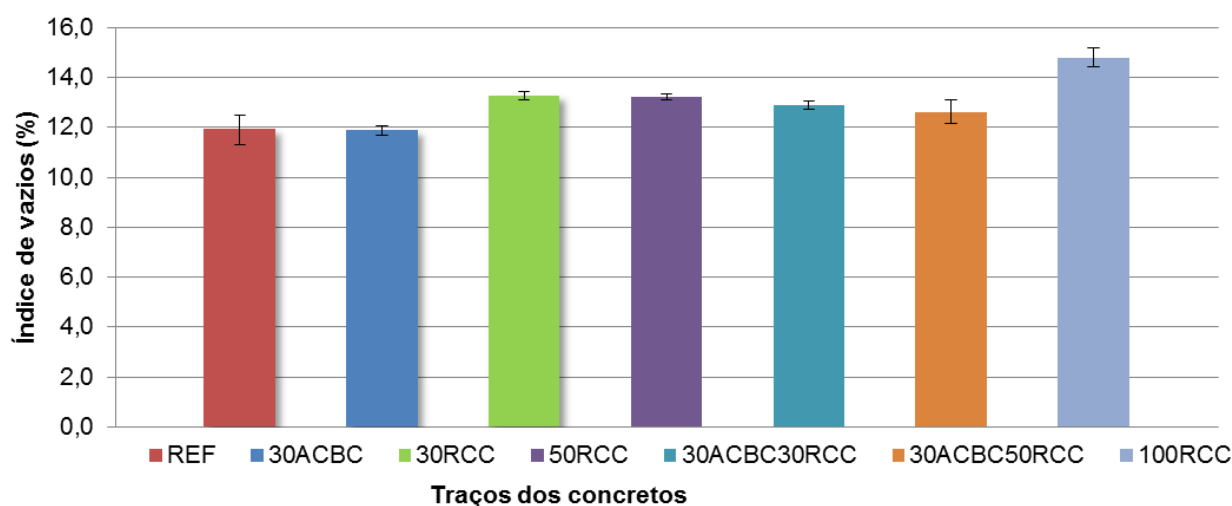
Apesar da menor absorção de água observada para os traços 30ACBC30RCC e 30ACBC50RCC comparativamente com os traços 30RCC e 50RCC, os valores de resistência à compressão foram consideravelmente inferiores (Figura 77). Pode ter ocorrido um preenchimento dos poros do agregado reciclado de RCC pelas partículas de ACBC prejudicando a hidratação do cimento na interface agregado/pasta, e resultando em um concreto menos resistente.

5.4.5 Índice de vazios

Os resultados obtidos no ensaio de índice de vazios estão apresentados na Tabela 52 e no gráfico representado pela Figura 78.

Tabela 52 – Resultados do ensaio de índice de vazios dos concretos

Traços	Índice de vazios (%)	Desvio Padrão (%)	Coefficiente de Variação (%)
REF	11,9	0,6	5
30ACBC	11,9	0,4	3
30RCC	13,3	0,3	2
50RCC	13,2	0,1	1
30ACBC30RCC	12,9	0,2	1
30ACBC50RCC	12,6	0,5	4
100RCC	14,8	0,4	3

Figura 78 – Resultados do ensaio de índice de vazios dos concretos

Pode-se verificar que os traços com utilização isolada de RCC apresentaram índice de vazios superiores aos demais traços. Os traços com adição conjunta de ACBC e RCC (30ACBC30RCC e 30ACBC50RCC) apresentaram valores médios de absorção inferiores aos traços onde foi substituído apenas o RCC (30RCC, 50RCC e 100RCC).

A análise de variância também foi realizada (Tabela 53) para verificar se houve diferença significativa entre os valores médios de absorção para os traços.

Tabela 53 – ANOVA - Índice de vazios

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	17,8646	6	2,9774	21,0359	0,0000	2,8477
Dentro dos grupos	1,9816	14	0,1415			
Total	19,8461	20				significativo

Como o valor de F é superior ao F crítico, pode-se afirmar que houve diferença significativa entre as médias das amostras (Tabela 53). Foi aplicado o teste de Tukey para verificar quais traços apresentaram essa diferença. (Tabela 54).

Tabela 54 – Resumo do Teste de Tukey para o índice de vazios dos concretos

Traços	30ACBC	30RCC	50RCC	30ACBC30RCC	30ACBC50RCC	100RCC
REF	não	sim	sim	não	não	sim
30ACBC		sim	sim	sim	não	sim
30RCC			não	não	não	sim
50RCC				sim	não	sim
30ACBC30RCC					não	sim
30ACBC50RCC						sim

Obs: não = não significativo / sim = significativo

O teste de Tukey indicou que não houve diferença significativa entre os traços 30ACBC, 30ACBC30RCC e 30ACBC50RCC quando comparados com o traço referência. Os traços 30RCC, 50RCC e 100RCC apresentaram valores médios de índices de vazios significativamente superiores ao concreto referência. Sendo assim, pode-se concluir que a utilização do RCC contribuiu com um aumento no índice de vazios dos concretos. Apesar do teste de Tukey não indicar diferença significativa entre o índice de vazios dos traços 30ACBC30RCC comparado com o traço 30RCC, e traço 30ACBC50RCC comparado com o traço 50RCC, os resultados de índice de vazios para os traços com adição conjunta de ACBC e RCC foram inferiores aos concretos onde foi realizada a substituição apenas do RCC, e desta forma, infere-se que a ACBC pode ter preenchido alguns poros dos agregados de RCC, e com isso reduziu o índice de vazios desses concretos.

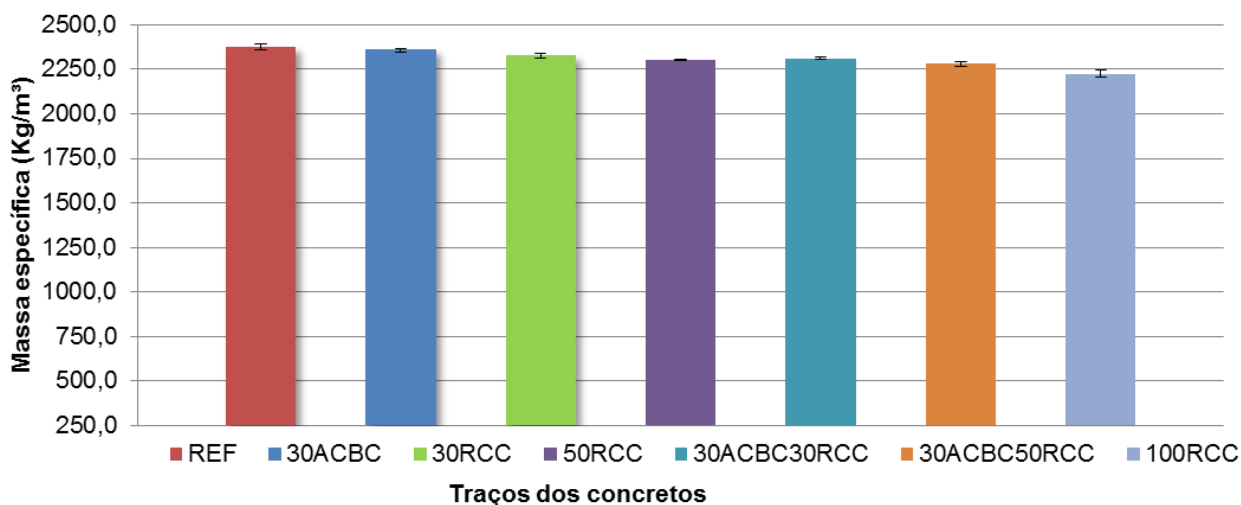
5.4.6 Massa específica

Os resultados obtidos no ensaio de massa específica estão apresentados na Tabela 55 e no gráfico representado pela Figura 79.

Tabela 55 – Resultados do ensaio de massa específica dos concretos

Traços	Massa específica (Kg/m ³)	Desvio Padrão (Kg/m ³)	Coefficiente de Variação (%)
REF	2374,3	16,4	1
30ACBC	2358,4	10,8	0
30RCC	2325,4	11,3	0
50RCC	2301,8	4,0	0
30ACBC30RCC	2310,7	5,9	0
30ACBC50RCC	2282,1	13,5	1
100RCC	2224,6	18,6	1

Figura 79 – Resultados do ensaio de massa específica dos concretos



A análise de variância foi realizada para verificar a significância de variação dos resultados (Tabela 56).

Tabela 56 – ANOVA - Massa específica

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	44529,9713	6	7421,6619	47,5408	0,0000	2,8477
Dentro dos grupos	2185,5585	14	156,1113			
Total	46715,5298	20				

Como o valor de F é superior a F crítico (Tabela 56), pode-se afirmar que houve diferença significativa entre os valores apresentados de massa específica dos concretos. Foi aplicado o teste de Tukey para verificar quais traços apresentaram essa diferença (Tabela 57).

Tabela 57 – Resumo do Teste de Tukey para a massa específica dos concretos

Traços	30ACBC	30RCC	50RCC	30ACBC30RCC	30ACBC50RCC	100RCC
REF	não	sim	sim	sim	sim	sim
30ACBC		sim	sim	sim	sim	sim
30RCC			não	não	sim	sim
50RCC				não	não	sim
30ACBC30RCC					sim	sim
30ACBC50RCC						sim

Obs: não = não significativo / sim = significativo

Através do teste de Tukey pode-se afirmar que os valores de massa específica do traço REF e 30ACBC são estatisticamente equivalentes. Todos os traços que foram produzidos com agregados reciclados apresentaram valores de massa específica inferiores ao concreto de referência. O agregado reciclado de RCC possui menor massa específica que a brita, ou seja, a substituição da brita pelo RCC contribuiu com a redução da massa específica dos concretos.

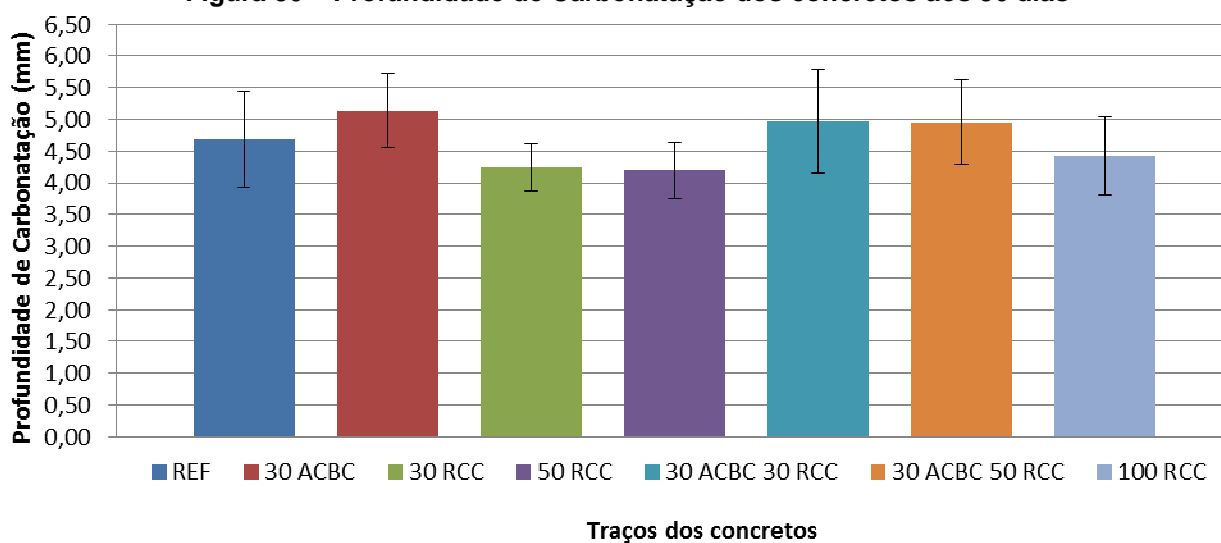
5.4.7 Carbonatação

Os resultados obtidos no ensaio de carbonatação acelerada aos 56 dias estão apresentados na Tabela 58 e no gráfico representado pela Figura 80.

Tabela 58 – Profundidade de Carbonatação dos concretos aos 56 dias

Traços	Profundidade de Carbonatação (mm)	Desvio Padrão (%)	Coefficiente de Variação (%)
REF	4,68	0,8	16
30ACBC	5,14	0,6	11
30RCC	4,24	0,4	9
50RCC	4,20	0,4	11
30ACBC30RCC	4,97	0,8	17
30ACBC50RCC	4,96	0,7	14
100RCC	4,42	0,6	14

Figura 80 – Profundidade de Carbonatação dos concretos aos 56 dias



Os traços com utilização de ACBC apresentaram maior profundidade de carbonatação, como pode ser verificado no gráfico representado pela Figura 80 e na Tabela 58.

A análise de variância foi realizada (Tabela 59) para verificar se houve diferença significativa entre os valores médios de profundidade de carbonatação entre os traços.

Tabela 59 – ANOVA - Carbonatação 56 dias

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	33,3184	6	5,5531	14,1247	0,0000	2,1327
Dentro dos grupos	104,5766	266	0,3931			
Total	137,8950	272				significativo

Como o valor de F é superior a F crítico (Tabela 59), pode-se afirmar que houve diferença significativa entre os valores apresentados de profundidade de carbonatação aos 56 dias dos concretos. Foi aplicado o teste de Tukey para verificar quais traços apresentaram essa diferença (Tabela 60).

Tabela 60 – Resumo do Teste de Tukey Carbonatação 56 dias

Traços	30ACBC	30RCC	50RCC	30ACBC30RCC	30ACBC50RCC	100RCC
REF	sim	sim	sim	não	não	não
30ACBC		sim	sim	não	não	sim
30RCC			não	sim	sim	não
50RCC				sim	sim	não
30ACBC30RCC					não	sim
30ACBC50RCC						sim

Obs: não = não significativo / sim = significativo

O teste de Tukey indicou diferença significativa entre o traço 30ACBC e o traço referência, ou seja, pode-se afirmar que a utilização de 30% de ACBC contribuiu com o aumento da profundidade de carbonatação aos 56 dias do concreto. O teste também indicou diferença significativa para os traços 30RCC e 50RCC quando comparados com o concreto referência, e neste caso, a utilização de 30 e 50% de RCC contribuíram com a redução da profundidade de carbonatação dos concretos aos 56 dias. Os traços 30ACBC30RCC e 30ACBC50RCC apresentaram profundidade de carbonatação estatisticamente similares ao concreto referência, ou seja, a utilização combinada da ACBC e RCC não interferiu na profundidade de carbonatação dos concretos.

No estudo realizado por Lima *et al* (2011), concretos com teores de 30% e 50% de ACBC apresentaram profundidade de carbonatação superiores ao concreto de referência. O avanço da frente de carbonatação para os concretos com ACBC pode ser explicado pela acidez das amostras de cinza, fato que contribui com a redução da alcalinidade do concreto. Nas análises realizadas por Lima *et al* (2011), as amostras de ACBC apresentaram valores na ordem de 7,8 para o pH do solubilizado e de 4,96 para o pH do lixiviado.

Pereira *et al.* (2012) realizou um estudo sobre a durabilidade de concretos produzidos com teores de 20%, 50% e 100% de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado de RCC e para 3 diferentes níveis de resistência à compressão (20MPa, 30MPa e 40MPa), todos os concretos com agregados reciclados de 20MPa e 30MPa apresentaram profundidade de carbonatação inferiores ao concreto de referência.

No estudo realizado por Levy & Helene (2004), concretos produzidos com agregados reciclados apresentaram profundidade de carbonatação inferiores ao concreto referência, considerando os concretos que permaneceram acondicionados durante 28 dias em câmara de

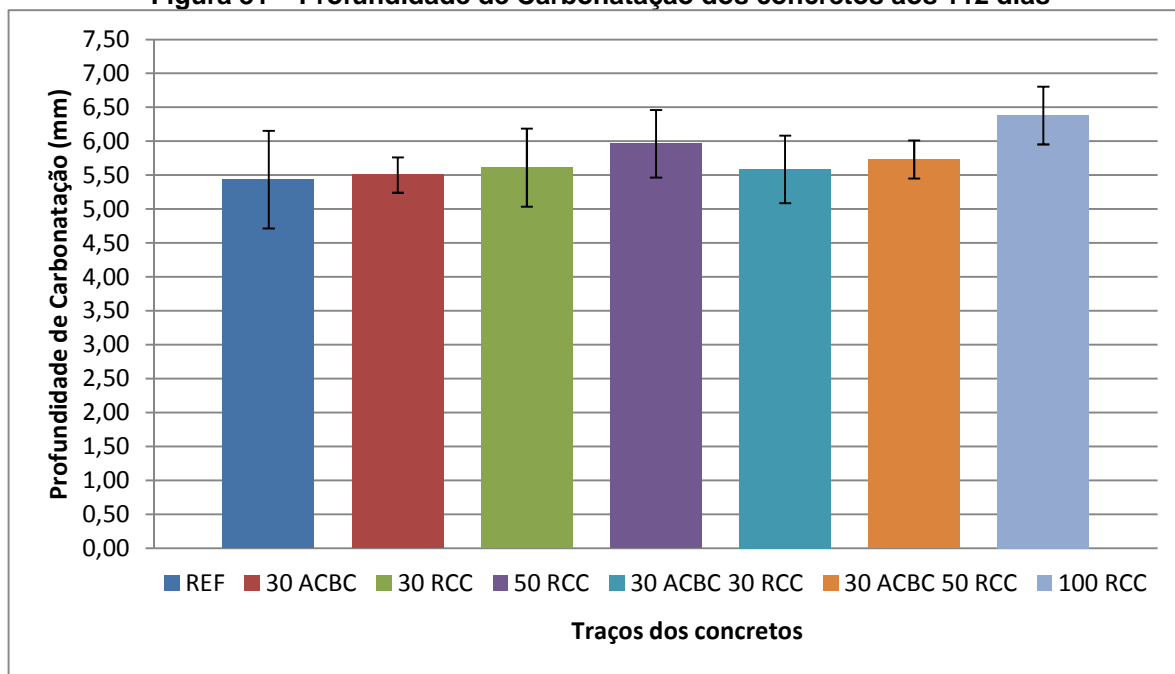
carbonatação acelerada. Os agregados reciclados são constituídos por argamassa de cimento, e desta forma, os concretos produzidos com esse agregado apresentam maior reserva alcalina, e essa reserva alcalina pode atuar como proteção da superfície do concreto contra a reação da carbonatação (LEVY & HELENE, 2004).

Foi realizada também a avaliação da profundidade de carbonatação dos concretos aos 112 dias, e os resultados podem ser verificados na Tabela 61 e no gráfico representado pela Figura 81.

Tabela 61 – Profundidade de Carbonatação dos concretos aos 112 dias

Traços	Profundidade de Carbonatação (mm)	Desvio Padrão (%)	Coefficiente de Variação (%)
REF	5,44	0,7	13
30ACBC	5,51	0,3	5
30RCC	5,62	0,6	10
50RCC	5,97	0,5	8
30ACBC30RCC	5,59	0,5	9
30ACBC50RCC	5,73	0,3	5
100RCC	6,38	0,4	7

Figura 81 – Profundidade de Carbonatação dos concretos aos 112 dias



Também foi realizada a análise de variância (Tabela 62) para verificar se houve diferença significativa entre os valores médios de profundidade de carbonatação aos 112 dias entre os traços.

Tabela 62 – ANOVA - Carbonatação 112 dias

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	26,8538	6	4,4756	19,1227	0,0000	2,1321
Dentro dos grupos	63,4271	271	0,2340			
Total	90,2809	277				significativo

A análise de variância indicou que houve diferença significativa entre as médias das amostras (Tabela 62). Foi aplicado o teste de Tukey para verificar quais traços apresentaram essa diferença. (Tabela 63).

Tabela 63 – Resumo do Teste de Tukey Carbonatação 112 dias

Traços	30ACBC	30RCC	50RCC	30ACBC30RCC	30ACBC50RCC	100RCC
REF	não	não	sim	não	sim	sim
30ACBC		não	sim	não	sim	sim
30RCC			sim	não	não	sim
50RCC				sim	sim	sim
30ACBC30RCC					não	sim
30ACBC50RCC						sim

Obs: não = não significativo / sim = significativo

O teste de Tukey indicou que não houve diferença significativa entre os valores médios de profundidade de carbonatação aos 112 dias para os traços 30ACBC, 30RCC e 30ACBC30RCC quando comparado com o traço referência. Os traços com 50% e 100% de RCC apresentaram maior profundidade de carbonatação que o traço referência. Pode-se afirmar, com 95% de confiabilidade que a utilização de 50% e 100% de RCC contribuiu com o aumento da profundidade de carbonatação dos concretos aos 112 dias, e que a utilização da ACBC não interferiu nesta propriedade.

No estudo realizado por Almeida (2012), argamassas produzidas com 30% e 50% de ACBC apresentaram evolução da frente de profundidade de carbonatação similares à argamassa de referência.

Katz (2003) verificou a profundidade de carbonatação de concretos confeccionados com agregado reciclado de concreto (ARC), e os corpos de prova permaneceram em ambiente controlado com temperatura de 20° e umidade relativa de 60% durante seis meses. Após esse período as amostras foram acondicionadas em uma câmara de carbonatação com teor de CO₂ de 5%, temperatura de 30°C e umidade relativa de 60%, e os ensaios foram realizados nas idades de 3 e 7 dias. Os concretos confeccionados com o ARC apresentaram valores de profundidade de carbonatação entre 1,3 a 2,5 vezes superiores ao concreto de referência.

No estudo realizado por Gomes & Brito (2009), concretos produzidos com RCC foram acondicionados em câmara de carbonatação por 7, 28, 56 e 90 dias com teor de CO₂ de aproximadamente 5%, os concretos produzidos com agregados reciclados apresentaram maior profundidade de carbonatação para todas as idades quando comparados com o concreto de referência.

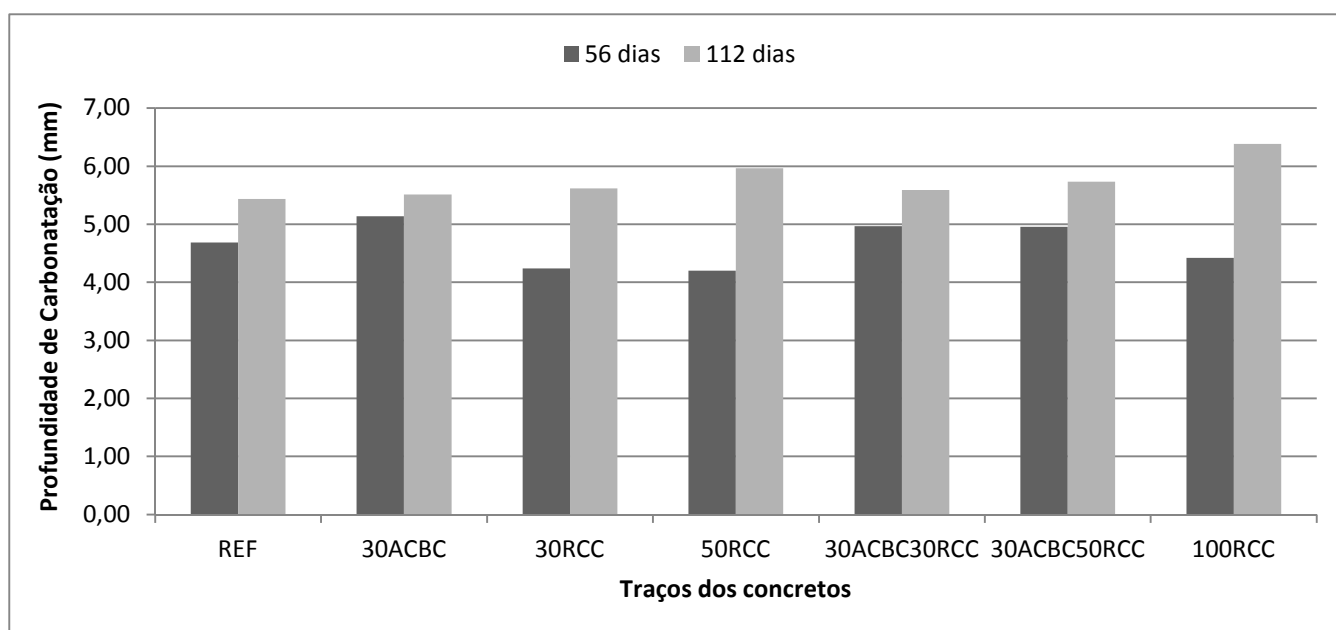
Segundo Basheer *et al.* (2001), a carbonatação do concreto está relacionada com permeabilidade de gases e absorção de água. Concretos mais permeáveis são mais vulneráveis ao efeito da carbonatação devido a estrutura dos poros da matriz.

No gráfico representado pela Figura 82 e na Tabela 64 pode-se visualizar a evolução da profundidade de carbonatação dos concretos aos 56 e 112 dias.

Tabela 64 - Evolução da profundidade de carbonatação dos concretos

Traços	56 dias (mm)	112 dias (mm)	Evolução Carbonatação (%)
REF	4,68	5,44	16
30ACBC	5,14	5,51	7
30RCC	4,24	5,62	33
50RCC	4,20	5,97	42
30ACBC30RCC	4,97	5,59	13
30ACBC50RCC	4,96	5,73	16
100RCC	4,42	6,38	44

Figura 82 – Evolução da profundidade de carbonatação dos concretos



Os traços 30RCC, 50RCC e 100RCC apresentaram maior evolução na profundidade de carbonatação quando comparado com os demais traços. Nos traços onde foi utilizado a ACBC em conjunto com o RCC, foi verificado um menor avanço da frente de carbonatação quando comparado com os traços onde foi utilizado apenas o RCC.

De modo geral, pode-se inferir que na idade de 56 dias, os concretos produzidos com o RCC apresentaram menor profundidade de carbonatação devido a maior reserva alcalina desses concretos provenientes dos agregados reciclados. Na idade mais avançada (112 dias), a estrutura mais porosa da matriz apresentou maior influência no fenômeno da carbonatação resultando em maiores profundidades de carbonatação para os concretos produzidos com o RCC.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Análises dos principais resultados

De modo geral, a ACBC e o RCC apresentaram características físicas e químicas que viabilizam a utilização desses materiais como agregados para uso em concretos. Além disso, as características da ACBC e do RCC determinadas no presente estudo são similares às de outros resíduos da mesma natureza estudados por alguns pesquisadores.

No presente trabalho, o material coletado na Usina de reciclagem apresentou variabilidade granulométrica e impurezas em sua composição, e desse modo foi necessário padronizar as amostras. Vale salientar que o processo de gestão desses resíduos deve ser aprimorado para que seja possível viabilizar a aplicação desses materiais com maior confiabilidade, sendo que, os presentes resultados indicam a viabilidade de aplicação do RCC em concretos.

Os concretos produzidos com utilização isolada de 30% e 50% de RCC (traços 30RCC, 50RCC) e 30% de ACBC (30ACBC) apresentaram valores de resistência à compressão estatisticamente similares aos de um concreto referência para todas as idades estudadas.

A utilização do RCC resultou na obtenção de concretos com menor módulo de elasticidade, especialmente para o traço 100RCC onde o módulo obtido foi inferior aos valores indicados pela norma em todas as idades estudadas.

Os traços REF e 30ACBC apresentaram valores similares de absorção de água e índice de vazios, mas para os traços com RCC, esses valores foram superiores. A maior absorção de água e índice de vazios dos concretos produzidos com o RCC pode ser justificada pela maior porosidade do RCC em comparação com o agregado natural (brita basáltica).

A utilização conjunta da ACBC e do RCC resultou na obtenção de concretos com absorção de água e índice de vazios similares aos concretos com utilização isolada de RCC. Todavia, esses concretos (30ACBC30RCC e 30ACBC50RCC) apresentaram valores de resistência à compressão com redução de 17%, 12% e 8% aos 7, 28 e 91 dias em relação ao concreto referência, respectivamente. Como aspecto positivo, foi verificada uma atenuação na queda de resistência para as idades mais avançadas do concreto.

De modo geral, espera-se que o aumento da absorção de água em concretos contribua para reduzir a resistência à compressão. No presente estudo, isso não ocorreu para os traços 30RCC e 50RCC comparativamente aos traços 30ACBC30RCC e 30ACBC50RCC, provavelmente pela elevada porosidade do RCC e pela grande superfície específica da ACBC (Figura 74). Pode ter ocorrido um preenchimento dos poros do RCC pelas partículas da ACBC, e com isso a hidratação da pasta pode ter sido prejudicada na interface pasta/agregado. Vale salientar que a magnitude dos valores obtidos é suficiente para a indicação desses concretos para o uso em diversas aplicações na construção civil.

Os concretos com utilização conjunta da ACBC e do RCC (30ACBC30RCC e 30ACBC50RCC) apresentaram menor evolução da frente de carbonatação quando comparados com os concretos produzidos com a utilização isolada do RCC. Todavia, ao utilizarmos o RCC de forma isolada tem-se uma majoração da profundidade de carbonatação aos 112 dias bem superior ao traço referência. Uma possível explicação para esse fenômeno pode ser atribuída a maior absorção de água e índice de vazios dos concretos com RCC, indicando a maior porosidade da matriz e vulnerabilidade para o processo da carbonatação.

Todas essas observações poderão ser ratificadas por meio de ensaios que permitam avaliar o tamanho e distribuição dos poros, bem como por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) a serem realizados na interface pasta/agregado para cada um dos traços estudados. Estes ensaios (MEV e porosimetria) são sugestões para a continuidade desse estudo.

A utilização da ACBC e do RCC pode contribuir em termos econômicos devido à possibilidade de agregar valor a resíduos que são passivos ambientais. Vale salientar que a utilização desses materiais também pode minimizar impactos ambientais através da mitigação da mineração dos agregados naturais para uso na construção civil, e da redução de áreas destinadas para aterro desses resíduos.

6.2 Conclusões

O presente estudo permite indicar a possibilidade do uso conjunto da ACBC e do RCC como substitutos parciais de agregados naturais em concretos, pois a redução da resistência pode ser considerada baixa frente às possibilidades de utilização dos concretos contendo esses resíduos.

A utilização isolada da ACBC e do RCC (traços 30ACBC, 30RCC e 50RCC) resultou na obtenção de concretos com valores de propriedades mecânicas similares ao concreto de referência.

Os concretos com utilização conjunta da ACBC e do RCC apresentaram menor evolução da frente de carbonatação comparativamente aos concretos com a utilização isolada do RCC.

6.3 Sugestões para trabalhos futuros

Para garantir a viabilidade de aplicação da ACBC e do RCC em concretos, é necessário aprofundar os estudos, segue algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Utilização de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para avaliar a interface pasta/agregado em concretos com o uso conjunto da ACBC e do RCC;
- Avaliação do tamanho e distribuição dos poros de concretos com o uso conjunto de ACBC e RCC utilizando a técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio;
- Estudo da durabilidade de concretos com o uso conjunto da ACBC e RCC considerando a utilização de armaduras e o comportamento à corrosão, e também a frente de penetração de íons cloretos.
- Realizar ensaios com os concretos em idades mais avançadas;
- Realizar ensaios de estabilidade volumétrica;
- Realizar levantamento de custos para verificar a viabilidade econômica da utilização da ACBC e do RCC em concretos.

7 REFERÊNCIAS

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2011**. Disponível em: http://www.abrelpe.org.br/panorama_apresentacao.cfm

AGÊNCIA FAPESP. **Bagaço na Construção Civil**. 2007. Disponível em < <http://agencia.fapesp.br/7211>>. Acesso fev. 2012.

ALESSI, N. P.; NAVARRO, V. R. Saúde e trabalho rural: o caso dos trabalhadores da cultura canavieira na região de Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**. vol.13, Rio de Janeiro, 1997.

ALMEIDA, F. C. R. **Avaliação do potencial de corrosão de armaduras em concretos com substituição parcial do agregado miúdo pela areia de cinza do bagaço da cana-de-açúcar** - ACBC. 2013. 206f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

AL-RAWAS, A. A. Use of incinerator ash as a replacement for cement and sand in cement mortars. **Building and Environment**, Vol. 40, p. 1261-1266, 2005.

ALTHEMAN, D. GIUSEPPONI, S. C. PAULON, V. A. A resistência à compressão com agregados de entulho reciclado. In: VI SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL. 2003. São Paulo. **Anais...**São Paulo: IBRACON, 2003.

ANDRADE, L. B.; ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. Evaluation of concrete incorporating bottom ash as natural aggregates replacement. **Waste Management** (Elmsford), v. 27, n. 9, pp. 1190-1199, 2007.

ÂNGULO, S. C.; JOHN, V. N.; ULSEN, C.; KAHN, H. Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados separados por líquidos densos. In: I CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL, X ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2004, São Paulo. **Anais** do X ENTAC. São Paulo, 2004.

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

_____. **NBR 5738** – Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5739** – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

- _____. **NBR 6118** – Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2007.
- _____. **NBR 7211** – Agregados para concretos. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. **NBR 7222** – Argamassas de concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.
- _____. **NBR 7223** – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone. Rio de Janeiro, 1992.
- _____. **NBR 8522** – Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro, 2008.
- _____. **NBR 9778** – Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água por imersão. Rio de Janeiro, 1987.
- _____. **NBR 9935** – Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro, 2011.
- _____. **NBR 12655** – Concreto – Preparo, controle e recebimento. Rio de Janeiro, 1996.
- _____. **NBR 15112** – Resíduos sólidos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação, 2004.
- _____. **NBR 15113** – Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação, 2004.
- _____. **NBR 15114** – Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação, 2004.
- _____. **NBR 15115** – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos, 2004.
- _____. **NBR 15116** – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos, 2004.
- ASOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN. **NM 23** – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da densidade absoluta. 2000.
- _____. **NM 30** – Agregado miúdo– Determinação da absorção de água. 2001.
- _____. **NM 45** - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. 2002.
- _____. **NM 46** – Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75µm, por lavagem. 2003.

_____. **NM 52** – Agregado miúdo– Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. 2003.

_____. **NM 53** – Agregado graúdo– Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. 2001.

_____. **NM 248** – Agregados – Determinação da composição granulométrica. 2003.

BAI, Y., DARCY, F. P. BASHEER, A. M. Strength and drying shrinkage properties of concrete containing furnace bottom ash as fine aggregate. **Construction and Building Materials**, Vol. 19, p. 691-697, 2005.

BARBOZA FILHO, M. P., PRABHU, A. S., 2002, **Aplicação de silicato de cálcio na cultura do arroz** – Circular Técnica 51, Santo Antônio de Goiás: EMBRAPA, 4 p.

BASHEER, L., KROPP, J., CLELAND, D. J. Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. **Construction and Building Materials**, Vol. 15, p. 93-103, 2001.

BESSA, S. A. L. **Utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como agregado miúdo em concretos para artefatos de infraestrutura urbana**. 2011. 181f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2012.

BUTTLER, A. M.; MACHADO, E. F. Jr. Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto – Influência da idade de reciclagem nas propriedades mecânicas dos concretos. In: **VI SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL**. 2003. São Paulo. **Anais...**São Paulo: IBRACON, 2003.

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. 2007. 254f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Ciências da Engenharia Ambiental – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

CAIRNS, R.; DI NIRO, G., DOLARA, E. The use of RAC in prefabrication. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.) **Sustainable construction: use of recycled concrete aggregate**. London: Thomas Telford Pub, 1998, p.371-379

CARNEIRO, J. A., LEITE, M. B., LIMA, P. R. L. Influência dos agregados de RCC na resistência a compressão de concreto com fibras de aço. In: **II SEMINÁRIO SOBRE RESÍDUOS SÓLIDOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL**. 2011. Maceió. **Anais...** Maceió: ENARC, 2011.

CASTILHO, T. Resíduos da Construção e Demolição: Reciclar mais para gerar menos. **Revista Visão Ambiental**, São Paulo, 3ªed, p. 40-44, nov./dez. 2009.

CESNIK, R.; MIOCQUE, J. **Melhoramento da cana-de-açúcar**, 1 ed. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2004, 307 p.

CETESB Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Resíduos Urbanos**. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/residuos/urbanos_saude.asp> acesso 23 fev. 2011.

CASUCCIO, M.; TORRIJOS, M. C.; GIACCIO, G.; ZERBINO, R. Failure mechanism of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 7, p. 1500-1506, 2008.

CHEN, H. J.; YEN, T.; CHEN, K. H. Use of buildings rubbles as recycled aggregates. **Cemente and Concrete Research**, v.33, p.125-132, 2003.

CINCOTTO, M.A. Utilização de subprodutos e resíduos na indústria da construção civil. In: **Tecnologia de Edificações**. São Paulo, Pini/ IPT, 1988 p.71-74.

CORINALDESI, V. Mechanical behavior of masonry assemblages manufactured with recycled-aggregate mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 7, p. 505-510, 2009.

COELHO, S. T. **Mecanismos para implementação da co-geração de eletricidade a partir de biomassa: Um modelo para o Estado de SP**. 1999. 200f. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

COIMBRA, M. A.; SANTOS, W. N. dos; MORELLI, M. R.. Recuperação de resíduos inorgânicos para a construção civil. **Cerâmica** [online]. 2002, v. 48, n. 306, pp. 44-48. ISSN 0366-6913.

CONAB, COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Primeiro levantamento da safra 2012/2013. Abr/2012. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12_04_10_09_19_04_boletim_de_cana.pdf>. Acesso em: jul 2012.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução Conama 307**, de 5 de julho de 2002. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>> jun. 2012

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução Conama 448**, de 18 de janeiro de 2012. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=672>> jun. 2012.

CORDEIRO, G. C. Avaliação da reatividade da cinza residual do bagaço de cana de açúcar com cimento Portland e cal. 2005. In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. **Anais...** Olinda: IBRACON. 2005.

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

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L. M.; FAIRBAIRN, E. R. M. Ultrafinegrindingof sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete.**Cement & Concrete Research**, n. 39, p. 110-115, 2009.

CÓRDOBA, R. E. **Estudo do sistema de gerenciamento integrado de resíduos de construção e demolição no município de São Carlos – SP**. 2010. 372f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2010.

CYR M.; LUDMANN, C. Low risk meat and bone meal (MBM) bottom ash in mortars as sand replacement. **Cement and Concrete Research**, Vol. 36, p. 469-480, 2006.

DE PAULA, M. O.; TINOCO, I. F. F.; RODRIGUES, C. S.; SILVA, E. N.; SOUZA, C. F. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. In: 49º Congresso Brasileiro do Concreto, 2007, Bento Gonçalves, RS. **Anais** do 49º. CBC. São Paulo, SP: IBRACON, 2007.

DIEESE Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Socioeconômicos.

Setor Sucroalcooleiro. On-line. Disponível em: <Erro! A referência de hiperlink não é válida.>

DUARTE, P.; LIMA, L. L. Beneficiamento do resíduo de construção. In: II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica, 2007, João Pessoa. **Anais** do II CONNEPI. Paraíba, 2007.

EMBRAPA **Agropecuária**. Disponível em: < <http://www.embrapa.br/>>. Acesso em: 2010 e 2013.

ETXEBERRIA, M. VÁZQUEZ, E. MARÍ, A. BARRA, M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, vol. 37, p. 735-742, 2007.

FÁBRICA DE AÇO PAULISTA – FAÇO. **Manual de Britagem**, 4. ed. São Paulo, 1985.

FAGURY, S. C.; GRANDE, F. M. Gestão de resíduos de construção e demolição (RCD) – aspectos gerais da gestão pública de São Carlos/SP. **Exacta**, São Paulo, v.5, n.1, p.35-45, jan./jun. 2007.

FIESP/CIESP. **Ampliação da oferta de energia através da biomassa (bagaço da cana-de-açúcar)**, São Paulo: FIESP/CIESP, 2001, 90 p.

FONSECA, B. F. **Desempenho estrutural de paredes de alvenaria de blocos de concreto de agregados reciclados de rejeitos de construção e demolição**. 2002. 154f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2002.

FREIRE, W. J; CORTEZ, L. A. B. **Vinhaça de cana-de-açúcar**. / Wesley J. Freire, Luís Augusto B. Cortez – Guaíba : Agropecuária, 2000. 203 p.

FREIRE, Wesley Jorge, BERALDO, Antonio Ludovico. **Tecnologias e materiais alternativos de construção**. Campinas: editora UNICAMP, 2003.

FREITAS, E. G. A., RODRIGUES, E. H. V., ARAÚJO, R. C. L., FAY, L. "Efeito da adição de cinzas de bagaço de cana na resistência à compressão de argamassa normal". In: XXVII Congresso Brasileiro de

Engenharia Agrícola, 27.,Poços de Caldas. **Anais...**Lavras: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, vol. 4, pp. 219-221, 1998.

FRÉSCA, F. R. C. **Estudo da geração de resíduos sólidos domiciliares no município de São Carlos, SP, a partir da caracterização física.** 2007. 233f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

GALVÃO, V. V. L.; PEIXOTO, E. A.; LIMA, L. A. Utilização de entulho da construção civil de Maceió como agregado graúdo para o concreto. In: VI SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL. 2003. São Paulo. **Anais...**São Paulo: IBRACON, 2003.

GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. **Cement & Concrete Composites**, v. 29, n. 6, p. 515-524, 2007.

GOMES, M.; BRITO, J. Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance. **Materials and Structures**, v.42, p.663-675, 2009.

HANSEN, T. C. **Recycling of demolished concrete and masonry.** Londres: E & FN Spon, 1992.

HELENE, P. **Corrosão em Armaduras para Concreto Armado.** São Paulo: PINI / IPT, 45 p., 1986.

HERNÁNDEZ, J. F. M.; Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of the reactions. **Cement and Concrete Research**. vol. 28, p. 1525-1536. 1998.

JADOVSKI, I. **Diretrizes técnicas e econômicas para usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição.** 2005. 178f. Dissertação de Mestrado, UFRGS 2005.

JENDIROBA, E. Aproveitamento de resíduos da indústria sucroalcooleira. In: **Gestão de resíduos na agricultura e na agroindústria.** / editores Cláudio Spadotto e Wagner Ribeiro - Botucatu, FEPAF, 2006.

JIANZHUANG XIAO. JIABIN LI. CH. ZHANG. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. **Cement and Concrete Research**. vol. 35, p. 1187-1194, 2005.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento.** 2000. 102f. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. G. Cinzas e aglomerantes alternativos. In: **Tecnologias e materiais alternativos de construção** / W. J. Freire, A. L. Beraldo (coord.) – Campinas, SP : Ed. UNICAMP, 2003.

JOHN, V. M. Cinzas e aglomerantes alternativos. In: **Tecnologias e materiais alternativos de construção** / W. J. Freire, A. L. Beraldo (coord.) – Campinas: Ed. UNICAMP, 2003.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. Reciclagem de resíduos da construção. In: SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES. São Paulo. **Anais...**Secretaria de Estado do Meio Ambiente/CETESB, 2001.

JORNAL DA CIÊNCIA. **Trabalho no corte de cana tem dias contados**. Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência – SBPC, 2007. Disponível em: <<http://www.jornaldaciencia.org.br/Detail.jsp?id=50416>>.

KATZ, A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 703 – 711, 2003.

KHALDOUN, R. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. **Building and Environment**. vol. 42, p. 407-415, 2007.

KREUZ, A. L.; CHERIAF, M.; ROCHA, J. C. Estudo das propriedades dos concretos utilizando cinza pesada como parte da areia. In: ENTAC – 2002 – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 10. **Anais...** 2002.

KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa**. 2002. 199f. Tese (Doutorado em Engenharia), Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Minas e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

LEÃO, R. M. **Álcool: a energia verde**. São Paulo: Iqual Editora, 2002. 255p.

LEI nº **13.867**, de 12 de setembro de 2006. Institui o Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil e o Sistema para Gestão desses Resíduos e dá outras providências.

LEI nº **12.305**, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 270f. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre. 2001.

LEME, R. M. **Álcool combustível derivado da cana-de-açúcar e desenvolvimento sustentável**. Disponível em: < www.feagri.unicamp.br/energia/agre2004>.

LEVY, S. M.; HELENE, P. Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 11, p. 1975-1980, 2004.

LIMBACHIYA, M. C.; LEELAWAT, T.; DHIR, R. K. Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. **Materials and structures**, v. 33, n. 9, p. 574-580, 2000.

LIMA, S. A.; SALES, A.; ALMEIDA, F. C. R.; MORETTI, J. P.; PORTELLA, K. F. Concretos com cinza do bagaço da cana-de-açúcar: avaliação da durabilidade por meio de ensaios de carbonatação e abrasão. **Ambiente Construído**, v. 11, n.2, p. 201-212, 2011.

LORA, E. S., ARRIETA, F. P., CARPIO, R. C., 2001, “**Eletricidade a partir do bagaço de cana**”. In: Mello, M. G. (ed), Biomassa – Energia dos trópicos em Minas Gerais, 1 ed. Belo Horizonte: LabMídia, pp. 59-81.

LUZ, A. B.; ALMEIDA, S. L. M. **Manual de agregados para a construção civil**. 2 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012.

MANHÃES, M. S. Adubação, correção do solo e uso de resíduos da agroindústria. In: **Tecnologia canaveira nas Regiões Norte Fluminense e Sul do Espírito Santo** – Boletim Técnico n. 12, Campos dos Goytacazes: UFRRJ, pp. 24-31. 1999.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Evolução da Produtividade da cana-de-açúcar no Brasil**, 2007. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br>>.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Evolução da Produtividade da cana-de-açúcar no Brasil**, 2010. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br>>.

MARTINS, C. H.; ZANELLA, R. M.; PAULINO Jr, R. Potencial do uso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como agregado miúdo. In: I Seminário de Engenharia Urbana – SEUEM. **Anais...**, Maringá, Brasil, 2007.

MARQUES NETO, J. C. **Diagnóstico para estudo de Gestão de Resíduos de Construção e Demolição do Município de São Carlos-SP**. 2003. 155f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2003.

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

MESA VALENCIANO, M. C. **Incorporação de resíduos agroindustriais e seus efeitos sobre as características físico-mecânicas de tijolos de solo melhorado com cimento**. 1999. 102p. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade de Campinas. Campinas. 1999.

MOTA, S. **Introdução à engenharia ambiental**. 3a ed. Rio de Janeiro: ABES, 416p, 2003.

NINNI, K. **O lixo que ameaça o mundo**. O Estado de São Paulo, São Paulo, 28 set. 2011. Caderno Sustentabilidade & Meio Ambiente, p.3.

NUNES, I. H. S., VANDERLEI, R. D., SECCHI, M., ABE, M. A. P. Estudo das características físicas e químicas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar para uso na construção. **Revista Tecnológica**, n.17, p. 39-48, 2010.

ODEBRAZ. Disponível em: <<http://www.odebraz.com.br/>> acesso 15 ago. 2011.

OZKAN, S. T. E. Recycling rubble into aggregates: a model for local governments. **Habitat International**, v.25, p.493-502, 2001.

PAULA, M. O. D., TINÔCO, I. D. F., RODRIGUES, C. D. S., SILVA, E. N. D., SOUZA, C. D. F. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, 2009.

PAULETTI, C; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C. Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 7, n. 4, p. 7-20, out/dez 2007.

PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V.; DÍAZ-PNZÓN, L.; ORDOÑEZ, L. M. Sugarcane bagasse ash (SCBA): studies on its properties for reusing in concrete production. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, n 77, p. 321- 325, 2002.

PEREIRA, E.; MEDEIROS, M. H. F.; LEVY, S. M. Durabilidade de concretos com agregados reciclados: uma aplicação de análise hierárquica. **Ambiente Construído**. vol.12, n.3, pp. 125-134, 2012. Disponível em:<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212012000300009&lng=en&nrm=iso>. ISSN 1678-8621. <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212012000300009>.

PIACENTE, F. J. **Desenvolvimento sustentável na agroindústria canavieira**: uma discussão sobre resíduos, 2004. Disponível em <<http://www.cori.unicamp.br>>

PINTO, T. P., GONZALES, J. L. R., (Coordenadores) **Manejo e Gestão de Resíduos da Construção Civil. Manual de orientação**. Como implementar um sistema de manejo e gestão dos resíduos da construção civil nos municípios. Parceria técnica entre o Ministério das Cidades, Ministérios do Meio Ambiente e Caixa Econômica Federal. Brasília: CAIXA, 2005.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. 190f. Tese de doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 1999.

PHILIPPI JR, A; AGUIAR, A. O. **Resíduos sólidos: características e gerenciamento. Saneamento, saúde e ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável**. / Arlindo Philippi Júnior, editor. – Barueri, SP : Manole, 2005.

QIONG LIU; JIANZHUANG XIAO; ZHIHUI SUN. Experimental study on the failure mechanism of recycled concrete. **Cement and Concrete Research**. vol. 41, p. 1050-1057, 2011.

RAJAMANE, N. P.; Prediction of compressive strength of concrete with fly ash as sand replacement material. **Cement and Concrete Composites**, Vol. 29, p. 218-223, 2007.

REVISTA PESQUISA FAPESP. **Ponto de ebulição** - Ação articulada entre governo, setores de produção e de pesquisa projeta Piracicaba no mercado mundial do etanol. Edição Impressa, Outubro 2007.

REVISTA PESQUISA FAPESP. **Do bagaço à inovação** – Em meio à crise do setor, empresas investem em tecnologia para aumentar a produção de etanol. Edição Impressa, Junho 2013.

RILEM Concrete Permanent Comitee . RILEM Draft Recommendation - Measurement of hardened concrete carbonation depth CPC-18. **Materials and Structures**, v.17, n. 102, p. 435-440, 1984.

ROCHA, J. C.; JOHN, V. M. Aproveitamento de resíduos na construção. In: **Utilização de Resíduos na Construção Habitacional** / Editores Janaíde Cavalcante Rocha [e] Vanderley Moacyr John. - Porto Alegre: ANTAC, 2003. – (Coleção Habitare, v.4).

ROCHA, A. A. **Fatos históricos do saneamento**. São Paulo : Scortecci, 1992.

ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. Aproveitamento de resíduos na construção. In: **Utilização de Resíduos na Construção Habitacional** / Eds. J. C. Rocha [e] V. M. John. - Porto Alegre: ANTAC, 2003. – (Coleção Habitare, v.4).

RODRIGUES, R. (2001). Bagaço e Álcool. **Revista Agroanalysis**, São Paulo, ABAG Associação Brasileira de Agrobusiness, dezembro de 2001.

SAGOE-CRENTSIL, K. K.; BROWN, T.; TAYLOR, A. H. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. **Cement and Concrete Research**, v.31, p.707-712, 2001.

SALES, A.; LIMA, S. A. Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement. **Waste Management**, v.30, n.6, p. 1114-1122, 2010.

SALES, A.; SOUZA, F. R. Concretes and mortars recycled with water treatment sludge and construction and demolition rubble. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 6, p. 2362-2370, 2009.

SANTOS, E. C. G. **Aplicação de resíduos de construção e demolição (RCC-R) em estruturas de solo reforçado**. 2007. 168f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

SBM **mining and construction machinery**. Disponível em: http://pt.sbmchina.com/crusher/hammer_crusher.html> acesso 10 ago. 2011.

SILVA, R. W. C.; ARNOSTI, Jr. S. Caracterização do resíduo de construção e demolição (RCC) reciclado. **Holos Environment**, v.5, n.2, p.137, 2005.

SILVA FILHO, A. F.; MOURA, W. A.; LEITE, R. S. Caracterização de escória de ferro-cromo como agregado graúdo para produção de concreto. **Revista Sientibus**, n.26, p.95-110, 2002.

SOUZA, F. R. **Estudo da eco-eficiência de argamassas e concretos reciclados com resíduos de estações de tratamento de água e de construções e demolições**. 2006. 91f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2006.

SOUZA G. N. FORMAGINI, S.; CUSTÓDIO, F. O.; SILVEIRA, M. M. Desenvolvimento de argamassas com substituição parcial do cimento portland por cinzas residuais do bagaço de cana-de-açúcar. In: 49o Congresso Brasileiro do Concreto, 2007, Bento Gonçalves. **Anais do 49ºCBC**. São Paulo, SP: IBRACON, 2007.

SINGH, N. B.; SINGH, V. D.; RAI, S. Hydration of bagasse ash-blended Portland cement. **Cement and Concrete Research**. Elmsford, n. 30, p. 1485-1488, 2000.

SPADOTTO, C. A. **Gestão de Resíduos**: realizações e desafios no setor sucroalcooleiro. [2007]. EMBRAPA Meio Ambiente. Disponível em: <http://www.cnpma.embrapa.br/down_hp/360.pdf>

TABSH, S. W.; ABDELFAH, A. S. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 1163-1167, 2009.

TOBEMAQ **Britagem e Mineração**. Disponível em: <<http://www.tobemaq.com.br/>> acesso 10 ago. 2011.

TORRES, A. S.; GONÇALVES, R. B. A.; MARTINS, M. L. C. Caracterização do comportamento do entulho em argamassas. In: VI SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL. 2003. São Paulo. **Anais...**São Paulo: IBRACON, 2003.

TOUHAMIA, M.; SIVAKUMAR, V.; MCKELVEY, D. Shear strength of reinforced-recycled material. **Construction and Building Materials**, v.16, p.331-339, 2002.

UNICA. União da Indústria de Cana-de-açúcar. Disponível em: < <http://www.unica.com.br/>>. Acesso em: 2008, 2010 e 2013.

ULSEN, C.; KAHN, H.; ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. Composição química de agregados mistos de resíduos de construção e demolição do Estado de São Paulo. Rem: **Rev. Esc. Minas**, vol 63, n.2, pp. 339-346, 2010. Disponível em:<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672010000200019&lng=en&nrm=iso>. ISSN 0370-4467. <http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672010000200019>>.

VALVERDE, F. M. **Agregados para a construção civil**. Balanço Mineral Brasileiro, 2001.

VALENCIANO, M. D. C. M, FREIRE, W. J. Características físicas e mecânicas de misturas de solo, cimento e cinzas de bagaço de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, v. 24, n. 3, p. 484-492, dec. 2004. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162004000300001&lng=en&tling=pt>. 10.1590/S0100-69162004000300001>.

VIEIRA, G. L.; DAL MOLIN, D. C. C.; LIMA, F. B. Corrosão em armaduras de concretos obtidos com agregados reciclados da construção civil. In: VI SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL. 2003. São Paulo. **Anais...**São Paulo: IBRACON, 2003.

VILLAIN, G., THIERY, M., PLATRET, G. Measurement methods of carbonation profiles in concrete: thermogravimetry, chemical analysis and gammadensimetry. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 1182–1192, 2007.

VOLPATO, G. L.; BARRETO, R. E. **Estatística sem dor!** 1ª ed., Botucatu: Best Writing, 2011.

WAACK, R. S., NEVES, M. F. **Competitividade do sistema agroindustrial da cana-de-açúcar.** In: FARINA, E. M. M. Q.; ZYLBERSZTAJN, D. (org). **Competitividade no agrobusiness brasileiro**, São Paulo: PENSEA/FEA/USP, 1998. 197 p.

ZANUTTO, T. D.. **Diagnóstico quanto à implantação da resolução conama nº 307 na cidade de São Carlos.** 2011. 76f. Qualificação (mestrado) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2011.

ZARDO, A. M; BEZZERA, E. M; MARTELLO, L. S; SAVASTANO JR, H. Utilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como “filler” em compostos de fibrocimento. In: I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável e X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2004, **Anais...**, São Paulo, Brasil.

ZIONI, F. Sociedade, desenvolvimento e saneamento. In: **Saneamento, saúde e ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável.** / A. P. Júnior, editor. Barueri, SP : Manole, 2005.

ZORDAN, S. E.; JOHN, W. M. **Metodologia de avaliação do potencial de reciclagem de resíduos.** 2004. 11f. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2004.

ZORDAN, S.E. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto.** Campinas, 1997. 140 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP.