



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS - UFG
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL – EEC

CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL - CMEC

Wesley Carlos Nunes

**INFLUÊNCIA DO AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE RESÍDUOS
DA CONSTRUÇÃO PREDIAL NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO
FRESCO E ENDURECIDO**

Goiânia
2007

WESLEY CARLOS NUNES

**INFLUÊNCIA DO AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE RESÍDUOS
DA CONSTRUÇÃO PREDIAL NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO
FRESCO E ENDURECIDO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil da EEC/UFG para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas e Materiais de construção.

Orientador: Prof. Dr. Enio José Pazini Figueiredo.

Goiânia

2007

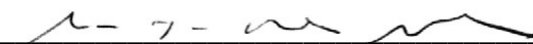
WESLEY CARLOS NUNES

**INFLUÊNCIA DO AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE RESÍDUOS
DA CONSTRUÇÃO PREDIAL NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO
FRESCO E ENDURECIDO**

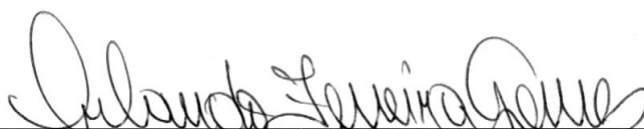
Dissertação defendida no Curso de Mestrado em Engenharia Civil da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, para a obtenção do Título de Mestre, aprovada, em 04 de outubro de 2007, pela Banca Examinadora constituída pelos seguintes professores:



Prof. Dr. Enio José Pazini Figueiredo – UFG
Presidente da Banca



Prof.ª Dr.ª Maria Teresa Paulino Aguilar – UFG
Examinadora externa



Prof. Dr. Orlando Ferreira Gomes – UFG
Examinador interno

Este trabalho é dedicado à minha honrosa família, especialmente ao meu pai Erry Carvalho Agenor Nunes e a minha mãe Hilda Damásio de S. Nunes, os quais sempre me ajudaram incondicionalmente. À Juliana G. Faria, que foi fonte de estímulo, com sua compreensão e apoio para a concretização dessa pesquisa, e aos engenheiros civis e profissionais afins, do meu país.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Erry Carvalho A. Nunes e Hilda Damásio de S. Nunes, pelo amor, amparo, dedicação, estímulo e esforço de garantir as condições para o desenvolvimento dos estudos.

À minha esposa Juliana Guimarães Faria, pelo companheirismo e compreensão das ausências nos momentos de estudo e dedicação necessários a este trabalho.

Ao professor Dr. Enio Pazini, pelas orientações e incentivos efetivamente valorosos.

A todos os professores do curso de Mestrado em Engenharia Civil da UFG, pelas contribuições e ensinamentos profícuos.

Aos amigos e amigas de mestrado: Andrielli, Eliane, Janaína, Rosana, Keillon, Raphael, Ricardo e Izelman, pelos tantos debates e conversas que muito contribuíram com o amadurecimento e desenvolvimento dos estudos.

Em especial, à Maria Teresinha Guimarães Faria e ao meu amigo Sylvio Kelsen Coelho, por suas contribuições nas revisões textuais das línguas portuguesa e inglesa, respectivamente.

Ao amigo engenheiro civil MSc. Deusair Rodrigues dos Santos, do Laboratório de Materiais de Construção da Escola de Engenharia Civil - UFG, pelo companheirismo, leituras e interlocuções estimulantes, relevantes e proveitosas.

Ao Laboratório de Materiais da Escola de Engenharia Civil da UFG, em especial, aos técnicos Agnaldo Damasceno e Manoel Cândido, pela dedicação e ajuda no desenvolvimento dos ensaios laboratoriais.

Aos funcionários da Secretaria do Mestrado em Engenharia Civil, Tancredo Elvis S. Silva e Mário Rosa dos Santos, pelos proeminentes trabalhos prestados aos alunos e à UFG.

Ao Centro Tecnológico de Furnas Centrais Elétricas – GO – Laboratório de concreto, pelo beneficiamento dos resíduos de construção utilizados na pesquisa e ensaio relativo ao cimento. Nossa gratidão, em especial, aos engenheiros Alexandre de Castro e Reinaldo Bittencourt.

À TOCTAO Engenharia, em especial, aos engenheiros Fabrício Borges, Ana Flávia e Michell Aquino, pela concessão do material, controle da coleta e transporte do material de pesquisa (RCD).

À Prefeitura de Goiânia-GO – COMURG e COMDATA, pelos dados estatísticos fornecidos.

"O aspecto mais triste da vida de hoje é que a ciência ganha em conhecimento mais rapidamente que a sociedade em sabedoria"
(Isaac Asimov).

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	09
LISTA DE TABELAS	14
RESUMO	17
ABSTRACT	18
1. INTRODUÇÃO	19
1.1 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TEMA	20
1.2 OBJETIVOS.....	21
1.2.1 Objetivo Geral	21
1.2.2 Objetivos específicos	21
1.3 ESTRUTURA E ABRANGÊNCIA DA PESQUISA	22
2. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)	24
2.1 HISTÓRICO.....	24
2.2 NOMENCLATURAS.....	26
2.3 FONTES GERADORAS E ESTIMATIVAS QUANTI-QUALITATIVAS DE RCD	29
2.4 IMPACTOS AMBIENTAIS E ECONÔMICOS CAUSADOS PELOS RCD.....	37
2.5 POTENCIALIDADES E PROCESSOS DE RECICLAGEM DOS RCD	41
2.5.1 Potencialidades de reciclagem dos RCD	41
2.5.2 Processos de reciclagem dos RCD	43
3. AGREGADOS RECICLADOS DE RCD PARA CONCRETOS	52
3.1 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS RECICLADOS DE RCD.....	54
3.1.1 Composição do agregado graúdo de RCD.....	55
3.1.2 Composição granulométrica dos agregados reciclados de RCD	57
3.1.3 Textura e forma dos agregados reciclados de RCD.....	61
3.1.4 Densidades dos agregados reciclados de RCD e índices de absorção	62
3.1.5 Resistência à abrasão <i>Los Angeles</i> dos agregados graúdos reciclados de RCD.....	65
3.2 ABORDAGEM SOBRE CUSTO ESTIMATIVO DE AGREGADOS RECICLADOS	67
4. CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE RCD	71
4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	71
4.2 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS COM AGREGADOS DE RCD	71
4.2.1 Massas específicas	72
4.2.2 Trabalhabilidade	73
4.2.3 Perda de abatimento.....	75

4.2.4 Resistência à compressão	76
4.2.5 Resistência à tração.....	79
4.2.6 Módulo de deformação	80
5 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	83
5.1 MATERIAIS	84
5.2 MÉTODOS	84
5.2.1 Origem, coleta e beneficiamento dos resíduos de construção (RCD).....	84
5.2.2 Agregados e ensaios de caracterização	87
5.2.2.1 Determinação da composição granulométrica	89
5.2.2.2 Abrasão <i>Los Angeles</i>	90
5.2.2.3 Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água....	91
5.2.2.4 Determinação da massa unitária	94
5.2.2.5 Determinação da composição do AGR por análise visual.....	94
5.2.3 Organograma para a produção dos concretos	96
5.2.4 Método de dosagem.....	97
5.2.5 Determinação e ajustes de traços para os concretos	98
5.2.6 Critérios para dosagem dos concretos	99
5.2.7 Ensaios nos concretos em estado fresco	101
5.2.7.1 Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone	102
5.2.7.2 Determinação da massa específica dos concretos em estado fresco.....	103
5.2.7.3 Moldagem e cura dos corpos-de-prova.....	105
5.2.8 Ensaios em concretos no estado endurecido.....	107
5.2.8.1 Resistência à compressão uniaxial.....	107
5.2.8.2 Resistência à tração por compressão diametral	108
5.2.8.3 Módulo de deformação ou de elasticidade – tangente inicial.....	109
5.2.8.4 Absorção de água, índice de vazios e massa específica	111
5.2.9 Modelagem matemático-estatística e diagrama de dosagem para concreto	112
6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	114
6.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	114
6.1.1 Agregado gráúdo natural – AGN.....	114
6.1.1.1 Composição granulométrica do AGN	114
6.1.1.2 Massa específica, massa unitária e absorção de água do AGN	115
6.1.1.3 Abrasão <i>Los Angeles</i> do AGN	115
6.1.2 Agregado gráúdo reciclado – AGR	115

6.1.2.1 Composição granulométrica do AGR.....	115
6.1.2.2 Massa específica, massa unitária e absorção de água do AGR	117
6.1.2.3 Abrasão Los Angeles do AGR	118
6.1.2.4 Composição do AGR por análise visual.....	118
6.1.3 Agregado miúdo natural – AMN	122
6.1.3.1 Composição granulométrica do AMN	122
6.1.3.2 Massa específica e massa unitária do AMN	123
6.2 PARÂMETROS DE DOSAGEM E TRAÇOS DOS CONCRETOS	123
6.3 ENSAIOS NOS CONCRETOS EM ESTADO FRESCO	126
6.3.1 Trabalhabilidade pelo abatimentos do tronco de cone (<i>slump test</i>).....	126
6.3.2 Massa específica	127
6.3.3 Teor de ar aprisionado	128
6.4 ENSAIOS NOS CONCRETOS EM ESTADO ENDURECIDO	129
6.4.1 Massa específica	129
6.4.2 Absorção de água.....	130
6.4.3 Índice de vazios	132
6.4.4 Propriedades mecânicas dos concretos	134
6.4.4.1 Resistências à compressão	134
6.4.4.1.1 Resistências à compressão aos 3 dias de idade.....	136
6.4.4.1.2 Resistências à compressão aos 7 dias de idade.....	137
6.4.4.1.3 Resistências à compressão aos 28 dias de idade.....	139
6.4.4.1.4 Resistências à compressão aos 56 dias de idade.....	141
6.4.4.2 Resistência à tração por compressão diametral	143
6.4.4.3 Módulo de deformação	146
6.5 PROPOSTA DE MODELAGEM MATEMÁTICO-ESTATÍSTICA E DIAGRAMAS DE DOSAGEM .	148
6.5.1. Resistência à compressão (f_{cd}).....	149
6.5.2. Resistência à tração por compressão diametral (f_{td})	153
6.5.3. Módulo de deformação – tangente inicial (E_{ci})	157
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	161
7.1 CONCLUSÃO.....	165
7.2 PROPOSTAS PARA FUTURAS PESQUISAS	166
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	167
ANEXO A ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CIMENTO PORTLAND CP II F-32.....	173
ANEXO B DEMAIS RESULTADOS LABORATORIAIS DA PARTE EXPERIMENTAL	177

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Participação dos RCD na totalidade dos RSU gerados (PINTO, 1999).....	33
Figura 2.2 – Quantidades percentuais de RCD removidas pela COMURG, no período de abril a dezembro de 2002, por regiões da cidade de Goiânia-GO (PREFEITURA DE GOIÂNIA; UnB, 2002, p.10).....	34
Figura 2.3 – Composição média dos entulhos depositados no aterro de Itatinga, São Paulo (a partir de BRITO FILHO, 1999) (JOHN; AGOPYAN, 2001).....	35
Figura 2.4 – Composição do RCD na Holanda, em massa. (BROSSINK; BROUWERS, 1996)	36
Figura 2.5a - Descarte impróprio de RCD (PREFEITURA DE GOIÂNIA; UNB, 2004).....	37
Figura 2.5b - Descarte de RCD logo após limpeza (PREFEITURA DE GOIÂNIA; UNB, 2004)	37
Figura 2.6 - Hierarquia da disposição de resíduos de construção e demolição (PENG et al., 1997 apud LEITE, 2001, p. 15).	40
Figura 2.7 – Sistema de britagem (bica corrida) da prefeitura de Goiânia-GO (2005).....	47
Figura 2.8 – Cones de britagem (Modelo PY - BREAK-DAY).....	48
Figura 2.9 – Desenho esquemático de separação por jigagem a úmido (All Flux) (CARRIJO, 2005).	49
Figura 2.10 – Desenho esquemático de separação por jigagem a seco (Allair) (CARRIJO, 2005).	49
Figura 2.11 – Sistema de planta móvel para britagem (LT 95 <i>Series Mobile Crusher</i>) Fonte: <i>Metso Minerals</i>	50
Figura 2.12 – Sistema móvel para britagem (<i>Rubble Buster S3R</i>) Fonte: <i>Rubble Buster</i>	50
Figura 3.1 – Primeiro Edifício no Reino Unido a utilizar concreto usinado produzido com agregados reciclados (COLLINS, 2000 apud LEVY & HELENE, 2002)	53
Figura 3.2 – Condomínio em Hamburgo, com 460 unidades, construído de concreto com agregados reciclados há 50 anos (KROPP, 2000 apud LEVY; HELENE, 2002).....	54

Figura 3.3 – Composição característica do agregado graúdo reciclado antes de ser peneirado (LATTERZA; MACHADO JUNIOR, 2003)	56
Figura 3.4 – Composição característica do agregado graúdo reciclado depois de ser peneirado na granulometria desejada: $D_{m\acute{a}x} = 9,5$ mm (LATTERZA, MACHADO JUNIOR, 2003, p. 32).	56
Figura 3.5 – Aspectos dos agregados reciclados: graúdos e miúdo (LEVY, 2001).....	58
Figura 3.6 – Gráfico representativo das curvas granulométricas do agregado miúdo natural e reciclado e respectivos limites inferior e superior para areia média, especificada pela NBR 7211(ABNT, 1983) (LEITE, 2001).	60
Figura 3.7 – Gráfico representativo das curvas granulométricas dos agregados graúdos natural e reciclado e respectivos limites inferior e superior da brita n.º 1 especificada pela NBR 7211 (ABNT, 1983) (LEITE, 2001).	60
Figura 3.8 – Representação esquemática da umidade do agregado (partícula) – figura elaborada a partir de Neville (1997); Carrijo (2005); Mehta (1994).	63
Figura 3.9 – Abrasão <i>Los Angeles</i> (BUTTLER, 2003).....	67
Figura 4.1 – Resistência à compressão simples do concreto aos 28 dias (ZORDAN,1997)	77
Figura 4.2 – Resistência à compressão aos 28 dias de idade (SANTOS, 2006, p. 102).....	78
Figura 4.3 – Resistência à tração aos 28 dias de idade (SANTOS, 2006).....	80
Figura 4.4 – Módulo de deformação em função de AGR (LEITE, 2001)	82
Figura 5.1 – Aspecto externo da obra geradora do RCD utilizado para a produção de concretos com AGR	85
Figura 5.2 – Coleta seletiva de RCD “Classe A” no canteiro de obra	85
Figura 5.3 – AGR e AMR após britagem do RCD em FURNAS-GO.....	86
Figuras 5.4a e 5.4b – Acondicionamento do AGR	86
Figura 5.5 – Ensaio de determinação da composição granulométrica do AGR.....	89
Figura 5.6 – Material retido nas peneiras após o ensaio de abrasão.....	90
Figura 5.7 – Máquina <i>Los Angeles</i>	90
Figura 5.8 – Aferição de massa da amostra seca do AGR	91
Figura 5.9 – Ensaio de absorção do AGR: pesagem hidrostática.....	91

Figura 5.10 – Remoção da água excedente da amostra saturada do AGR	92
Figura 5.11 – Frações de cada grupo constituinte do AGR	95
Figura 5.12 – Organograma para a produção dos concretos	96
Figura 5.13 – Verificação do teor de argamassa	99
Figura 5.14 – Medida da consistência e aspecto geral do concreto com AGR	102
Figura 5.15 – Adensamento do concreto para ensaio de massa específica	104
Figura 5.16 – Acabamento superficial do concreto fresco para ensaio de massa específica	104
Figura 5.17 – Limpeza do recipiente para aferição de massa específica do concreto Fresco	104
Figura 5.18 – Medida da massa específica do concreto fesco	105
Figura 5.19 – Determinação do teor de ar incorporado pelo método pressométrico.....	105
Figura 5.20 – Moldagem dos corpos-de-prova	106
Figura 5.21 – Acondicionamento dos corpos-de-prova em câmara úmida	106
Figura 5.22 – Aspecto geral dos capeamentos de enxofre	108
Figura 5.23 – Ensaio de resistência à compressão uniaxial.....	108
Figura 5.24 – Posicionamento das tiras de madeira nos corpos-de-prova.....	109
Figura 5.25 – Execução do ensaio de tração por compressão diametral.....	109
Figura 5.26 – Fixação das pastilhas de suporte para as agulhas leitoras do extensômetro	110
Figura 5.27 – Fixação do extensômetro no corpo-de-prova	110
Figura 5.28 – Ensaio de determinação do módulo de deformação tangente inicial.....	110
Figura 5.29 – Secagem dos corpos-de-prova em estufa para ensaio de absorção	111
Figura 5.30 – Medida hidrostática de massa do CP e verificação da temperatura da água ..	111
Figura 5.31 – Imersão de corpos-de-prova em água fervente	112
Figura 5.32 – Diagrama de dosagem.....	113
Figura 6.1 – Curva representativa da composição granulométrica do AGN.....	115

Figura 6.2 – Curva granulométrica do AGR	116
Figura 6.3 – Variação da taxa de absorção do AGR ao longo do tempo.....	117
Figura 6.4 – Composição do AGR de RCD	119
Figura 6.5 – Porcentagens de constituintes no entulho reciclado [AGR] (SANTOS, 2006).	120
Figura 6.6 – Curva representativa da distribuição granulométrica do AMN	123
Figura 6.7 – Consumos de cimento dos concretos produzidos.....	125
Figura 6.8 – Medidas de abatimento do tronco de cone – <i>slump test</i>	126
Figura 6.9 – Massa específica dos concretos no estado fresco.....	128
Figura 6.10 – Teor de ar aprisionado nos concretos em estado fresco	128
Figura 6.11 – Massas específicas dos concretos em estado endurecido.....	130
Figura 6.12 – Percentuais de massas específicas em relação aos concretos de referência...	130
Figura 6.13 – Absorção de água	131
Figura 6.14 – Percentuais de absorção de água em relação aos concretos de referência	131
Figura 6.15 – Índice de vazios	133
Figura 6.16 – Percentuais de índices de vazios em relação aos concretos de referência	133
Figura 6.17 – Resistências à compressão aos 3 dias de idade	136
Figura 6.18 – Percentuais de resistências à compressão aos 3 dias de idade em relação aos concretos de referência	137
Figura 6.19 – Resistências à compressão aos 7 dias de idade	137
Figura 6.20 – Percentuais de resistências à compressão aos 7 dias de idade em relação aos concretos de referência.	138
Figura 6.21 – Resistências à compressão aos 28 dias de idade.	139
Figura 6.22 – Percentuais de resistências à compressão dos concretos, aos 28 dias de idade, em relação aos concretos de referência.	140
Figura 6.23 – Resistências à compressão aos 56 dias de idade.	141
Figura 6.24 – Percentuais de resistências à compressão aos 56 dias de idade em relação aos concretos de referência	142

Figura 6.25 – Resistências à tração por compressão diametral.....	143
Figura 6.26 – Percentuais de resistências à tração por compressão em relação aos concretos de referência.....	144
Figura 6.27 – CP rompido após ensaio de resistência à tração por compressão diametral ..	146
Figura 6.28 – Módulos de deformação tangente inicial	147
Figura 6.29 – Percentuais de módulos de deformação em relação aos concretos de referência	148
Figura 6.30 – Diagrama de dosagem para o CR relativo à resistência à compressão	149
Figura 6.31 – Diagrama de dosagem para o CAGR25 relativo à resistência à compressão.	149
Figura 6.32 – Diagrama de dosagem para o CAGR50 relativo à resistência à compressão	150
Figura 6.33 – Diagrama de dosagem para o CAGR75 relativo à resistência à compressão	150
Figura 6.34 – Diagrama de dosagem para o CAGR100 relativo à resistência à compressão....	151
Figura 6.35 – Diagrama de dosagem para o CR relativo à resistência à tração	153
Figura 6.36 – Diagrama de dosagem para o CAGR25 relativo à resistência à tração.....	153
Figura 6.37 – Diagrama de dosagem para o CAGR50 relativo à resistência à tração.....	154
Figura 6.38 – Diagrama de dosagem para o CAGR75 relativo à resistência à tração.....	154
Figura 6.39 – Diagrama de dosagem para o CAGR100 relativo à resistência à tração.....	155
Figura 6.40 – Diagrama de dosagem para o CR relativo ao módulo de deformação.....	157
Figura 6.41 – Diagrama de dosagem para o CAGR25 relativo ao módulo de deformação .	157
Figura 6.42 – Diagrama de dosagem para o CAGR50 relativo ao módulo de deformação .	158
Figura 6.43 – Diagrama de dosagem para o CAGR75 relativo ao módulo de deformação .	158
Figura 6.44 – Diagrama de dosagem para o CAGR100 relativo ao módulo de deformação	159

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Perda de materiais em processos construtivos convencionais, conforme pesquisa nacional em 12 estados e pesquisas anteriores.....	30
Tabela 2.2 – Geração de RCD em algumas cidades brasileiras	31
Tabela 2.3 – Participação dos RCD nos RSU e taxa de geração em localidades diversas .	32
Tabela 2.4 – Quantidades mensais de RCD removidos na cidade de Goiânia/GO (t).....	34
Tabela 2.5 – Composição média de RCD em algumas centrais de reciclagem brasileiras.	36
Tabela 3.1 – Composição granulométrica do agregado miúdo natural e reciclado	59
Tabela 3.2 – Composição granulométrica do agregado gráudo natural e reciclado	59
Tabela 3.3 – Massas específicas de agregados gráudos e miúdos reciclados de concreto e de agregados gráudos e miúdos naturais.	64
Tabela 3.4 – Massas específicas de agregados gráudos reciclados de concreto e de agregados gráudos naturais.	64
Tabela 3.5 – Massa unitária e massa específica de agregado gráudo reciclado e agregado gráudo natural.	64
Tabela 3.6 – Massa específica de cada amostra coletada.....	65
Tabela 3.7 – Preços médios indicativos para os agregados naturais em regiões brasileiras	68
Tabela 3.8 – Preços médios indicativos para os agregados naturais em regiões brasileiras	69
Tabela 3.9 – Gestão de RCD na Comunidade Européia comparativamente aos valores praticados em São Paulo. Custos e preços em Euro/tonelada.....	70
Tabela 4.1 – Massa específica dos concretos no estado fresco.	72
Tabela 4.2 – Massa específica do concreto no estado endurecido.	73
Tabela 4.3 – Resistência à tração aos 28 dias de idade	80
Tabela 6.1 – Composição granulométrica do agregado gráudo natural (micaxisto)	114
Tabela 6.2 – Composição granulométrica do agregado gráudo reciclado (AGR)	116

Tabela 6.3 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo AMN - areia lavada de rio	122
Tabela 6.4 – Parâmetros de dosagem dos concretos “pobres” – Traço 1 : 6,5	124
Tabela 6.5 – Parâmetros de dosagem dos concretos “normais” – Traço 1 : 5,0	124
Tabela 6.6 – Parâmetros de dosagem dos concretos “ricos” – Traço 1 : 3,5.	124
Tabela 6.7 – Valores comparativos entre massas específicas dos CR e CAGR100	127
Tabela 6.8 – Resultados dos ensaios das propriedades mecânicas dos concretos: resistência à compressão, módulo de deformação tangente inicial e tração por compressão diametral.	134
Tabela 6.9 – Percentuais de ganho de resistência à compressão de 3 para 7 dias de idade	138
Tabela 6.10 – Percentuais de ganho de resistência à compressão de 7 para 28 dias de idade	140
Tabela 6.11 – Percentuais de ganho de resistência à compressão de 28 para 56 dias de idade	142
Tabela 6.12 – Percentuais de ganho de resistência à compressão de 3 para 7 dias, 7 para 28 dias e 28 para 56 dias de idade.	143
Tabela 6.13 – Valores de resistência à tração e à compressão e razão tração/compressão, em percentual, aos 28 dias de idade.	145
Tabela 6.14 – Equações de dosagem relativas à resistência à compressão (f_{cd}) em função da relação água / cimento (a/c): $f_{cd} = f(a/c)$ e sua correspondente inversa: $a/c = f(f_{cd})$	151
Tabela 6.15 – Equações de dosagem – teor de agregados secos (m) em função da relação água / cimento (a/c): $m = f(a/c)$ e sua correspondente inversa: $a/c = f(m)$; e equações de dosagem – teor de agregados secos (m) em função do consumo (C): $m = f(C)$ e sua correspondente inversa: $C = f(m)$	152
Tabela 6.16 – Equações de dosagem – resistência à compressão (f_{cd}) em função do consumo (C): $f_{cd} = f(C)$ e sua correspondente inversa: $C = f(f_{cd})$	152
Tabela 6.17 – Equações de dosagem – resistência à tração por compressão diametral (f_{td28}) em função da relação água/cimento (a/c): $f_{td28} = f(a/c)$ e sua correspondente inversa: $a/c = f(f_{td28})$	155

- Tabela 6.18** – Equações de dosagem – teor de agregados secos (m) em função da relação água / cimento (a/c): $m = f(a/c)$ e sua correspondente inversa: $a/c = f(m)$; e equações de dosagem – teor de agregados secos (m) em função do consumo (C): $m = f(C)$ e sua correspondente inversa: $C = f(m)$ 156
- Tabela 6.19** – Equações de dosagem – resistência à tração por compressão diametral (f_{td28}) em função do consumo (C): $f_{td28} = f(C)$ e sua correspondente inversa: $C = f(f_{td28})$ 156
- Tabela 6.20** – Equações de dosagem – módulo de deformação tangente inicial (Ec_{i28}) em função da relação água / cimento (a/c): $Ec_{i28} = f(a/c)$ e sua correspondente inversa: $a/c = f(Ec_{i28})$ 159
- Tabela 6.21** – Equações de dosagem – teor de agregados secos (m) em função da relação água / cimento (a/c): $m = f(a/c)$ e sua correspondente inversa: $a/c = f(m)$; e equações de dosagem – teor de agregados secos (m) em função do consumo (C): $m = f(C)$ e sua correspondente inversa: $C = f(m)$ 160
- Tabela 6.22** – Equações de dosagem – módulo de deformação tangente inicial (Ec_{i28}) em função do consumo (C): $Ec_{i28} = f(C)$ e sua correspondente inversa: $C = f(Ec_{i28})$ 160

RESUMO

Para minimização significativa dos impactos sócio-ambientais e econômicos provocados com o entulho gerado pela indústria da construção civil, a reciclagem destes resíduos apresenta-se como caminho alternativo e eficiente. Mediante esta perspectiva, buscou-se nesta dissertação verificar o comportamento de concretos produzidos com agregado graúdo reciclado (AGR), proveniente das frações minerais contidas no entulho (RCD) de um edifício de múltiplos pavimentos, a partir de coleta seletiva na obra e posterior beneficiamento do material em sistema de britagem. Foram estudados os efeitos de substituições gradativas do agregado graúdo natural (AGN) por AGR de RCD, nas propriedades fundamentais dos concretos, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Para o desenvolvimento experimental foram produzidos concretos em três proporções de dosagem: (1 : 3,5), (1 : 5,0) e (1 : 6,5) – (cimento : agregados secos), e cinco teores de substituição (0%, 25%, 50%, 75% e 100%) do AGN por AGR, totalizando, desde modo, 15 proporções de dosagem estudadas. A trabalhabilidade, teor de ar aprisionado e massa específica foram as propriedades estudadas nos concretos em estado fresco. As propriedades avaliadas no estado endurecido dos concretos foram absorção de água, massa específica, índice de vazios, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de deformação. As resistências dos concretos produzidos com teores de AGR apresentaram-se inferiores aos correspondentes concretos de referência – 0% de teor de substituição do AGN por AGR. Entretanto, na proporção em que se reduziu o consumo de cimento nas dosagens, os concretos produzidos com AGR apresentaram valores de resistências à compressão e à tração mais próximos aos resultados aferidos para os concretos de referência. Os experimentos conduziram a concluir que, tanto do ponto de vista técnico quanto econômico, os concretos produzidos com AGR de RCD podem ser normalmente utilizados na construção civil, desde que as dosagens das misturas e o controle de qualidade destes concretos sejam realizados sob responsabilidade de profissionais comprovadamente habilitados e especializados.

Palavras-chave: Gerenciamento de resíduos da construção; Desenvolvimento sustentável; Resíduos de construção e demolição; RCD; Agregados reciclados; Concreto.

ABSTRACT

Recycling waste materials is an efficient way to hinder environmental, social and economic impacts of the civil construction industry. This dissertation aimed at verifying the behavior of different concretes made of coarse recycled aggregate (AGR), mineral fractions collected from the waste (RCD) of a high-rise apartment building (multiple floor building). The RCD has been selectively collected at the building construction site and processed by a jaw crusher. The study focused on the effects of gradual replacements of coarse natural aggregate (AGN) by AGR where the fundamental properties of the fresh and hardened concretes are concerned. The experiment involved the production of three dry aggregate/cement ratios: (3,5 / 1), (5 / 1) and (6,5 / 1) for each concrete family (zero%, 25%, 50%, 75% and 100% replacement contents of AGN by AGR), and thus 15 different concrete mix proportions were manufactured. Workability, entrapped air, and density were the variables analyzed in the fresh concretes. Furthermore, water absorption, density, total pores volume, compressive strength, splitting-tensile strength, and initial-tangent modulus were the properties studied in hardened concretes. The strengths of concretes with AGR contents are lower than those of corresponding reference concretes (zero% of replacement content of AGN by AGR). However, reductions in the cement content in mixtures of the concretes produced with AGR showed compressive and splitting-tensile strengths values nearer to those of the reference concrete family. The experiment allows for the conclusion that concretes produced from AGR of RCD can be used for several purposes in civil construction, if the management of concrete mix proportions and the control of quality are performed under the liability of capable and qualified professionals.

Keywords: Construction wastes management; Sustainable development; Construction & demolition wastes; C&D wastes; Recycled aggregates; Concrete.

1 INTRODUÇÃO

Os resíduos sólidos gerados pelo setor da construção civil têm preocupado autoridades responsáveis e comprometidas com a sustentabilidade, em diversos níveis governamentais, assim como também trazem preocupações às instituições de pesquisas, em âmbito mundial, quanto aos seus efeitos indesejáveis sobre o meio ambiente, quando não tratados de formas adequadas. No Brasil, a deposição destes materiais residuários, em áreas urbanas, raramente obedece a um critério balizado em condições técnicas apropriadas. Ou seja, os resíduos de construção e demolição (RCD) não sofrem os devidos e adequados tratamentos alicerçados em técnicas de gestão, gerenciamento e planejamento. A geração dos RCD, sem políticas que conduzam ao beneficiamento eficaz destes materiais e seus posteriores reaproveitamentos (reutilizações), provoca impactos indesejáveis ao meio ambiente. Em muitas situações, estes impactos ambientais são de naturezas irreversíveis ou de altos custos adicionais às administrações públicas. Estas situações de agressões ambientais ocorrem durante todas as etapas construtivas de diversos tipos de obras, bem como ao longo da vida útil das edificações executadas e de suas necessárias manutenções, reformas e/ou demolições.

A parcela percentual representada pelos resíduos de construção, em relação ao total dos resíduos sólidos urbanos, medidos em massa, pode atingir valores entre 50% a 80% em cidades de grande e médio porte, segundo Pinto (1997). Desta forma, os problemas ocorrem, principalmente, devido a falta de locais para deposição destes resíduos que são, então, clandestinamente descartados em terrenos baldios, nas margens de pequenos cursos de água e ao longo de vias públicas da periferia (LATTERZA; MACHADO JR, 2003, p. 28). Assim, a degradação ambiental decorrente desta prática demanda elevados custos econômicos relacionados às manutenções corretivas em sistemas de saneamento. Além disso, velhos aterros estão sendo rapidamente preenchidos e locais para a implantação de novos estão se tornando cada vez mais escassos e afastados das cidades.

Os resíduos das atividades de construção e demolição (RCD) apresentam-se como um dos principais problemas nas áreas urbanas, pois as quantidades geradas e os descartes inadequados, além de provocar diversos impactos ambientais negativos, causam, também, indesejáveis impactos sociais e econômicos. O desenvolvimento e implantação de tecnologias adequadas, que busquem a redução, reutilização e reciclagem dos resíduos da construção, passam a ser as soluções para estes problemas urbanos. Desta forma, promover-se-ia a

contribuição efetiva para a minimização desses impactos ambientais, a preservação de recursos naturais e a melhoria da qualidade de vida (CARNEIRO et al., 2001).

1.1 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TEMA

Visando vantagens ambientais, econômicas e sociais a reciclagem de materiais residuários provenientes da construção civil tem despertado interesses nos mais diversos segmentos da sociedade, sobretudo nos pesquisadores impulsionados pela relevância sócio-econômica do tema. As obras de construção civil geram volumes consideráveis de resíduos que, por sua vez, são causadores de sérios problemas ao meio ambiente e às administrações públicas municipais. Estes volumes significativos de entulho acarretam custos adicionais às prefeituras, tais como os associados ao transporte dos RCD aos locais de deposição, ao preparo de novas áreas adequadas para acondicionamentos e as manutenções em sistemas de saneamento, ocasionados por deposições naturais e indesejáveis destes materiais residuários (JOHN, 2000; GÜNTHER, 2000; PINTO, 1999).

Um outro problema que a construção civil experimenta é a falta de matéria-prima, tal como o de agregados para a produção de concretos. A areia de rio e brita provenientes de jazidas naturais, tradicionalmente utilizadas para a produção de concreto estrutural ou não, estão cada vez mais escassas, além de ser, também, um problema ambiental a extração destes materiais (JOHN, 2000; CURWELL; COOPER, 1998; GÜNTHER, 2000).

A disponibilidade de agregados naturais com propriedades satisfatórias apresenta-se crítica em muitas áreas urbanas, e as distâncias entre os depósitos de material natural e os locais de novas construções têm aumentado, o que ocasiona custos de transporte correspondentemente maiores (HANSEN, 1992).

Os resíduos da construção civil podem ter um grande número de finalidades, desde que devidamente tratados e analisados. Segundo Hansen (1992), uma vez que o agregado tenha sido britado, peneirado e se necessário descontaminado, pode-se encontrar aplicações destes materiais na própria indústria da construção civil.

Como afirmou Brown (1996), a utilização de concretos com agregados reciclados mostra significativo potencial. O grande desafio é estabelecer uma política de utilização desses materiais residuários em larga escala, possibilitando, assim, uma redução de custos e um planejamento estratégico de sua produção, de acordo com os materiais disponíveis e as necessidades de cada região.

Os pesquisadores Andrade, Rocha e Cheriaf (2004, p. 1), assim relataram sobre os interesses pela reciclagem de RCD e perspectivas futuras:

As pesquisas e o interesse pela reciclagem de materiais de construção têm mostrado constante evolução ao longo dos últimos tempos. É um fato que a utilização de materiais reciclados na construção civil apresenta excelentes perspectivas para o futuro. Em muitos casos têm-se verificado satisfatória viabilidade técnica e econômica para o reaproveitamento imediato dos materiais reciclados.

A análise da viabilidade técnica e econômica é uma questão bastante complexa, visto que os materiais, os processos de utilização e os fatores econômicos envolvidos são variáveis de acordo com cada região e com as diversas atividades da indústria da construção civil (ANDRADE; ROCHA; CHERIAF, 2004, p. 1).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

A partir do conhecimento prévio de que a qualidade dos agregados utilizados na produção de concretos influencia diretamente suas propriedades, e que o consumo de material cimentício necessário e suficiente a uma correta e adequada dosagem¹ deve satisfazer a boa conjugação do binômio custo-benefício, tem-se por objetivo geral estudar algumas propriedades fundamentais dos concretos produzidos com agregado graúdo reciclado (AGR), obtido da fração mineral do entulho de construção predial (RCD), após processamento em sistema convencional de britagem.

1.2.2 Objetivos Específicos

Objetiva-se, especificamente, para esta pesquisa:

- ✚ Avaliar algumas propriedades físicas do agregado graúdo reciclado (AGR) proveniente da fração mineral dos resíduos sólidos da construção (RCD) predial, em fase construtiva das estruturas de concreto armado e alvenarias, tais como a composição granulométrica, massa específica do agregado seco, massa unitária, massa específica do agregado na condição saturado com

¹ Entende-se por dosagem correta e adequada, quando os procedimentos de dosagem garantem bom desempenho aos concretos produzidos, tanto em seus estados frescos quanto em seus estados endurecidos, em atendimento às especificações técnicas e às exigências específicas requeridas em cada situação construtiva.

superfície seca (SSS), abrasão *Los Angeles*, índice de absorção de água e composição por análise visual;

- ✚ Avaliar a influência das substituições, parcial e total, de agregado graúdo natural (AGN – brita de micaxisto) por agregado graúdo reciclado (AGR), nas propriedades do concreto em seu estado fresco, tais como a trabalhabilidade (medidas de consistência), massa específica e teor de ar aprisionado;
- ✚ Avaliar a influência das substituições, parcial e total, do AGN por AGR, nas propriedades do concreto em seu estado endurecido, tais como a absorção de água por imersão, resistência à compressão axial, tração por compressão diametral e módulo de deformação tangente inicial.
- ✚ Comparar os resultados obtidos dos concretos dosados com AGR aos resultados pertinentes aos concretos de referência, dosados com agregados graúdo e miúdo naturais (AGN e AMN).

1.3 ESTRUTURA E ABRANGÊNCIA DA PESQUISA

A dissertação apresenta-se dividida em sete capítulos. O primeiro capítulo traz, sinteticamente, informações sobre a importância e os objetivos da pesquisa.

O segundo capítulo tem foco no panorama geral sobre os resíduos sólidos provenientes das construções e demolições (RCD), abordando aspectos históricos, nomenclatura, impactos econômico-ambientais causados pelos RCD, potencialidades e processos de reciclagem destes materiais residuários da construção civil.

O terceiro capítulo apresenta uma visão geral sobre o AGR de RCD e suas propriedades mais relevantes para a produção de concretos.

O quarto capítulo trata das propriedades fundamentais dos concretos produzidos com AGR de RCD, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, e suas propriedades de uso na construção civil.

O quinto capítulo refere-se à parte experimental desta pesquisa. Ressalta os materiais e métodos utilizados, bem como os procedimentos adotados nos ensaios de caracterização dos agregados utilizados. Ainda, este capítulo apresenta detalhes dos procedimentos relativos ao método de dosagem adotado para produzir os diversos concretos e

demais ensaios de caracterização de suas propriedades, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

As apresentações e análises de resultados dos ensaios de caracterização dos agregados utilizados e demais experimentos realizados na produção de concretos são mostrados no sexto capítulo.

No sétimo e último capítulo apresentam-se as considerações finais, conclusões e sugestões para pesquisas posteriores.

2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

2.1 HISTÓRICO

Segundo Pinto (2001, p.87), “a atividade construtiva sempre se caracterizou como grande geradora de resíduos e também como potencial consumidora dos resíduos gerados por ela mesma ou por outras atividades humanas de transformação”.

Os pesquisadores Levy; Helene (2002) apresentaram levantamentos que demonstram a preocupação sistemática com a aplicação do entulho reciclado somente a partir da 2ª Guerra Mundial. Dizem os autores:

Quanto à produção de concretos com agregados obtidos a partir de resíduos minerais reciclados, pode-se dizer que só a partir de 1928, começaram a ser desenvolvidas pesquisas de forma sistemática, para avaliar o consumo de cimento, a quantidade de água e o efeito da granulometria dos agregados, oriundos de alvenaria britada e de concreto. Porém, a primeira aplicação significativa de entulho reciclado, só foi registrada após o final da 2ª Guerra Mundial, na reconstrução das cidades Européias, que tiveram seus edifícios totalmente demolidos e o escombros ou entulho resultante, foi britado para produção de agregados visando atender à demanda na época (WEDLER; HUMMEL, 1946). Assim, pode-se dizer que a partir de 1946 teve início o desenvolvimento da tecnologia de reciclagem do entulho de construção civil. (p. 7)

Os autores mostram ainda, nos seus levantamentos, que mesmo tendo uma origem em meados do século XX, no pós-guerra, as técnicas utilizadas para reciclagem não foram totalmente absorvidas pela construção civil mundial. “Embora as técnicas de reciclagem dos resíduos minerais de construção civil tenham evoluído, não se pode afirmar com absoluta convicção que a reciclagem tenha se tornado uma idéia amplamente difundida.” (LEVY; HELENE, 2002, p. 7).

No entanto, alguns países já demonstram esta preocupação há décadas, quando investiram em pesquisas que viabilizaram a utilização de resíduos, a princípio descartáveis para a construção civil, agregando benefícios para a redução do impacto ambiental, econômico e social, quando da produção de concretos com agregados reciclados de qualidades satisfatórias e controladas.

Na Alemanha, Bélgica, França, Holanda e Japão, dentre outros países com destacada evolução tecnológica, as pesquisas têm sido intensas, sob o entendimento de que há necessidade proeminente de reciclagem dos resíduos sólidos gerados pela construção civil.

Estas pesquisas visam atingir um modelo satisfatório de procedimentos para a produção de agregados reciclados, com delimitação do padrão mínimo de qualidade requerida. A Comunidade Européia (C. E.), a partir de 1998, teve experiência com a execução de inúmeras obras, nas quais se utilizou concretos produzidos com agregados reciclados de RCD e, algumas destas, são de grande porte (LEVY, 1997).

A Europa pode ser considerada uma referência em gestão, gerenciamento e produção de agregados reciclados para concretos, em diferentes instâncias, tanto no investimento em novas usinas recicladoras como em empenho na produção de equipamentos para o sistema de reciclagem de RCD. Percebe-se que é um investimento de diferentes setores da cadeia produtiva em prol da redução e minimização do impacto ambiental, econômico e social causados por esses resíduos da construção. Além do que, neste continente, os concretos produzidos com agregados reciclados de RCD têm várias utilidades para a construção civil. Dessa forma, isso evidencia a situação desfavorável em que o Brasil se encontra em relação aos patamares tecnológicos verificados em outros países (LEVY, 1997).

Por outro lado, o Brasil possui condições geológicas e mineralógicas mais favoráveis do que a Europa. Este fato faz com que a preocupação, acerca do material reciclado, não tenha despertado tanto interesse à cadeia produtiva da construção civil brasileira e nem à sociedade de uma forma geral. No entanto, a preocupação brasileira, quanto à produção de concretos com materiais reciclados, já começa a atingir a iniciativa privada e o poder público, os quais buscam equacionar e gerenciar o problema da geração de entulhos da construção, eminentemente nas grandes cidades do país. Frente a este panorama, soluções tecnicamente viáveis são buscadas por intermédio de pesquisas, em várias universidades nacionais (LEVY; HELENE, 2002, p. 10).

No Brasil, a conclusão do primeiro estudo sistematizado para a utilização de resíduos de construção e demolição foi em 1986, realizado pelo arquiteto Tarcísio de Paula Pinto. Esta pesquisa consistiu em estudar o uso de reciclado para a produção de argamassas. O processo de reciclagem nacional de RCD teve início em 1991, na cidade de Belo Horizonte - MG. A partir disso, alguns estudos foram desenvolvidos em universidades brasileiras com objetivo de um melhor entendimento acerca das características e comportamento deste tipo de material residuário. Atualmente, as estações de tratamento de RCD começam a ser implantadas em alguns estados brasileiros (LEITE, 2001, p. 11).

Na cidade de Goiânia-GO, em meados do ano de 2004, teve início a primeira iniciativa formal e efetiva sobre as questões relativas ao gerenciamento de resíduos sólidos de construção. Nesta oportunidade, uniram-se pesquisadores da Universidade de Brasília (UnB),

Universidade Federal de Goiás (UFG), empresas construtoras, empresas de coleta e transporte de entulho, Sindicatos da Indústria da Construção de Goiás (SINDUSCON-GO) e do Distrito Federal (SINDUSCON-DF), Câmara Brasileira da Indústria da Construção e alguns órgãos da Prefeitura de Goiânia, com intuito de redigirem o documento intitulado “Programa de Gerenciamento de Resíduos Sólidos em Canteiros de Obras”, tendo como referência o chamado “Programa de Gestão de Materiais” (PGM), idealizado pela UnB e pelo SINDUSCON-DF.

O resultado desta parceria foi a elaboração de um projeto piloto, editado sob a forma de cartilha, contendo informações básicas para a gestão adequada dos resíduos sólidos da Indústria da Construção (RCD). Esta cartilha serviu de instrumento balizador de procedimentos sistematizados para que fossem atendidas as exigências contidas na Resolução N.º 307 do CONAMA (2002), no que diz respeito às responsabilidades dos construtores quanto ao manejo e destinação ambientalmente adequados dos seus resíduos gerados, assim como as obrigações atribuídas às prefeituras, também referidas nesta regulamentação federal supracitada.

Para tanto, submeteram-se à implantação deste projeto piloto cinco empresas construtoras da cidade de Goiânia-GO e seis construtoras de Brasília-DF. Este projeto piloto teve objetivos fundamentais de promover, motivar, e fornecer diretrizes às construtoras envolvidas para que pudessem, por conseguinte, elaborar seus próprios projetos de gerenciamento de resíduos sólidos com aplicabilidade e exequibilidade nos canteiros de obras. Este projeto piloto ainda serviu de ferramenta a ações educativas necessárias na Prefeitura de Goiânia, para que esta, por sua vez, pudesse colocar em prática o seu intitulado “Programa Municipal de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil”.

Em visitas às construtoras, em órgãos da Prefeitura de Goiânia e em sua usina de britagem, em outubro de 2005, constatou-se que os procedimentos e demais ações necessárias para efetivo funcionamento dos programas elaborados, tanto por parte das construtoras como da Prefeitura, ainda não se encontravam integralmente implantados e não apresentavam resultados eficientes em relação aos propósitos para os quais foram criados. Verifica-se, atualmente, que o panorama municipal citado ainda persiste sem avanços.

2.2 NOMENCLATURAS

A resolução N.º. 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA 307 - de 05 de julho de 2002, que estabelece as diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão

dos resíduos da construção civil, e que obriga os geradores e prefeituras a tomarem medidas para a diminuição, a reciclagem e a disposição adequada dos resíduos de construção e demolição gerados, apresenta em seu artigo 2º as seguintes definições:

I - Resíduos da construção civil: são os 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;

II - Geradores: são pessoas, físicas ou jurídicas, públicas ou privadas, responsáveis por atividades ou empreendimentos que gerem os resíduos definidos nesta Resolução;

III - Transportadores: são as pessoas, físicas ou jurídicas, encarregadas da coleta e do transporte dos resíduos entre as fontes geradoras e as áreas de destinação;

IV - Agregado reciclado: é o material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção que apresentem características técnicas para a aplicação em obras de edificação, de infra-estrutura, em aterros sanitários ou outras obras de engenharia;

V - Gerenciamento de resíduos: é o sistema de gestão que visa reduzir, reutilizar ou reciclar resíduos, incluindo planejamento, responsabilidades, práticas, procedimentos e recursos para desenvolver e implementar as ações necessárias ao cumprimento das etapas previstas em programas e planos;

VI - Reutilização: é o processo de reaplicação de um resíduo, sem transformação do mesmo;

VII - Reciclagem: é o processo de reaproveitamento de um resíduo, após ter sido submetido à transformação;

VIII - Beneficiamento: é o ato de submeter um resíduo a operações e/ou processos que tenham por objetivo dotá-los de condições que permitam que sejam utilizados como matéria-prima ou produto;

IX - Aterro de resíduos da construção civil: é a área onde serão empregadas técnicas de disposição de resíduos da construção civil Classe "A" no solo, visando a reservação de materiais segregados de forma a possibilitar seu uso futuro e/ou futura utilização da área, utilizando princípios de engenharia para confiná-los ao menor volume possível, sem causar danos à saúde pública e ao meio ambiente;

X - Áreas de destinação de resíduos: são áreas destinadas ao beneficiamento ou à disposição final de resíduos.

Ainda, a Resolução CONAMA 307, em seu artigo 3º, classifica os resíduos da construção civil em:

I - Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:

- a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infra-estrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
- b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;
- c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;

II - Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros;

III - Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso;

IV - Classe D - são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

Vale ressaltar que o presente estudo tem foco nos materiais residuários do tipo Classe A, provenientes de obras prediais de padrão tecnológico construtivo predominantemente convencional². Doravante, estes materiais residuários (recicláveis) originários da construção civil serão denominados de RCD.

Para melhor compreensão deste estudo e comodidade na leitura, algumas siglas serão previamente apresentadas e convencionadas:

RSU: resíduos sólidos urbanos;

RCD: resíduo ou resíduos de construção;

AMN: agregado miúdo natural (rocha);

AGN: agregado graúdo natural (rocha);

AMR: agregado miúdo reciclado de RCD;

AGR: agregado graúdo reciclado de RCD.

AMN e AGN devem ser entendidos como agregados miúdo e graúdo provenientes da britagem de rochas naturais.

AMR e AGR devem ser entendidos como agregados miúdo e graúdo provenientes do processo de reciclagem de RCD, respectivamente.

² Entende-se por tecnologia construtiva convencional aquelas aplicadas às edificações que se utilizam do concreto armado, como sistema estrutural predominante em suas construções, e que tenham o sistema de vedação vertical (paredes) executado com tijolos cerâmicos assentados e revestidos com argamassa.

2.3 FONTES GERADORAS E ESTIMATIVAS QUANTI-QUALITATIVAS DE RCD

Num passado muito próximo, no Brasil, seria muito difícil se estimar a quantidade gerada de RCD. Somente era possível avaliar a frequência com que se formavam as “montanhas” de entulho em locais urbanos. Todavia, com as informações provindas de pesquisas mais recentes, pode-se estimar as quantidades geradas de RCD em regiões urbanas. Numa cidade de médio e grande porte, os RCD são, sem dúvida, a maior parte do total de resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados (PINTO, 1999, p. 15).

De acordo com Swana (1993 apud Pinto, 1999, p. 16), “a classificação da origem dos RCD proposta pela *The Solid Waste Association of North America* é bastante útil para a quantificação de sua geração”. De acordo com o pesquisador, os RCD podem advir de:

- Material de obras viárias;
- Material de escavação;
- Demolição de edificações;
- Construção e renovação [reforma] de edifícios; e
- Limpeza de terrenos.

Em função da diversidade de tecnologias construtivas, a composição dos RCD varia de acordo com as peculiaridades tecnológico-construtivas predominantes em cada país. Por exemplo, a madeira é muito presente nas construções americanas e japonesas, o que já não ocorre, significativamente, em construções européias e brasileiras. Analogamente, o gesso é material abundantemente encontrado em RCD provenientes de construções americanas e européias. Fato este que não se verifica para a realidade brasileira, que iniciou há pouco tempo a incorporação de novas tecnologias construtivas que se utilizam deste tipo de material (gesso), em substituição às alvenarias convencionais, por exemplo. Da mesma forma, verificam-se variações na composição de RCD provenientes de obras de infra-estrutura viária (PINTO, 1999, p. 15-16).

Para Lauritzen (1998, p. 507), a quantidade gerada de resíduos depende da intensidade da atividade de construção em cada país, da tecnologia empregada, da taxa de desperdícios e das manutenções. O autor afirma que essa quantidade de RCD gerados, em

uma determinada região urbanizada, pode também aumentar significativamente em função de desastres naturais ou guerra.

As pesquisas sobre os desperdícios ou perdas³ de materiais em execuções de obras brasileiras permitem afirmar que o valor quantitativo (taxa) destes desperdícios situa-se entre 20 e 30%, em relação à massa total de materiais aplicados, dependendo do padrão tecnológico do executor da obra. As empresas construtoras, que utilizam tecnologia construtiva convencional, apresentam valores elevados e expressivamente variáveis de perdas de materiais, em execuções de obras, o que contribui expressivamente na geração de RCD. Estes desperdícios estão representados na Tabela 2.1, em função de alguns materiais que são pertinentes a este padrão construtivo (PINTO, 1999, p. 17).

Tabela 2.1 - Perda de materiais em processos construtivos convencionais, conforme pesquisa nacional em 12 estados e pesquisas anteriores.

Materiais	Pinto (1)	Soibelman (2)	FINEP/ITQC (3)
Concreto usinado	1,5%	13%	9%
Aço	26%	19%	11%
Blocos e tijolos	13%	52%	13%
Cimento	33%	83%	56%
Areia	39%	44%	44%

(1) Valores de uma obra (PINTO, 1989)

(2) Média de 5 obras (SOIBELMAN, 1993)

(3) Mediana de diversos canteiros (SOUZA et al., 1998)

Fonte: Pinto (1999, p. 17)

As quantidades geradas de RCD, em centros urbanos, podem ser levantadas a partir de três informações básicas: 1) das estimativas de área construída – serviços executados e perdas efetivas; 2) da movimentação de cargas por coletores de RCD; e 3) do monitoramento de descargas nas áreas utilizadas como destino dos RCD.

O levantamento da quantidade de RCD gerados, com base na terceira informação citada, é extremamente dificultoso, tanto pela pulverização das descargas em vários pontos de descarga nos espaços urbanos, quanto pela impossibilidade de acompanhamento físico das descargas em cada ponto, por longo período de tempo.

³ “É considerada como perda a quantidade de material sobreutilizada [utilizada em excesso] em relação às especificações técnicas ou às especificações de projeto, podendo ficar incorporada ao serviço ou transformar-se em resíduo”. “A perda média de materiais nos processos construtivos, em relação à massa de materiais levados ao canteiro de obra é de 25%” (PINTO, 1999).

A partir destas informações supracitadas, e de outros dados necessários a este tipo de equacionamento, foi estimado um valor de 150 kg de RCD por metro quadrado construído, quando foram vários municípios brasileiros os objetos de estudo para o pesquisador Pinto (1999, p. 32-34). A Tabela 2.2 mostra a geração de RCD e sua equivalência (taxa) em relação ao total de resíduos sólidos urbanos gerados, em algumas cidades brasileiras.

Tabela 2.2 - Geração de RCD em algumas cidades brasileiras (LEITE, 2001).

Cidades	População (milhões de habitantes)	Geração de entulho (t/dia)	% de entulho em relação aos resíduos sólidos urbanos
São Paulo ⁽¹⁾	15,00	5000	-
Porto Alegre ⁽²⁾	1,20	350	-
Salvador ⁽³⁾⁽⁶⁾	2,20	1700	37
Ribeirão Preto ⁽¹⁾	0,46	1043	67
São José do Rio Preto ⁽⁵⁾	0,32	687	-
Jundiaí ⁽⁵⁾	0,29	712	-
Santo André ⁽⁴⁾	0,63	1013	58
Belo Horizonte ⁽¹⁾	2,01	1200	51
Vitória da Conquista ⁽⁵⁾	0,24	310	-
São José dos Campos ⁽¹⁾	0,50	733	65

Fontes: (1) Contrução (1996); (2) Costa (1998); (3) Vieira et. Al. (1998); (4) Lima e Tamai (1998); (5) Pinto (2000); (6) Carneiro et al. (2000)

Pinto (1999, p. 42) evidenciou a relevância do levantamento de dados sobre a participação percentual dos RCD em relação ao total de resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados, em diversos municípios brasileiros, pois, assim, permite-se a comparação destes valores entre um local e outro.

Quando o enfoque é direcionado às grandes cidades brasileiras, que geram quantidades expressivas de resíduos sólidos urbanos (RSU), os RCD chegam a atingir uma razão da ordem de 2/3 do total destes RSU coletados (PINTO, 1996). E, ainda, em média, 90% da massa total dos RCD gerados no Brasil é de origem mineral, ou seja, material potencialmente adequado à reciclagem (britagem) e posterior reutilização .

Vrijling (1991 apud John 2000, p. 42) afirma que “alternativamente à pesquisa direta com as empresas, a quantidade de resíduos pode ser estimada através de correlações entre o volume de produção de determinado bem com índices médios de produção de resíduos publicados em bibliografias [...]”.

A Tabela 2.3 apresenta a taxa de geração dos RCD e sua incidência em relação aos RSU, em diversos locais do Brasil e do mundo.

Tabela 2.3 – Participação dos RCD nos RSU e taxa de geração em localidades diversas (PINTO, 1999, p. 42).

Localidades	Participação dos RCD na massa total de RSU	Taxa de geração (t/habitante/ano)
Santo André / SP	54%	0,51
São José do Rio Preto / SP	58%	0,66
São José dos Campos / SP	67%	0,47
Ribeirão Preto / SP	70%	0,71
Jundiaí / SP	62%	0,76
Vitória da Conquista / BA (1)	61%	0,40
Belo Horizonte / BA (3)	54%	0,34
Campinas / SP (2)	64%	0,62
Salvador / BA (3)	41%	0,23
Europa Ocidental (4)	~66%	0,7 a 1,0
Suíça (5)	~45%	~0,45 (*)
Alemanha (6)	> 60%	--
Região Bruxelas - Bélgica (7)	> 66%	--
EUA (8)	39% (*)	--
Vermont State (9)	48%	--
Japão (10)	--	~0,68 (**)
Hong Kong (10)	--	~1,50 (**)

(1) Considerados apenas os RCD dispostos em aterro público - abril 1999 (SUPERINTENDÊNCIA DE LIMPEZA URBANA SLU, 1999)

(2) Paulella; Sacpim, 1996

(3) Considerados apenas os RCD dispostos em aterro público (EMPRESA DE LIMPEZA URBANA DE SALVADOR - LIMPURB, 1999)

(4) Conforme B. P. Simons, Belgian Building Research Institute, apud Lauritze

(5) Milani, 1990

(6) INTERNATIONAL E VEREINIGUNG BAUSTOFF-RECYCLING - IVBR

(7) INSTITUT BRUXELLOIS POUR LA GESTION DE L'ENVIRONNEMEN'

(8) C&D DEBRIS RECYCLING, 1998b

(9) Donovan, 1991

(10) HONG KONG, 1993

(*) Percentual em revisão (C&D DEBRIS RECYCLING, 1998c)

(**) População conforme THE TIMES, 1994

Pinto (1999) pesquisou a geração dos RCD em vários municípios brasileiros, encontrando valores significativos dos RCD em relação ao total dos RSU de cada cidade pesquisada, onde DOM corresponde à categoria domiciliar, conforme mostra a Figura 2.1.

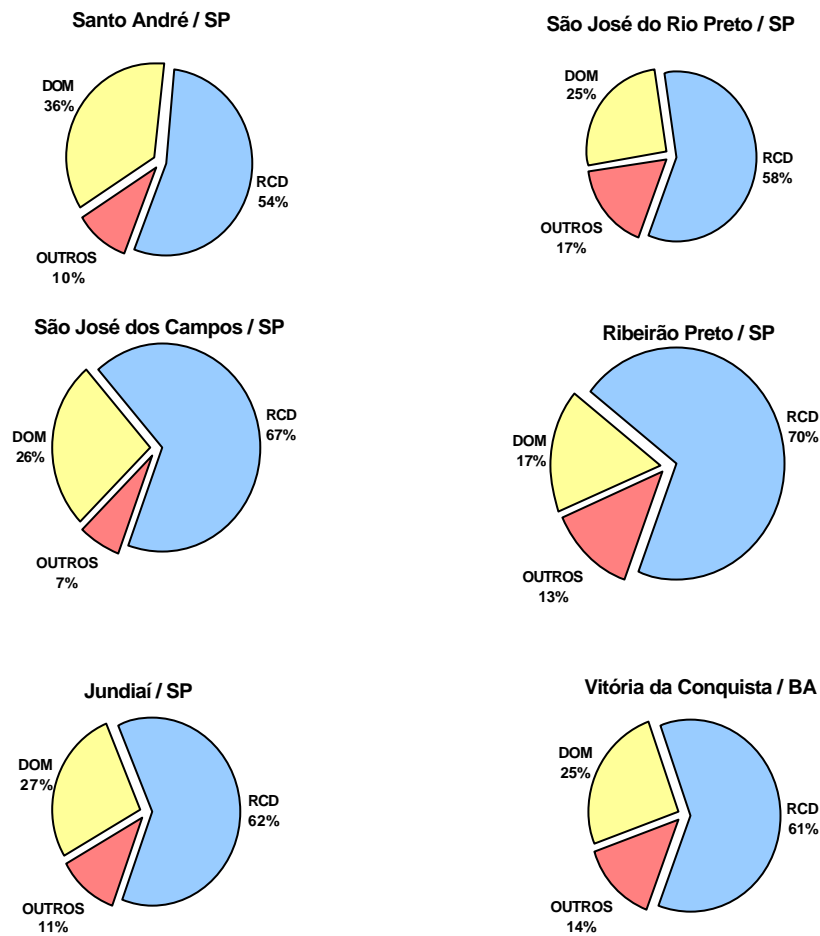


Figura 2.1 – Participação dos RCD na totalidade dos RSU gerados (PINTO, 1999).

A geração de RCD, em cidades brasileiras, tem origem predominante nas obras de construção civil, nas obras de demolições, nas reformas, ampliações e nos serviços de manutenção em edificações existentes. Para o levantamento preciso de quantitativos de RCD gerados, numa determinada cidade, seria preciso levar em consideração as obras formais e as informais. As formais são obras legais, as quais passam pelos processos de reconhecimento e aprovação em órgãos competentes do município e da federação (registros públicos). As informais são as obras que não passam por estes processos citados e correspondem às pequenas reformas, ampliações e demais construções ilegais. As obras informais são, provavelmente, responsáveis por uma significativa parcela dos RCD gerados e, conseqüentemente, a grande maioria destes resíduos não é coletada por empresas autorizadas (legais) e sim depositada em áreas irregulares (clandestinas), por transportadores também irregulares e impróprios.

Na cidade de Goiânia-GO, as quantidades mensais de RCD removidos pela Companhia Municipal de Urbanização – COMURG são apresentados na Tabela 2.4. Estes

resíduos da construção correspondem às remoções feitas em 11 (onze) setores da cidade, entre os meses de abril a dezembro de 2002.

Tabela 2.4 – Quantidades mensais de RCD removidos na cidade de Goiânia – GO (t)
(PREFEITURA DE GOIÂNIA; UnB (coord.), 2004)

Regiões	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Totais
Vale do Meia Ponte	4.982	4.271	3.960	3.811	3.842	3.457	3.859	3.596	3.874	35.652
Campinas	10.336	8.393	7.563	8.464	8.773	7.930	8.617	8.993	7.914	76.983
Central	5.498	4.123	3.946	4.295	4.532	4.673	4.238	4.727	4.321	40.353
Sul	9.053	7.801	7.020	7.640	8.312	7.154	7.514	8.448	6.947	69.889
Leste	10.731	8.406	8.098	7.610	8.718	7.856	9.080	8.539	9.214	78.252
Norte	7.454	5.412	5.305	5.791	6.016	6.498	5.510	6.387	5.624	53.997
Sudeste	4.105	3.534	3.208	3.446	3.756	3.226	3.379	3.824	3.089	31.567
Sudoeste	11.095	8.161	8.341	6.914	6.897	7.533	8.306	8.487	6.317	72.051
Oeste	6.851	5.236	5.267	4.436	4.407	4.597	5.102	5.039	4.172	45.107
Noroeste	6.507	5.550	5.345	4.704	4.622	4.206	4.768	4.194	4.760	44.656
Mendanha	4.833	4.123	3.970	3.494	3.434	3.125	3.542	3.115	3.536	33.172
Totais	81.445	65.010	62.023	60.605	63.309	60.255	63.915	65.349	59.768	581.679

Segundo dados da Relação Anual de Informações Sociais (RAIS), do Ministério do Trabalho e Emprego (MTE), apresentados em estudos realizados pela DBO Engenharia (2004, p. 149) existiam em Goiânia um total de 4.454 estabelecimentos industriais, dentre os quais 1.298 seriam relativos ao ramo da construção civil, o que perfaz uma taxa representativa de 29,16% em relação ao total destes estabelecimentos industriais.

A partir da Tabela 2.4 apresentada, a Figura 2.2 mostra as quantidades percentuais de RCD removidos pela COMURG, em relação ao total gerado, no período de abril a dezembro de 2002, por região da cidade de Goiânia-GO.

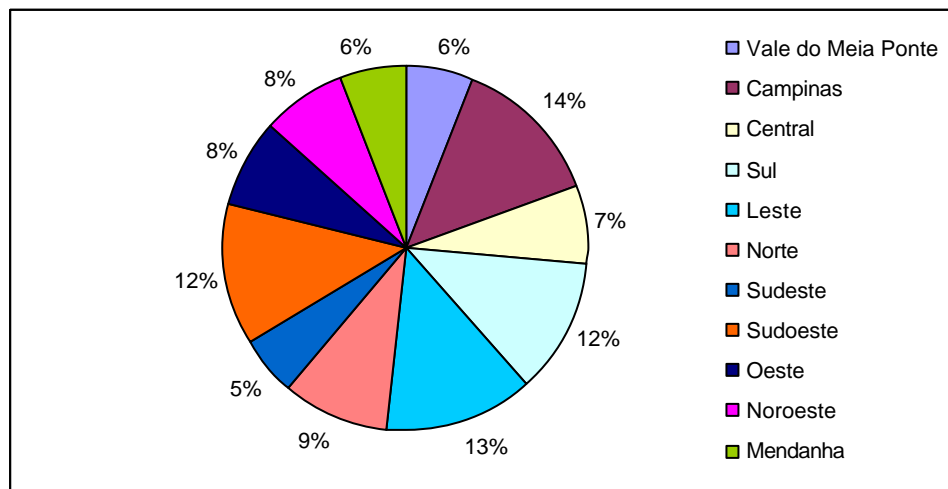


Figura 2.2 – Quantidades percentuais de RCD removidos pela COMURG, no período de abril a dezembro de 2002, por regiões da cidade de Goiânia (PREFEITURA DE GOIÂNIA; UnB, 2004, p. 10).

Os resíduos de construção (RCD), ainda sem qualquer beneficiamento (britagem), podem apresentar composições significativamente variáveis entre as quantidades de cada fase, em função de sua origem (JOHN; AGOPYAN, 2001, p. 8). A Figura 2.3 apresenta a composição característica dos RCD recebidos no aterro de Itatiba, São Paulo, predominantemente originados da construção civil predial (edifícios).

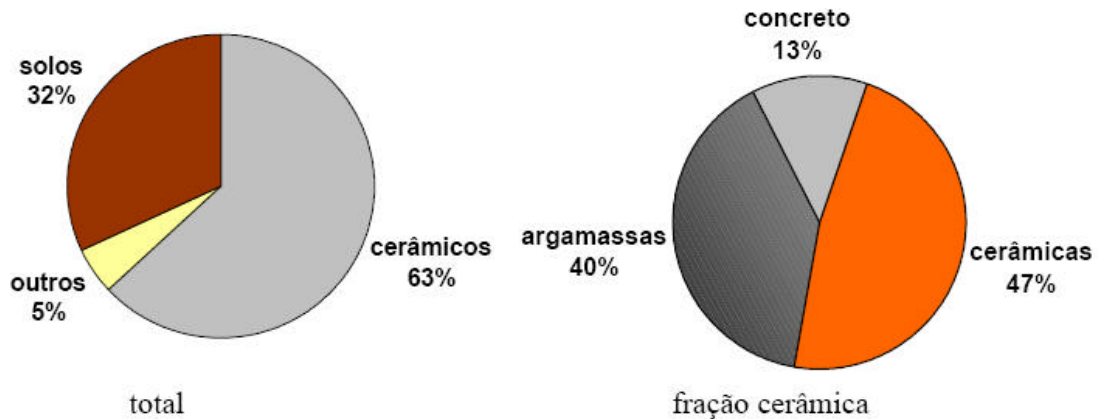


Figura 2.3 – Composição média dos entulhos depositados no aterro de Itatinga, São Paulo (a partir de BRITO FILHO, 1999 apud JOHN; AGOPYAN, 2001).

Segundo Levy (1997) a composição dos resíduos de construção depende muito da fonte (tipo de edificação ou demolição) que os originou e da etapa construtiva em que foi colhida a amostra. Os RCD conservam e evidenciam todas as características quantitativa e qualitativa das obras que os originaram, ou seja, as composições dos RCD serão tão variáveis quanto forem os tipos de materiais utilizados nas obras que os geraram, os quais, por sua vez, também podem variar em função das tecnologias construtivas utilizadas nestas obras geradoras dos RCD.

A partir dessa variabilidade citada, Zordan (2000) afirma que, provavelmente, os RCD sejam os mais heterogêneos de todos os resíduos industriais e, ainda, que suas composições químicas estão relacionadas com a composição dos materiais construtivos contidos neste tipo de entulho (RCD). Assim sendo, o material a ser reciclado possui alta heterogeneidade e sua separação total e precisa é praticamente impossível, com a tecnologia que atualmente é disponível.

A Figura 2.4 apresenta a composição dos RCD estudados por Brossink; Brouwers (1996), na Holanda.

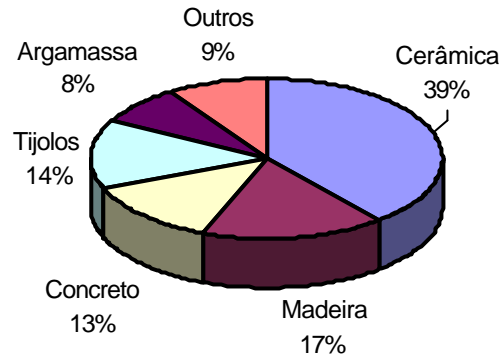


Figura 2.4 – Composição dos RCD na Holanda, em massa. (BROSSINK; BROUWERS, 1996).

Na Europa, parte significativa dos RCD provém de estradas e demolições de edifícios estruturados com concreto, em quantidades expressivas. Os fechamentos verticais (paredes) são, na maioria das vezes, painéis leves e facilmente separados nos processos de desconstrução⁴ ou demolições seletivas. Desta forma, segundo Ângulo et al (2002), os agregados reciclados destes RCD são compostos predominantemente pela fase concreto (partículas de concreto) e com baixo teor de contaminantes ou presença de outras fases.

No Brasil, os RCD apresentam elevados teores de materiais cerâmicos que são provenientes das alvenarias, devido à predominância de tecnologia construtiva convencional no país, a qual se utiliza de paredes executadas com tijolos cerâmicos, conforme pode ser observado na Tabela 2.5. Da mesma forma, a presença de madeira, em uma das fases de composição dos RCD estudados na Holanda (Figura 2.4), denuncia a utilização significativa deste material em tecnologias construtivas holandesas.

Tabela 2.5 – Composição média de RCD em algumas centrais de reciclagem brasileiras. (ÂNGULO; JOHN, 2002, p.2).

Composição (%)	São Paulo (BRITO, 1999)	Salvador (CARNEIRO et al., 2001)	Ribeirão Preto (ZORDAN, 1997)		
			Min	Med	Max
Concretos	8	53	20	21	22
Argamassas	24	-	35	37	39
Materiais Cerâmicos	33	15	16	23	30
Solos	30	21	-	-	-
Materiais Orgânicos	1	4	-	-	-
Outros	4	7	10	19	28

⁴ Desconstrução ou demolição seletiva são termos relacionados à técnica aplicada durante o processo de remoção ou desmontagem de diversos tipos de componentes da edificação para reutilização (exemplo: telhas, vidros, caixilhos etc.), seguida da demolição de fases não desmontáveis, de forma independente (ex: alvenarias, estruturas de concreto) (ÂNGULO et al., 2002).

2.4 IMPACTOS AMBIENTAIS E ECONÔMICOS CAUSADOS PELOS RCD

Deve-se conhecer e analisar, a partir dos dados apresentados no Item 2.3, os impactos ambientais que estes materiais residuários vêm produzindo, provavelmente, em escala de gradiente crescente e diretamente proporcional ao crescimento populacional.

Em função do grande volume de RCD que tem sido gerado nos centros urbanos, citado anteriormente, sem ter contado com outras fontes potencialmente geradoras deste tipo de material, tais como obras inacabadas e/ou abandonadas em situações irrecuperáveis, as quais certamente deverão ser demolidas, entende-se que os aterros municipais de descarte desses materiais serão, possivelmente, insuficientes num futuro próximo.

Além da questão da possível insuficiência destes aterros públicos urbanos para a deposição dos RCD, quando inevitavelmente necessitarão de novos locais com áreas extensas para acondicionamento adequado destes materiais residuários, aparece o problema dos descartes ilegais à beira de cursos de água e em regiões urbanas inapropriadas.

Os RCD quando depositados irregularmente podem causar enchentes, proliferação de vetores nocivos à saúde, bloqueios de vias e degradação do ambiente urbano. Às vezes estes resíduos são aceitos por proprietários de imóveis que os empregam como aterro, normalmente sem maiores preocupações com o controle técnico do processo. Nestas áreas, onde acontecem estas práticas, poderão ocorrer problemas futuros nas edificações executadas sobre estes aterros ou até mesmo acidentes graves, como o que ocorreu na Favela Nova República em São Paulo, quando um aterro com RCD se desestabilizou, causando a morte de várias pessoas, conforme afirmam John; Agopyan (2001, p. 4).

Desta forma, produz-se indesejáveis impactos ambientais e promove-se o desconforto de populações situadas em regiões próximas aos locais destas deposições impróprias dos RCD, conforme mostram as Figuras 2.5a e 2.5b.



Figura 2.5a - Descarte impróprio de RCD em Goiânia (PREFEITURA DE GOIÂNIA; UNB, 2004).



Figura 2.5b - Descarte de RCD logo após limpeza de terreno em Goiânia (PREFEITURA DE GOIÂNIA; UNB, 2004).

Após a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento Humano (ECO 92), a qual gerou o programa de ações Agenda 21⁵, iniciou-se no Brasil a cultura de conscientização necessária às ações governamentais e sociais para as questões de preservação e sustentabilidade do meio ambiente.

A Agenda 21 sobre construção sustentável publicada pela CIB⁶, em 1999, apresenta conceitos detalhados, metas e desafios para a indústria da construção atingir uma condição de maior sustentabilidade. Este documento foca, essencialmente, os países desenvolvidos. Porém, não deixou de contribuir para a discussão de uma Agenda 21 adequada ao macrocomplexo da indústria da construção civil (*construbusiness*) do Brasil. Naturalmente, para isto, relevando-se e adequando-se às diferenças ambientais, sócio-culturais e econômicas em que se apresenta o Brasil, perante os países desenvolvidos, implicou em delimitação de outras prioridades, objetivos e desafios (JOHN; SILVA; AGOPYAN, 2001).

John; Silva; Agopyan (2001) elaboraram uma proposta para a Agenda 21 brasileira, mantendo-se a estrutura apresentada pela CIB. Este documento busca proposições para o desenvolvimento da indústria da construção civil no Brasil, sob condições de construções sustentáveis. Afirmam estes autores que o termo *construbusiness* foi criado pela indústria da construção brasileira para auxiliar a sua organização política.

O conceito corresponde ao macrocomplexo da construção civil, que inclui a indústria de construção em si e todos os segmentos industriais indiretamente ligados a suas atividades, formando um dos setores de maior expressão em qualquer economia. Na União Européia, o chamado *construbusiness* responde por cerca de 11% do PIB. No Brasil, esta parcela é ligeiramente maior, estando acima de 14% (JOHN; SILVA; AGOPYAN, 2001, p. 2).

Desta forma, levando-se em consideração que os países em desenvolvimentos têm demandas e carências expressivas de construções, e que os impactos ambiental e econômico produzidos pela indústria da construção civil são bastante expressivos no Brasil, com tendência de crescimento destes impactos para o futuro, suscita entender a correlação entre os

⁵ Agenda 21 é um programa de ações que constitui a mais abrangente tentativa de promover, em escala global, um novo padrão de desenvolvimento, que busca conciliar preservação ambiental, eficiência econômica e justiça social. Foi elaborado na ECO-92 e assinada por 179 países. Este documento teve o objetivo de servir como diretriz para que cada país construísse a sua própria Agenda 21 Nacional.

⁶ CIB é um Conselho ou associação que objetiva estimular e facilitar a cooperação internacional e intercâmbio de informação entre os institutos de pesquisas governamentais, no setor da construção. Fundado em 1953, com acrônimo da abreviação escrita em língua francesa: *Conseil International du Bâtiment*. Na língua inglesa esta abreviação é escrita como *International Council for Building*. Em 1998 o nome da associação foi mudado para *International Council for Research and Innovation in Building and Construction*. <<http://www.cibworld.ul/website>>

RCD, *construbusiness* e os conseqüentes impactos ambientais e econômicos que estes materiais residuários podem prover.

Para John (2001, p.21), “a construção sustentável baseia-se na preservação e redução dos resíduos pelo desenvolvimento de tecnologias limpas no uso de materiais recicláveis ou reutilizáveis, no uso dos resíduos como materiais secundários, na coleta e deposição inerte”.

Dentro deste contexto, a sociedade brasileira deverá ainda passar por transformações nos padrões de consumo e processos de produção de bens e/ou serviços, assim como textualizaram os autores:

Certamente a construção de uma sociedade realmente sustentável passa por uma radical transformação nos padrões de consumo e processos de produção. O conceito cultural de desenvolvimento, bem estar etc. deverão ser radicalmente transformado. Isto vai requerer soluções baseadas em outros paradigmas que não os que embasaram a sociedade industrial. Novas formas de morar, tecnologias de construção radicalmente novas, etc. serão necessárias e o seu desenvolvimento precisa ser iniciado já (JOHN; SILVA; AGOPYAN, 2001, p. 2).

John, Silva e Agopyan (2001, p. 2) afirmam ainda, baseados em dados dos estudos de John (2000) e de Sjöström (2000), que o *construbusiness* promove impacto ambiental e econômico expressivos, sendo inversamente proporcionais ao avanço tecnológico que o setor da construção civil tem experimentado, visto que os números mostram um preocupante consumo de energia e dos recursos naturais, por volta de 40 % em ambos os casos. O mais preocupante ainda é o volume alarmante de resíduos produzidos, em média multinacional, em torno de 40%, em relação ao total de resíduos gerados por todas as demais atividades humanas. De modo geral, a massa de resíduos gerados de construção e demolição (RCD) é igual ou superior à massa gerada de resíduos domiciliares (JOHN; AGOPYAN; SILVA 2001, p. 2).

Provavelmente, em função desses dados alarmantes que foram levantados, poder-se-ia entender a razão pela qual levaram os autores John; Agopyan (2001) a defenderem novas formas de desenvolvimento tecnológico e de mudanças acerca de conceito cultural de desenvolvimento e bem-estar social, como bases para a construção de uma sociedade efetivamente sustentável, a qual deveria sofrer uma transformação profunda tanto no processo produtivo quanto no padrão de consumo, conforme citado anteriormente.

No Brasil, é gerada a quantidade de 230 a 600 kg/hab./ano de resíduos sólidos provenientes da construção civil (JOHN, 2000 apud ÂNGULO, 2000, p. 10). Os RCD

correspondem a uma parcela de 54% a 67% da massa total anual de resíduos sólidos urbanos, em cidades de médio e grande porte (PINTO, 1999 apud ÂNGULO, 2000, p. 9).

Com esses dados, a construção civil passa, então, de uma importante cadeia produtiva para o desenvolvimento sócio-econômico, com geração de emprego, qualidade de vida e renda, para um setor produtivo que também traz sérios impactos ambientais indesejáveis. Nas atuais circunstâncias, isso acontece devido a falta de uma política e preocupação de toda a cadeia produtiva com o reaproveitamento e geração de tecnologias capazes de reverter essa realidade.

Assim, o *construbusiness* é também um importante gerador de poluição, fica patente que não há desenvolvimento sustentável sem construção sustentável. Conseqüentemente, qualquer sociedade que procure atingir um desenvolvimento mais sustentável precisa necessariamente passar pelo estabelecimento de políticas ambientais específicas para a construção civil (JOHN; SILVA; AGOPYAN, 2001, p. 2).

Sobre os impactos ambiental e econômico causados pelo RCD, Pinto (2001, p. 80) defende que a falta de uma política que se preocupa com esses impactos gera o que o autor denomina de Gestão Corretiva. Escreve o pesquisador que “a inexistência de solução impõe a rotina da correção pela administração pública, num processo cíclico, impossível de ser interrompido nos marcos da Gestão Corretiva”. Demonstra ainda que:

a característica típica das deposições irregulares, resultantes da inexistência de soluções para a captação dos RCD, é a conjunção de efeitos deteriorantes do ambiente local: comprometimento da paisagem, do tráfego de pedestres e de veículos e da drenagem urbana, atração de resíduos não-inertes, multiplicação de vetores de doenças e outros efeitos (PINTO, 2001, p. 80).

Os pesquisadores Peng et al., (1997 apud LEITE, 2001, p. 15) afirmam que o nível de impacto causado ao meio ambiente pelo descarte dos RCD pode ser avaliado a partir da hierarquia da disposição de resíduos, conforma mostra a Figura 2.6.

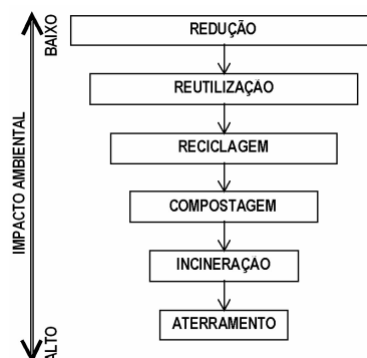


Figura 2.6 - Hierarquia da disposição de resíduos de construção e demolição (PENG et al., 1997 apud LEITE, 2001, p. 15).

O modelo hierárquico apresentado mostra que a redução da geração de resíduos com a melhoria dos desempenhos de gerenciamento dos desperdícios, em execuções de obras é a opção mais eficiente para a redução dos impactos econômicos e ambientais. Todavia, a reutilização de materiais também se apresenta como bom procedimento para a diminuição destes impactos citados, pois este procedimento utiliza o mínimo de processamento e energia. A reciclagem (transformação dos resíduos em novos produtos), dentro do modelo hierárquico mostrado, aparece como a terceira melhor solução à minimização dos impactos ambientais e econômicos.

A irracionalidade no tratamento dos RCD promove sérios impactos sócio-ambientais, quando da deposição destes materiais residuários em áreas urbanas impróprias, sem reaproveitamento e/ou reciclagem. Desta forma, há consumo dos recursos naturais não renováveis em condições incontroláveis e irresponsáveis. Além disso, neste mesmo cenário, os impactos econômicos podem ser verificados devido a ações corretivas da administração pública e aos custos de exploração dos recursos naturais, em detrimento da possibilidade de reciclagem desses resíduos como substitutos parciais dos minerais provenientes de jazidas (rochas), para a produção de concretos.

2.5 POTENCIALIDADES E PROCESSOS DE RECICLAGEM DOS RCD

2.5.1 Potencialidades de reciclagem dos RCD

A reciclagem de resíduos apresenta vantagens potenciais do ponto de vista da sustentabilidade, além de ser uma opção a mais em relação às demais. Todavia, somente após estudo específico por meio de ferramentas como a da análise do ciclo de vida, a vantagem ambiental pode ser garantida. As construções que se utilizam destes resíduos para a produção de novos materiais podem estar sob graves riscos de contaminação, tanto interna quanto externamente, seja pela contaminação da água, radiação ou pela volatilização de frações orgânicas (VAN DER ZWAN, 1991).

A contribuição ambiental eminentemente advinda com a reciclagem é a preservação dos recursos naturais, que são substituídos por resíduos, reduzindo, assim, a destruição da paisagem, da fauna e flora. Mesmo em locais onde os recursos naturais são abundantes, esta contribuição ambiental é importante, porque prolonga a vida útil das reservas naturais e preserva os ecossistemas (JOHN, 1999).

Em países desenvolvidos, bem como em amplas regiões dos países em desenvolvimento, que apresentam uma economia em condições de crescimento acelerado, é gerada uma elevada quantidade de resíduos sólidos. Esta condição implica em inevitável adesão às políticas de valorização destes materiais residuários e as suas reciclagens (PINTO, 2001, p. 87). O país que atualmente apresenta o maior índice (taxa) de reaproveitamento de materiais é a Holanda, chegando à taxa próxima de 80% (CARRIJO, 2005, p. 13).

Pinto (2001, p.87) afirma que “os processos de gestão dos resíduos em canteiro, de sofisticação dos procedimentos de demolição e de especialização no tratamento e reutilização dos RCD vão conformando um respeitável e sólido ramo da engenharia civil”, a partir do momento em que conjugam a necessidade de usar parcimoniosamente recursos, que são finitos, com a importância e obrigação de não sobrecarregar (poluir) a natureza com resíduos possivelmente evitáveis.

A geração de RCD *per capita*, em algumas cidades do Brasil, atinge um valor mediano estimado em 500 kg/hab.ano, cita o pesquisador Pinto (1999 apud ÂNGULO et al., 2002, p. 1). Quando o IBGE atribuiu ao Brasil, em 2002, uma população urbana de 137 milhões de habitantes, os pesquisadores Ângulo et al. (2002, p. 2) estimaram a massa total de RCD gerados, na ordem de $68,5 \times 10^6$ toneladas/ano. Deste montante total de RCD, são de interesse para a reciclagem 95% dos resíduos de natureza mineral inorgânica (ANGULO et al., 2002). Segundo John e Agopyan (2001, p. 2), “diversos municípios brasileiros já operam com sucesso centrais de reciclagem do resíduo de construção e demolição, produzindo agregados utilizados predominantemente como sub-base de pavimentação”. Ainda, segundo Buttler (2003, p. 33), “as pesquisas envolvendo agregados reciclados são unânimes em afirmar a grande aplicabilidade do material, especialmente, o agregado graúdo reciclado, em aplicações não-estruturais e estruturais”.

O trabalho apresentado no II SUFFIB⁷ (2005), pelos pesquisadores Ângulo et al. (2005, p. 1), traz informações relevantes sobre as potencialidades de reciclagem dos RCD. Neste documento, os autores afirmam que os produtos finais do processamento dos RCD (agregados reciclados) podem ser consumidos integralmente pelo próprio setor gerador (principal) destes resíduos: o setor da construção civil. Segundo Ângulo et al. (2005, p. 1-2),

A Resolução n.º 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabelece que o RCD deva ser triado em quatro diferentes classes, sendo as classes A e B recicláveis. A Classe A é composta por rochas, solos, cerâmicas, concretos, argamassas etc. sendo todos os materiais de origem

⁷ O II SUFFIB (Seminário: O uso da fração fina de britagem) foi um evento científico realizado na cidade de São Paulo, de 05 a 07 de abril de 2005.

mineral. Esta fração representa em torno de 90% da massa do RCD no Brasil (Brito, 1998), na Europa (EC, 2000) e em alguns países asiáticos (Huang *et al.*, 2002). Portanto, a reciclagem massiva e os benefícios econômicos e ambientais associados a esta reciclagem dependem da reciclagem intensiva da fração mineral do RCD (Angulo *et al.*, 2002). Mesmo que todo o RCD mineral ($61,6 \times 10^6$ t/ano) seja empregado como agregados de construção civil, a participação no mercado de agregados naturais seria aproximadamente 16,2% (Angulo *et al.*, 2002). Assim, os agregados de RCD reciclados devem ser entendidos como uma fonte de matéria-prima alternativa para as empresas de pedras britadas e de extração de areia. Normalmente, os agregados de RCD reciclados são utilizados em atividades de pavimentação e obras públicas que, no Brasil, é capaz de absorver apenas 30% do total do RCD gerado (Angulo *et al.*, 2002), além de possuir o menor valor agregado como produto. Já os setores de concretos e argamassas podem consumir integralmente a quantidade de RCD gerada como agregado. (ÂNGULO *et al.*, 2005, p. 1-2).

Buttler (2003, p. 33) afirma que “a reciclagem também permite a geração de empregos e aumenta a competitividade da economia. Deve-se enfatizar que a reciclagem permite gerar valor a partir de um produto que antes se constituía em despesas”.

2.5.2 Processos de reciclagem dos RCD

Entende-se por processo de reciclagem⁸ ou beneficiamento de RCD, de acordo com Leite (2001, p. 30), as várias etapas que “envolvem desde a sua coleta e transporte, passando por separação, britagem e peneiramento, até a sua estocagem para posterior utilização”. Segundo a pesquisadora, “alguns estudos concluíram que o beneficiamento dos resíduos de construção e demolição não difere muito do tratamento dado à produção de agregados naturais, e muitos dos equipamentos utilizados para esses se adequam perfeitamente aos primeiros”.

A prática de reciclagem no Brasil iniciou na década de 80, quando o produto obtido (material reciclado) era utilizado na produção de argamassas de emboço. As unidades recicladoras começaram a entrar em operação na década de 90, nas regiões sul e sudeste, sob administração municipal. Significativa parte do produto reciclado foi usada em cobertura primária de vias, sub-bases de pavimentos asfálticos, drenagem e controle de erosão. A outra parte restante teve aplicação na produção de concretos, argamassas e outros artefatos premoldados de concreto (LIMA, 1999, p. 11).

⁸ A reciclagem do RCD tem como produtos básicos os agregados miúdos e graúdos, na granulometria desejada, para a produção de concretos (HANSEN, 1992). Na presente pesquisa, destacam-se os RCD destinados à produção de agregado graúdo para concretos, com aplicabilidade na construção civil.

Para o sucesso de implantação de unidades recicladoras no Brasil, vários fatores devem ser observados, como os programas de gestão e gerenciamento adequados dos RCD e de seu processo de reciclagem, com relevância aos estudos macroambientais da região, o que poderia influenciar na reciclagem. As pesquisas sobre o assunto ainda são incipientes no âmbito nacional, conforme afirmam Costa et al. (2004, p. 2).

O processo de reciclagem dos RCD no Brasil, de modo geral, consiste em cinco etapas básicas: 1) limpeza; 2) seleção prévia; 3) homogeneização; 4) trituração e extração de materiais metálicos; 5) eliminação de contaminantes⁹; e 5) estocagem para expedição (PINTO, 1998; GEHO, 1997 apud CARNEIRO et al., 2001, p. 154). Ainda, segundo os autores, “no processo de reciclagem são utilizados equipamentos diversos como pá carregadeira, alimentador vibratório, britador, eletroímã para a separação das ferragens, peneiras, mecanismos transportadores e, eventualmente, sistemas para eliminação de contaminantes”. Além disso, os locais de reciclagem precisam dispor de áreas extensas de terreno, suficientemente grandes para acondicionar os diversos tipos de entulho recebido e os vários tipos de agregados reciclados produzidos (PINTO, 1998; GEHO, 1997 apud CARNEIRO et al., 2001, p. 154).

Para John e Agopyan (2001, p. 9), a reciclagem com processos tradicionais compreende uma ou mais etapas de classificação dos RCD, com separação de fases indesejáveis em agregados, britagem por equipamento triturador e peneiramento. Em uso no Brasil, segundo os mesmos autores, além das tecnologias de separação magnética e manual, existem outras tecnologias de classificação, que se utilizam das diferenças de densidades das diversas fases (materiais) presentes no agregado reciclado. Assim, processa-se a separação das frações mais porosas (partículas cerâmicas) das frações que contêm partículas de concreto e rocha. Porém, estes processos agregam custos maiores de beneficiamento. Ainda, no Brasil, uma etapa normalmente não incluída nas centrais de processamento é a criação de pilhas de homogeneização dos agregados, com o objetivo de redução da variabilidade intrínseca do produto, ao longo do processo.

As centrais de reciclagem ou unidades recicladoras de RCD, de modo geral, utilizam-se dos mesmos equipamentos e sistemas adotados pelo setor de mineração. Às vezes, estes maquinários são adaptados e adequados para o beneficiamento de RCD. Estes resíduos de construção podem ser britados várias vezes, ou somente uma vez, para a obtenção de partículas com menores dimensões, bem como para melhor controle das características

⁹ São considerados materiais contaminantes: madeira, plástico, papel, gesso, material orgânico etc.

granulométricas. As centrais recicladoras podem variar de porte, complexidade e desempenho, em função da quantidade disponível de RCD e da demanda para o produto reciclado (LIMA, 1999, p. 29).

No Brasil, segundo Lima (1999, p. 29), a maioria das centrais recicladoras é de padrão simplificado, compreendendo: alimentador, britador, transportador de correia e eletroímã. O mesmo autor afirmou que “as principais características dos reciclados que são afetadas pelos procedimentos e equipamentos utilizados são: classificação e composição; teor de impurezas; granulometria; forma e resistência dos grãos”.

“A correta escolha do britador a ser utilizado otimizará os resultados e proporcionará agregados com a granulometria e forma de partículas desejadas. Dependendo do campo de aplicação do material reciclado, haverá sempre um britador apropriado para tal” (BUTTLER, 2003, p. 25).

De acordo com a pesquisadora Leite (2001, p. 37), a maior parte das propriedades dos agregados obtidos de RCD é afetada diretamente pelo tipo de britador utilizado. Por isso, estes equipamentos de processamento dos RCD merecem atenção especial, pois também os seus desempenhos podem afetar as questões econômicas. Por estes motivos relevantes, do ponto de vista da influência dos equipamentos de britagem sobre as características dos agregados reciclados produzidos, listam-se, a seguir, alguns tipos de britadores mais utilizados, de acordo com Leite (2001, p. 37-40).

a) Britador de impacto

Este equipamento pode ser utilizado em britagem primária ou secundária, a depender da necessidade. Possui uma câmara de impacto na qual o material é britado através do choque de martelos maciços fixados por um rotor e pelo choque com placas fixas (LIMA 1999; QUEBAUD, 1996). Apresenta as seguintes vantagens:

- robustez – processa tanto peças de concreto armado, quanto vigas de madeira (LIMA, 1999);
- alta redução das dimensões das peças britadas. Às vezes dispensa a rebritagem, pois gera uma quantidade de finos razoável (LIMA, 1999; MÜELLER e WINKLER, 1998; QUEBAUD, 1996);
- gera grãos de forma cúbica, com boas características mecânicas (LIMA, 1999; QUEBAUD, 1996; MAULTZSCH e MELLMANN, 1998);
- baixa emissão de ruído (LIMA, 1999);
- possui menor sensibilidade aos materiais que não podem ser moídos, como barras de aço (QUEBAUD, 1996; HANSEN, 1992);

- fornece agregados com distribuição granulométrica mais adequada para obras de pavimentação (HANSEN, 1992).

As partículas já possuem linhas naturais de ruptura, portanto a ruptura por impacto acontece nestes pontos, gerando grãos mais íntegros. Por consequência, o agregado produzido oferece melhores características mecânicas (LIMA, 1999).

HANSEN (1992) aponta, entretanto, que o britador de impacto apresenta desvantagens devido ao seu alto custo de manutenção, com alto desgaste.

b) Britador de mandíbula

Estes britadores fraturam o material por esmagamento das partículas. O equipamento é dotado de uma câmara de britagem onde o material é literalmente mastigado por mandíbulas (OFFERMANN, citado por LEVY, 1997). Estes britadores não reduzem muito o tamanho das partículas, então são utilizados como britadores primários. Assim, geram uma grande quantidade de agregados graúdos, sendo o material geralmente rebritado em moinhos de martelo, britadores de mandíbula de pequeno porte, entre outros (LIMA, 1999). HANSEN (1992) aponta as seguintes vantagens:

- proporciona distribuição granulométrica dos agregados mais adequada para o uso em concreto;
- proporciona britagem de apenas uma pequena quantidade do agregado original de concretos a serem reaproveitados;
- produz apenas 20 % de finos abaixo de 4,8 mm;

O equipamento apresenta as seguintes desvantagens:

- necessidade de uma segunda britagem, que aumenta o custo do processo (LIMA, 1999; QUEBAUD, 1996);
- peças armadas ou de madeira de maiores dimensões não devem ser britadas neste equipamento, pois geralmente ocorrem quebras do eixo do britador (LIMA, 1999; BRITO FILHO, 1999);
- alta emissão de ruído (LIMA, 1999);
- menor produtividade que os britadores de impacto (PINTO, 1997).

Com relação à forma dos grãos, não há um consenso, pois HANSEN (1992) e HENDRIKS et al. (1998) afirmam que os agregados produzidos com este tipo de britador apresentam vantagens em relação à forma, enquanto, LIMA (1999) e BRITO FILHO (1999) apontam que os grãos obtidos apresentam-se muito lamelares e com linhas de fratura muito pronunciadas, que podem gerar elos frágeis quando peças de concreto produzidas com este material forem submetidas a esforços mecânicos. Com base na bibliografia não é possível concluir qual das afirmações é a correta, apenas um estudo

sistemático das propriedades dos agregados produzidos com este tipo de equipamento seria a solução para este impasse.

c) Moinhos de martelo

São também conhecidos como moinhos rotativos ou britadores de cilindros. São pouco utilizados, visto que só produzem material fino (LEVY, 1997). São dotados de câmara de britagem e martelos ou cilindros de impacto que esmagam o material. Segundo LIMA (1999), o equipamento é dotado de grelha na boca de saída, que impede a passagem de qualquer material mais grosso, podendo ser retirado para aproveitar a produção deste material. Porém esta prática pode levar à produção de uma quantidade muito pequena de material graúdo e não se sabe até que ponto é vantajosa, pois haveria a necessidade da posterior separação do material, introduzindo mais uma etapa ao processo de beneficiamento.

d) Cones de britagem

Apenas material previamente britado deve ser utilizado neste equipamento, que chegando à câmara de britagem é esmagado contra as paredes de um cone (LEVY, 1997). HANSEN (1992) aponta que este equipamento é muito usado para britagem secundária, processando apenas materiais com diâmetro máximo de 200 mm.

(LEITE, 2001, p. 37-40)

De acordo com Hansen (1992), existem vários tipos de processos de beneficiamento para britagem e peneiramento de RCD. Os custos de reciclagem e a qualidade do produto final serão em função do tipo de processamento adotado para operar as usinas recicladoras.

Como exemplo, a Figura 2.7 apresenta um sistema de britagem de médio porte, de planta fixa, da prefeitura de Goiânia-GO. Este britador de mandíbula, conforme citado no Item 2.5.2-b, é utilizado para a produção dos agregados naturais e agregados reciclados de RCD, quando necessário. Os agregados produzidos por esta usina de britagem municipal são utilizados como materiais básicos em obras públicas.



Figura 2.7 – Sistema de britagem (bica corrida) da prefeitura de Goiânia-GO (2005).

A Figura 2.8 mostra um britador do tipo cônico, conforme citado no Item 2.5.2-d.



Figura 2.8 – Cones de britagem (Modelo PY - BREAK-DAY)¹⁰.

Em vários países do continente europeu, sobretudo na Holanda, Ásia e América do Norte são utilizados equipamentos sofisticados para o processo de beneficiamento dos RCD. Estes equipamentos já são de uso comum, tanto na fase de preleção (separação) dos RCD quanto no sistema de britagem final. Em muitos destes países são utilizados também equipamentos móveis (plantas móveis) que vão aos locais geradores do RCD e executam *in situ* os procedimentos de britagem para obtenção dos agregados (Figuras 2.11 e 2.12).

A engenharia química, a engenharia de tratamento de minérios e a metalurgia dispõem de variadas técnicas de processamento, viáveis industrialmente, que possibilitam a separação das fases de interesse presentes em matérias-primas. Para tanto, utilizam-se de técnicas de britagem, peneiramento, separação magnética, solubilizações parciais, reações químicas, separação densitária via úmida em jigues¹¹. Estas técnicas exploram diferenças de densidade e tamanho das partículas. “A separação em meio denso é um processo aplicado na separação de minerais segundo suas massas específicas mediante a utilização de líquidos orgânicos, soluções de sais inorgânicos ou suspensão estável de densidade pré-determinada” (LUZ, 1998 apud CARRIJO, 2005, p. 23).

Segundo Carrijo (2005, p. 24), alguns equipamentos de separação dos RCD, que processam a jigagem a úmido, utilizando para tanto os chamados jigues, podem ser encontrados no mercado nacional. Estes equipamentos geralmente conferem eficiência no

¹⁰ Fonte: <<http://www.break-day.com>>. Acesso em: 12 ago. 2006.

¹¹ Jigues são equipamentos de beneficiamento mineral, os quais separam as partículas pelas suas densidades e tamanhos, utilizando-se de água (jigagem a úmido) ou ar (jigagem a seco) (CARRIJO, 2005, p. 23).

processo de separação e baixo custo de manutenção. Entretanto, o consumo de água para a execução deste processo de separação é excessivo, provocando, assim, um alto custo operacional, além de indesejável impacto ambiental. Entretanto, segundo Ângulo (2004), estas desvantagens já não acontecem quando o processo é de jigagem a seco. A Figura 2.9 esquematiza um processo de separação por jigagem a úmido. Um processo de separação a seco é representado na Figura 2.10.

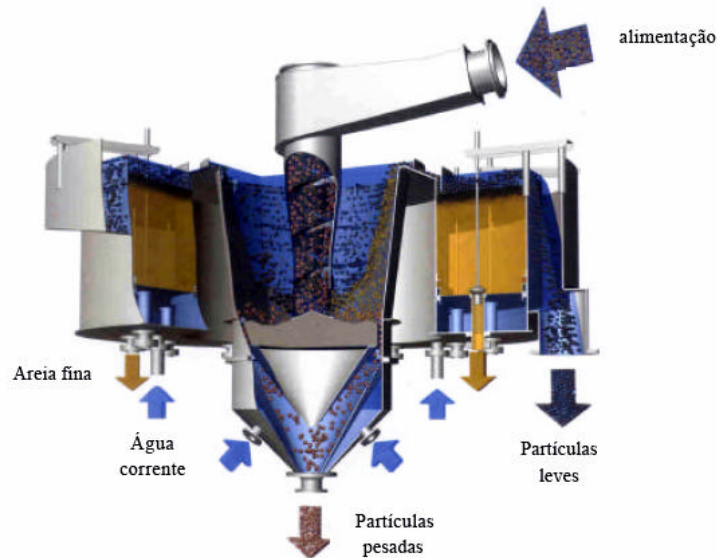


Figura 2.9 – Desenho esquemático de separação por jigagem a úmido (All Flux) (CARRIJO, 2005).

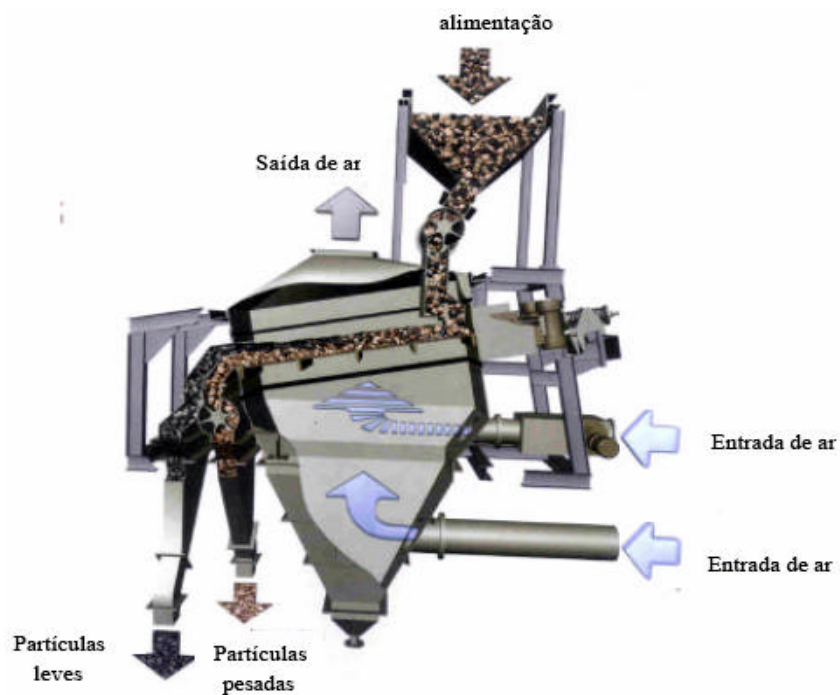


Figura 2.10 – Desenho esquemático de separação por jigagem a seco (Allair) (CARRIJO, 2005).

As Figuras 2.11 e 2.12 mostram dois tipos de britadores móveis. Estes modelos de plantas móveis de britagem são de usos correntes e comuns em vários países da Europa, Ásia e América do Norte.



Figura 2.11 – Sistema de planta móvel para britagem (LT 95 Series Mobile Crusher)
Fonte: *Metso Minerals*¹².

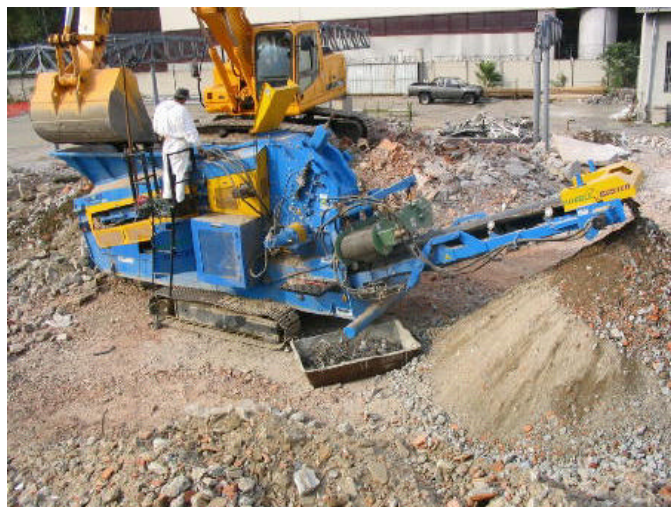


Figura 2.12 – Sistema móvel para britagem (*Rubble Buster S3R*)
Fonte: *Rubble Buster*¹³.

As desvantagens das plantas fixas são os altos custos de investimento e a necessidade de áreas extensas para suas implantações. Por sua vez, as plantas móveis apresentam desvantagens em relação às fixas, pois não permitem a introdução de outros acessórios como, por exemplo, peneiras com abertura de malhas diferenciadas que permitam separar os agregados reciclados produzidos em diferentes granulometrias (BUTTLER, 2003, p. 29).

¹² Disponível em <<http://www.metsominerals.com>>. Acesso em: 12 ago. 2006.

¹³ Disponível em <<http://www.rubblebuster.com>>. Acesso em: 12 ago. 2006.

Afirma Buttler (2003) que as plantas móveis consistem basicamente de britador e separador magnético e apresentam as seguintes vantagens:

- Menor custo (cerca de 5%, se comparadas com as plantas fixas);
- Menor tempo de instalação; e
- Redução dos custos de transporte.

Por outro lado, continua afirmando o pesquisador que as plantas fixas conferem vantagens tais como:

- Possibilidade de obter produtos reciclados diversificados e com qualidade superior aos obtidos por plantas móveis; e
- Utilização de equipamentos maiores e mais potentes que fornecerão um tratamento qualitativo superior no processamento dos resíduos, quando comparadas com as plantas móveis (BUTTLER, 2003).

A pesquisadora Carrijo (2005, p. 27) conclui que “os resíduos de construção civil podem encontrar um grande número de finalidades para reutilização, desde que devidamente tratados e analisados. É possível reciclar quase todo o RCD, desde que seja escolhido o uso adequado e se respeitem às limitações técnicas”.

3 AGREGADOS RECICLADOS DE RCD PARA CONCRETOS

Devem ser considerados agregados reciclados todos os materiais granulares, advindos de alvenaria ou de concreto [RCD], processados mecanicamente (britagem), e que sejam utilizáveis com meio cimentante para a formação de novos concretos ou argamassas. Tal como os agregados naturais, dependendo da granulometria, os agregados reciclados podem ser considerados grãos ($D_{máx}^{14} > 4,8 \text{ mm}$) ou miúdos ($4,8 \text{ mm} < D_{máx} < 0,75 \mu\text{m}^{15}$) (LEVY, 2001, p. 22).

A preocupação com a qualidade dos concretos, especialmente com relação à durabilidade e resistência, leva à necessidade de se estudar bem as propriedades de seus agregados. Deste modo os agregados deixam de ter um papel apenas econômico na composição dos concretos, pois também podem influenciar as propriedades destes concretos, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido (LEITE, 2001, p. 62).

No Brasil, o agregado reciclado produzido de RCD é normalmente misto e predominantemente, contém as fases de concretos e argamassas, cerâmicas, rochas naturais e outros. Verifica-se que as características de cada uma destas fases são muito variáveis. Uma quantidade significativamente maior dos agregados reciclados é processada a partir de resíduos de construções. Fato este que não ocorre, por exemplo, em alguns países europeus onde os resíduos para a produção de agregados reciclados provêm de demolições (ÂNGULO et al., 2004, p. 3).

A qualidade do agregado reciclado está diretamente condicionada à origem dos RCD utilizado e ao processo de beneficiamento, conforme citado em itens anteriores. Isto significa que a fonte geradora do RCD, sistema de seleção e coleta (na obra), transporte até o local da britagem, o processo de britagem e o tipo de britador utilizado podem influenciar as características do produto final: o agregado reciclado.

Carrijo (2005, p. 27-28) discorre em seus estudos que após o agregado reciclado ter sido britado, peneirado e se necessário descontaminado, pode-se utilizá-lo para as seguintes aplicações:

- Enchimentos em geral (HANSEN, 1992);
- Enchimento em projetos de drenagem (HANSEN, 1992);
- Sub-base ou material de base para a construção rodoviária (HANSEN, 1992);

¹⁴ $D_{máx}$ = dimensão máxima característica das partículas.

¹⁵ μm (micrômetro): $1 \mu\text{m} = 1/1000 \text{ mm}$ (milésima parte da unidade de milímetro).

- Agregado para novos concretos estruturais e não estruturais (HANSEN, 1992);
- Argamassas de assentamento e revestimento (MIRANDA, 2000);
- Uso arquitetônico visando estética e decoração; e
- Obras públicas, como bancos, calçadas etc.

Dentre todas as aplicações, a que vem despertando maior interesse é a utilização dos agregados para a produção de novos concretos. É, contudo, a aplicação que exige mais cuidados e estudos, tendo em vista o importante papel que os agregados desempenham no comportamento destes (CARRIJO, 2005, p. 28).

Quando um material alternativo tem possibilidades de ser utilizado, sob devidas análises, é necessário que as propriedades físicas, químicas e mecânicas deste material em potencial sejam bem conhecidas (HENDRIKS, 2000).

A aplicabilidade dos agregados reciclados para a produção de concretos estruturais é relatada por diversos pesquisadores. Como exemplo, Dolara et al. (1998) estudaram a aplicação de concretos com agregados reciclados para finalidades estruturais, quando foram confeccionadas três vigas protendidas com 15 metros de vão.

Levy e Helene (2002, p. 6) relataram alguns exemplos de concretos produzidos com agregados reciclados que foram utilizados em várias obras na Europa. Afirmam os autores que “a partir de 1988 a C.E. (Comunidade Européia) executou um grande número de obras em concreto obtido a partir de agregados reciclados, de concreto, de alvenaria, assim como da mistura de ambos, algumas dessas obras são obras de grande porte”. A Figura 3.1 mostra o 1.º edifício no Reino Unido (Edifício do Meio Ambiente) a incorporar a tecnologia de concreto usinado com a utilização de agregados reciclados. A Figura 3.2 retrata um condomínio em Hamburgo com 460 unidades, construído com concreto de agregados reciclados.



Figura 3.1 – Primeiro edifício no Reino Unido a utilizar concreto usinado produzido com agregados reciclados (COLLINS, 2000 apud LEVY; HELENE, 2002).



Figura 3.2 – Condomínio em Hamburgo, com 460 unidades, construído com concreto de agregados reciclados há 50 anos (KROPP, 2000 apud LEVY; HELENE, 2002).

3.1 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS RECICLADOS DE RCD

Ao se avaliar as características gerais de um determinado agregado reciclado, quanto a sua qualidade, previamente deve-se levar em consideração o propósito do concreto que, com ele, será produzido e a conveniência técnica da utilização. Desta forma, algumas propriedades básicas devem ser observadas nos agregados reciclados: classificação, composição, granulometria, massa específica seca e massa específica do agregado saturado com superfície seca (condição SSS), absorção de água, teor de argamassa aderida, forma, textura, resistência à abrasão, resistência ao esmagamento e conteúdo de impurezas (LIMA, 1999, p. 35-36).

De acordo com Zordan (2000), citado anteriormente (p. 35), quando apontou os RCD como sendo os mais heterogêneos de todos os resíduos industriais e, ainda, que suas composições químicas estão relacionadas com a composição dos materiais construtivos contidos no entulho (RCD), por consequência, implicou dizer que os agregados originados dos RCD também apresentarão características de heterogeneidade semelhantes.

Dentre as principais diferenças indicadas na literatura entre os agregados naturais e os agregados reciclados de RCD, para concretos, destacam-se para os agregados reciclados, um menor valor de massa específica, maior valor de taxa de absorção de água e, preponderantemente, certa quantidade de argamassa aderida às superfícies das partículas do

agregado reciclado, que influenciam desde as propriedades destes agregados reciclados até as propriedades dos concretos que com estes sejam produzidos, tanto no estado fresco como no estado endurecido (BUTTLER, 2003, p. 40).

Para Dias e Agopyan (2004, p. 1-2), os AGR de RCD, contendo materiais cerâmicos vermelhos, são porosos e têm dimensões de partículas que variam de muito finas (menores que 0,075 mm) até mais grossas, as quais são limitadas pelo sistema de beneficiamento (britagem/peneiramento). A fase cerâmica encontrada nos RCD, provenientes de construção que se utiliza de tecnologia construtiva convencional, origina-se dos blocos cerâmicos, normalmente consumidos nos serviços de execução das alvenarias. Os blocos cerâmicos, por sua vez, são fabricados com argilas comuns, prensados e, posteriormente, queimados em fornos a temperaturas da ordem de 900 °C. Assim, os tijolos de cerâmica vermelha sofrem relevantes transformações de caráter físico e químico, as quais afetam a microestrutura e, conseqüentemente, a porosidade do produto final (tijolos). Desta forma, as partículas de tijolos cerâmicos triturados apresentam porosidade e afinidade com água, o que lhes conferem absorção elevada, quando comparadas às partículas de rochas naturais.

3.1.1 Composição do agregado graúdo de RCD

De acordo com a abordagem apresentada no capítulo anterior, o agregado graúdo reciclado de RCD apresenta em sua composição materiais variados que expressam quantitativamente as condições da fonte geradora dos RCD (obra ou demolição) e do processo de beneficiamento utilizado, o qual é determinante fundamental da quantidade de impurezas ou materiais contaminantes, quando possivelmente presentes na composição do agregado graúdo reciclado (AGR).

Lima (1999, p. 39) depois de analisar várias composições de agregados reciclados provenientes da construção de edifícios, apresentadas por outros pesquisadores, afirma que as quantidades mais significativas e presentes na composição do AGR são partículas de argamassas e de materiais cerâmicos e, ainda, diz o pesquisador que a composição de um determinado AGR é correspondente e variável ao tipo de obra que gerou o RCD, sobretudo o período ou etapa construtiva em que se encontrava a obra geradora deste material residuário.

Latterza e Machado Jr. (2003, p. 30) observaram em seus estudos sobre os RCD e agregados reciclados produzidos na Estação de Reciclagem de Entulho de Ribeirão Preto – SP (do tipo bica corrida e sem peneiramento), que o agregado graúdo obtido era composto por partículas de argamassa, partículas de concreto, britas (originais de rocha), cerâmica porosa,

cerâmica lisa (polida) e outros materiais (entre 0,5% e 1%), tais como: papéis, farpas de madeira e isopor (contaminantes). A Figura 3.3 exemplifica a composição característica do agregado graúdo reciclado antes de ser peneirado na granulometria desejada e logo após o processamento em britador, em sistema de bica corrida.

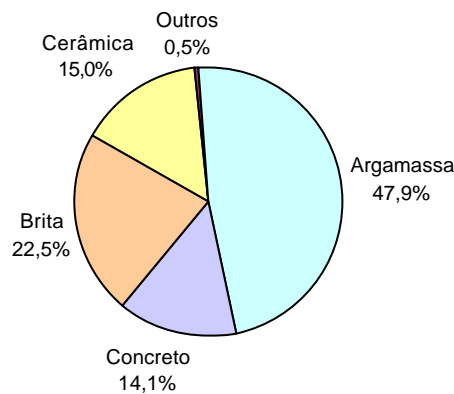


Figura 3.3 – Composição característica do agregado graúdo reciclado antes de ser peneirado (LATTERZA; MACHADO JUNIOR, 2003, p. 31).

Ainda, nos estudos de Latterza (2003), o agregado graúdo de composição apresentada na Figura 3.3, passou, em seguida, por peneiramento para obtenção da granulometria com graduação “0” (zero), ou seja, material passante na peneira com abertura de malha correspondente a 9,5 mm e retidos na peneira com abertura de malha correspondente a 4,8 mm. Desta forma, a composição do agregado graúdo que passou a ter características de graduação “0” ($D_{m\acute{a}x} = 9,5$ mm) é apresentada na Figura 3.4.

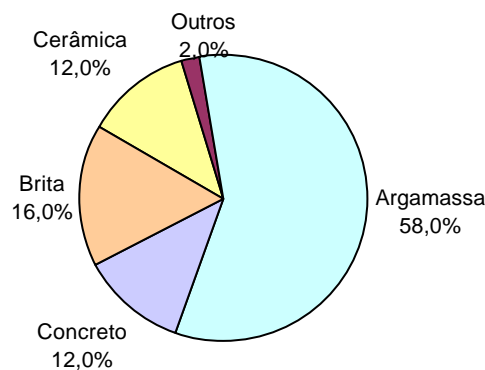


Figura 3.4 – Composição característica do agregado graúdo reciclado: $D_{m\acute{a}x} = 9,5$ mm (LATTERZA; MACHADO JUNIOR, 2003, p. 32).

Comparando-se as Figuras 3.3 e 3.4, pode-se concluir que o agregado graúdo obtido, nos estudos de Latterza e Machado Junior (2003), apresentaram praticamente os mesmos teores de materiais (fases) em ambas as condições: a primeira (Figura 3.3), logo após processamento em britador, e a segunda na condição de agregado graúdo reciclado (AGR) na graduação “0” (zero). Apenas a “fase argamassa” e a “fase brita” (rocha) tiveram seus teores significativamente aumentados da primeira para a segunda condição estudada. Fato este que poderia ser explicado pelo processo de beneficiamento que, provavelmente, interferiu e contribuiu para esta variação significativa de teores nas referidas fases.

3.1.2 Composição granulométrica dos agregados reciclados de RCD

A dimensão das partículas do agregado usado em concreto pode variar desde dezenas de milímetro até partículas com seção transversal menor que um décimo de milímetro. Em cada mistura de concreto incorporam-se partículas de diversas dimensões, assim como a dimensão máxima dessas partículas dos agregados também pode variar a cada dosagem de concreto, e “a distribuição desses tamanhos se denomina granulometria”. Para concretos com menores exigências de qualidade usam-se agregados, provenientes de jazidas, britados em sistema chamado de bica corrida ou brita graduada. Deste modo, estes agregados produzidos apresentam-se com uma variedade dimensional de partículas bem distribuída, desde a menor até a maior dimensão dessas (LEVY, 2001, p. 68-69).

Segundo Levy (2001), a determinação da curva granulométrica, num ensaio normalizado de granulometria de agregados para concretos, NBR 7211 (ABNT, 2005a), não apresenta qualquer complexidade ou dificuldade. Porém, a partir dos resultados obtidos e de posse da curva granulométrica estabelecida, verifica-se a dificuldade de análise desses dados e posterior tomada de decisão sobre a aceitabilidade ou não do agregado estudado, para a produção do concreto desejado. Isto tem se apresentado como uma tarefa complexa no meio técnico e, ainda, não se tem consenso satisfatório sobre o assunto.

Portanto, a utilização da curva granulométrica como parâmetro para a seleção de um agregado a ser utilizado na produção de concreto não pode ser adotado como critério absoluto, ao invés disso deve ser entendido como critério orientativo para prever a trabalhabilidade do concreto a ser produzido com determinado agregado (LEVY, 2001, p. 69-70).

No Brasil não se tem até o presente momento uma norma específica para a realização de ensaios de granulometria referentes aos agregados reciclados. Para tanto, são utilizadas as normas existentes que se referem aos ensaios de agregados naturais para concreto. Para consultas mais detalhadas sobre normas da ABNT pertinentes ao assunto, vide Capítulos sobre a parte experimental deste trabalho.

A Figura 3.5 mostra os aspectos dos agregados reciclados produzidos e estudados por Levy (2001).



Figura 3.5 – Aspectos dos agregados reciclados: grãos e miúdo (LEVY, 2001).

As Tabelas 3.1 e 3.2 mostram os resultados da composição granulométrica dos agregados reciclados miúdos e grãos estudados por LEITE (2001). Estes agregados foram produtos resultantes do beneficiamento (britagem e peneiramento) dos RCD coletados no aterro de inertes da zona sul da cidade de Porto Alegre-RS.

Tabela 3.1 - Composição granulométrica do agregado miúdo natural e reciclado.

Agregado miúdo natural				Agregado miúdo reciclado			
Peneiras (mm)	% Retido	% Retido acumulada	Método de ensaio (NBR)	Peneiras (mm)	% Retido	% Retido acumulada	Método de ensaio (NBR)
4,8	0,1	0	7217 (1987)	4,8	0,1	0	7217 (1987)
2,4	8,6	9		2,4	15,8	16	
1,2	12,6	21		1,2	18,9	35	
0,6	27,5	49		0,6	18,3	53	
0,3	33,9	83		0,3	19,9	73	
0,15	16,8	100		0,15	15,5	88	
< 0,15	0,5	100		< 0,15	11,5	100	
Total	100	-		Total	100	-	
Módulo de finura		2,64	7217 (1987)	Módulo de finura		2,65	7217 (1987)
Dimensão máxima característica (mm)		4,8	7217 (1987)	Dimensão máxima característica (mm)		4,8	7217 (1987)
Gradação		Zona 3 areia média	7211 (1983)	Gradação		Zona 3 areia média	7211 (1983)

Fonte: (LEITE, 2001, p. 130).

Tabela 3.2 - Composição granulométrica do agregado graúdo natural e reciclado.

Agregado graúdo natural				Agregado graúdo reciclado			
Peneiras (mm)	% Retido	% Retido acumulada	Método de ensaio (NBR)	Peneiras (mm)	% Retido	% Retido acumulada	Método de ensaio (NBR)
19	2,3	2	7217 (1987)	19	0,2	0	7217 (1987)
12,5	50,3	53		12,5	45,6	46	
9,5	33,9	87		9,5	27,3	73	
6,3	12,7	99		6,3	15,6	89	
4,8	0,7	100		4,8	6,6	95	
< 4,8	0,1	100		< 4,8	4,7	100	
Total	100	-		Total	100	-	
Módulo de finura		6,89		7217 (1987)	Módulo de finura		
Dimensão máxima característica (mm)		19	7217 (1987)	Dimensão máxima característica (mm)		19	7217 (1987)
Gradação		Brita 1	7211 (1983)	Gradação		-	7211 (1983)

Fonte: (LEITE, 2001, p. 130).

De acordo com a pesquisadora Leite (2001), analisando as Tabelas 3.1 e 3.2, o agregado graúdo reciclado apresentou módulo de finura (MF) um pouco menor do que o agregado graúdo natural. Dessa forma, o agregado graúdo reciclado necessitou de maior quantidade de água para molhar as superfícies específicas de suas partículas do que o agregado graúdo natural, mesmo que a diferença verificada fora muito pequena. Ainda, verificou-se que a composição granulométrica do agregado graúdo reciclado não se encaixou dentro dos limites da faixa de composição granulométrica especificada para a gradação 1 (brita n.º 1), bem como não se encaixou em nenhuma outra faixa (limites) prescritos pela

NBR 7211 (ABNT, 2005), a qual fornece especificações de agregados para concretos. E mesmo desta forma os agregados graúdos foram utilizados em sua pesquisa, para a produção dos concretos, pois a intenção seria justamente essa: usar o agregado da forma em que foi produzido, sem manipulação após a etapa de beneficiamento deste.

As Figuras 3.6 e 3.7 mostram as curvas granulométricas para o agregado miúdo reciclado (AMR) e agregado graúdo reciclado (AGR), estudados por Leite (2001), respectivamente.

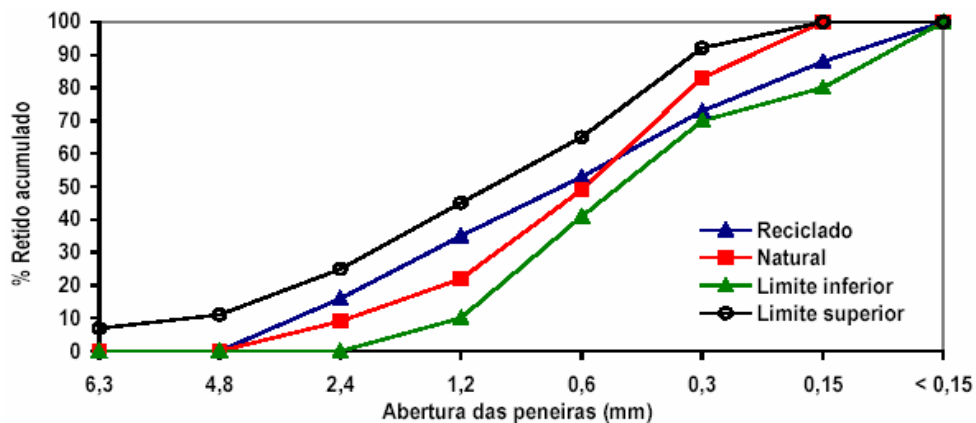


Figura 3.6 – Gráfico representativo das curvas granulométricas do agregado miúdo natural e reciclado e respectivos limites inferior e superior para areia média, especificada pela NBR 7211 (ABNT, 1983) (LEITE, 2001, p. 131).

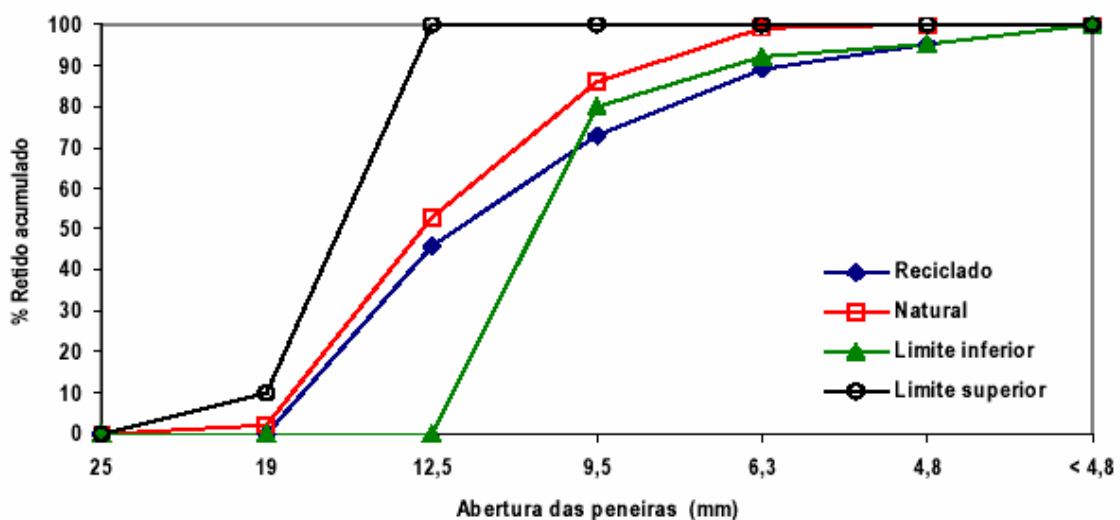


Figura 3.7 – Gráfico representativo das curvas granulométricas dos agregados graúdos natural e reciclado e respectivos limites inferior e superior da brita n.º 1 especificada pela NBR 7211 (ABNT, 1983) (LEITE, 2001, p. 131).

Todavia, para ambos os agregados reciclados (graúdo e miúdo) obtiveram-se granulometrias contínuas. Ou seja, uma boa distribuição granulométrica (variações de tamanhos das partículas), o que produz um bom arranjo espacial entre estes agregados dentro do concreto, sendo isto beneficentemente recomendável.

Afirma Lima (1999, p. 47) que “a distribuição granulométrica é importante na determinação de características de concretos e argamassas, pois influencia na trabalhabilidade, na resistência mecânica, no consumo de aglomerantes, na absorção de água, na permeabilidade etc.”. A granulometria dos agregados reciclados varia conforme o tipo de resíduo processado, os equipamentos utilizados, a granulometria do resíduo antes de ser processado (RCD), bem como pode haver outros fatores.

3.1.3 Textura e forma dos agregados reciclados de RCD

Segundo Neville (1997, p. 130), “além da natureza petrográfica de um agregado, são importantes as suas características externas, particularmente, a forma e a textura superficial da partícula do agregado”.

Os agregados reciclados possuem uma superfície bastante porosa com uma textura mais rugosa, quando comparados aos agregados naturais que possuem estas texturas geralmente lisas (BAZUCO, 1999, p. 15).

A superfície das partículas dos agregados naturais são praticamente polidas, enquanto a superfície dos agregados reciclados é áspera ou muito áspera, segundo a classificação feita por Hamassaki (1996). Este fato pode ser explicado pela condição de partículas com aderências superficiais de argamassas, as quais são mais porosas e rugosas do que as superfícies dos agregados naturais. Uma segunda etapa de britagem poderia minimizar este fenômeno, reduzindo a quantidade de argamassa aderida às partículas dos agregados reciclados e, conseqüentemente, haveria também a redução da porosidade destas mesmas partículas (MOREL, 1993; PIETERSEN et. al., 1998 apud BAZUCO, 1999, p. 16).

Os agregados reciclados tendem a apresentar formas angulares, não raro de se constatar que estas formas sejam mais presentes nas partículas dos agregados reciclados do que nos agregados naturais. Esta propriedade observada se deve ao tipo (origem) dos materiais residuários (RCD) britados como também ao processo de beneficiamento (sistema e equipamento de britagem). Geralmente, os britadores de mandíbulas contribuem mais para a formação de partículas de formas angulares, enquanto que os britadores giratórios produzem

partículas mais arredondadas. “A forma das partículas exerce uma influência muito grande na produção de concretos, principalmente sobre a trabalhabilidade, compacidade, ângulo de atrito interno e quantidade da água de amassamento necessária à mistura” (COUTINHO, 1997).

Mehta e Monteiro (1994, p. 264) disseram que a forma e a textura das partículas dos agregados influenciam mais as propriedades do concreto no estado fresco do que no estado endurecido e que as partículas de textura áspera, angulosas e alongadas requerem mais pasta de cimento para produzir misturas trabalháveis quando comparadas às partículas lisas e arredondadas. Desta forma, conseqüentemente, aumentam o custo do concreto.

Segundo Leite (2001, p. 67), todas as características anteriormente discutidas sobre os agregados reciclados são decorrências da fonte de RCD e do sistema de beneficiamento (processo de britagem), por consenso.

3.1.4 Densidades dos agregados reciclados de RCD e índices de absorção

Mehta e Monteiro (1994, p. 257) afirmaram que “para fins de dosagem de concretos não é necessário determinar a massa específica real de um agregado [...]” e sim “conhecer o volume ocupado pelas partículas do agregado, incluindo os poros existentes dentro das partículas”. Assim, o que realmente importa é a determinação da massa específica: a massa do material por unidade de volume, incluindo os poros internos das partículas. Para a maioria das rochas utilizadas, como agregados para concretos, a massa específica varia num intervalo de 2.600 a 2.700 kg/m³.

Outra grandeza física normalmente necessária em dosagens de concretos se refere à massa unitária, que é definida como a massa das partículas do agregado que ocupam uma unidade de volume. O termo massa unitária pode ser mais bem entendido como a relação entre uma determinada massa de agregado e o volume ocupado por este e os vazios entre suas partículas. O fenômeno do termo massa unitária surge porque não é possível empacotar as partículas dos agregados juntas, de tal forma que não haja espaços vazios. A massa unitária dos agregados mais comumente usados em concretos varia de 1.300 a 1.750 kg/m³ (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 257).

Quanto à absorção e umidade superficial, as partículas de um agregado podem apresentar vários estados de umidade:

Quando todos os poros permeáveis estão preenchidos e não há um filme de água na superfície, o agregado está na condição saturada com superfície seca (SSS); quando o agregado está saturado e também há umidade livre na superfície, o agregado está na condição úmida ou saturada; Na condição seca em estufa, toda a água evaporável do agregado foi removida pelo aquecimento a 100 °C. Capacidade de absorção é definida como a quantidade total de água requerida para trazer um agregado da condição seca em estufa para a condição SSS; Absorção efetiva é definida como a quantidade de água requerida para trazer o agregado da condição seca ao ar para a condição SSS (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 257).

A Figura 3.8 ilustra os vários estados de umidade em que pode estar uma partícula de agregado, conforme abordado anteriormente.

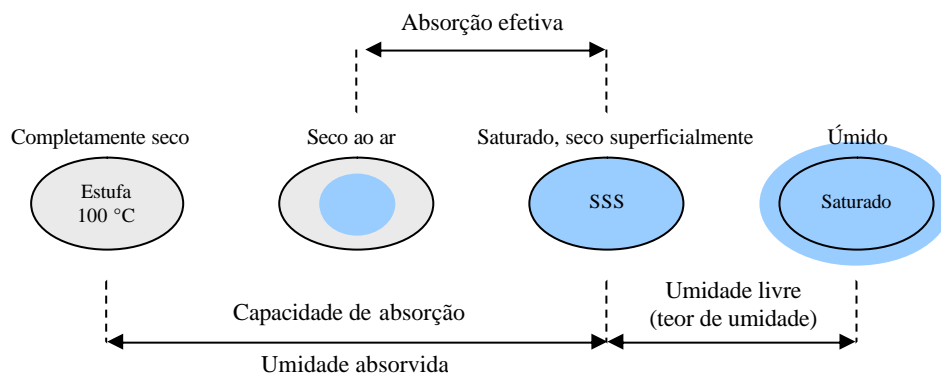


Figura 3.8 – Representação esquemática da umidade do agregado (partícula). Elaborada a partir de Neville (1997); Carrijo (2005); Mehta; Monteiro (1994).

De acordo com Bairagi et al. (1993), normalmente os agregados reciclados são mais porosos, possuem alta taxa de absorção e baixo valor de massa específica, quando comparados aos agregados naturais. Essas características dos agregados reciclados influenciam as propriedades dos concretos, com eles produzidos, tanto no estado fresco como no estado endurecido.

Neville (1997, p. 144) discorre que os poros internos presentes nas partículas do agregado correlacionam-se com a sua massa específica. As características desses poros são muito importantes no estudo das suas propriedades.

Afirma Bazuco (1999, p.15) que “a densidade dos agregados reciclados normalmente é menor que a densidade dos agregados naturais, devido à densidade relativamente menor da argamassa aderida às partículas do agregado original”. Os valores médios da massa específica dos agregados reciclados de concreto encontram-se numa faixa de 5 a 10% menores do que os correspondentes valores dos agregados naturais. As Tabelas 3.3 e 3.4 mostram as massas específicas e absorção de água dos agregados reciclados estudados por empresas construtoras do Japão, em 1978, e por Hansen; Narud (1983).

Tabela 3.3 – Massas específicas de agregados graúdo e miúdo reciclados de concreto e de agregados graúdo e miúdo naturais.

Natural (seco)	
Tipo	Massa específica (kg/m³)
Graúdo	2.120 a 2.430
Miúdos	1.970 a 2.140
Reciclado de concreto (saturado com superfície seca - SSS)	
Tipo	Massa específica (kg/m³)
Graúdo	2.290 a 2.510
Miúdos	2.190 a 2.320

Fonte: (B. C. S. J.¹⁶, 1978).

Tabela 3.4 – Massas específicas de agregado graúdo reciclado de concreto e de agregado graúdo natural.

Agregados natural		
Dimensões das partículas (mm)	Massa específica (kg/m³)	Absorção de água (%)
4-8	2.500	3,7
16-32	2.610	0,8
Reciclado de concreto (saturado com superfície seca - SSS)		
Dimensões das partículas (mm)	Massa específica (kg/m³)	Absorção de água (%)
4-8	2.340	8,5 a 8,7
16-32	2.490	3,7 a 3,8

Fonte: (HANSEN; NARUD, 1983).

Lima (1999, p. 51) afirmou, a partir dos dados apresentados por Hansen (1992), mostrados nas Tabelas 3.3 e 3.4, que a massa específica dos agregados reciclados de concreto foi, em média, 10% menor do que a massa específica dos agregados naturais, estando todos em estado seco.

A Tabela 3.5 apresenta os resultados obtidos por Latterza (1997) em seus estudos sobre os RCD de Ribeirão Preto-SP.

Tabela 3.5 – Massa unitária e massa específica de agregado graúdo reciclado e agregado graúdo natural.

	Graúdo	
	Natural	Reciclado
Massa unitária no estado solto	1,44	1,10
Massa unitária no estado compactado	1,56	1,27
Massa Específica	2,88	2,45

Fonte: (LATTERZA, 1997).

¹⁶ B. C. S. J. – Building Contractors Society of Japan.

John e Ângulo (2003, p. 27) afirmaram que a porosidade, tal como abordada no Item 3.1.3, fundamentalmente, é a responsável determinante da variação da massa específica seca das partículas dos agregados reciclados. Desta forma, conseqüentemente, a taxa de absorção também acaba sendo influenciada pela condição da porosidade.

Zordan (1997, p. 127) apresentou os resultados de massas unitárias aferidas em várias amostras de agregados reciclados, com presença de fase cerâmica (vermelha). Estes materiais (RCD) foram processados na Usina de Reciclagem de Ribeirão Preto – SP, em um triturador (britador) primário. O material foi peneirado para atingir as granulometrias desejadas para sua pesquisa, originando então os agregados grãos e miúdos reciclados. O agregado grão reciclado foi obtido a partir de todo o material passante pela peneira de 39 mm e retido na peneira 4,8 mm. O material passante pela peneira 4,8 mm deu origem ao agregado miúdo reciclado. A Tabela 3.6 apresenta os resultados obtidos de massas específicas para as 4 (quatro) amostras pesquisadas.

Tabela 3.6 – Massa unitária de cada amostra coletada.

MASSA UNITÁRIA (kg/dm³)			
Amostra	Material Miúdo	Material Grão	Miúdo+Grão
A	3,65	1,09	1,40
B	3,55	1,00	1,36
C	3,72	1,12	1,38
D	3,74	1,16	1,40
Média	3,67	1,09	1,39

Fonte: (ZORDAN, 1997, p. 127).

Verifica-se que o resultado da massa unitária do agregado grão reciclado (AGR) estudado por Laterza (1997) é extremamente próximo da média dos resultados das massas unitárias dos AGR estudados por Zordan (1997), respectivamente, 1,10 e 1,09 kg/dm³, nas Tabelas 3.5 e 3.6.

3.1.5 Resistência à abrasão *Los Angeles* dos agregados grãos reciclados de RCD

O índice de abrasão¹⁷ *Los Angeles* dos agregados grãos reciclados, verificado em diversas pesquisas brasileiras, apresentou-se com valores significativamente variados. O

¹⁷ O ensaio de abrasão tem por objetivo avaliar o desgaste das partículas do agregado grão sob impactos de cargas mecânicas e atrito. Comumente este ensaio é chamado de *Abrasão Los Angeles* e mensura este desgaste em porcentagem, comparando o estado inicial da amostra (massa de ensaio) com o seu estado final (soma da perda de massa ocorrida nas partículas da amostra ensaiada).

que, mais uma vez, atestou que as propriedades dos agregados reciclados são dependentes e determinadas em função da origem do RCD que, por sua vez, se apresenta com composições variadas de materiais que o constitui, também correlacionadas à fonte de origem e do processo de beneficiamento.

Segundo Neville (1997, p. 144), a porosidade, a permeabilidade e a absorção do agregado influenciam sua resistência à abrasão, bem como a aderência entre estes e a pasta de cimento, quando integrantes de um concreto.

Para Mehta e Monteiro (1994, p. 259), a porosidade normalmente apresentada pelos agregados influencia várias de suas propriedades: a resistência à compressão, a resistência à abrasão e o módulo de elasticidade. Afirmaram, ainda, os autores, que estas propriedades estão inter-relacionadas.

Buttler (2003) pesquisou várias amostras de agregados de concreto reciclado. A Figura 3.9 apresenta os valores dos ensaios de abrasão *Los Angeles* de quatro amostras de agregados de concreto reciclado e outra de agregado graúdo natural. Todas as graduações granulométricas destes agregados graúdos corresponderam à brita n.º 1, ou seja, partículas com dimensão máxima característica igual a 19 mm. A nomenclatura utilizada foi: GR1: agregado graúdo reciclado proveniente de um resíduo de concreto, o qual foi reciclado com 1 (um) dia de idade; GR7, GR28: idem ao GR1, porém com 7 e 28 dias de idade, respectivamente; GRNA28: agregado graúdo reciclado proveniente de um resíduo de concreto não-adensado, o qual foi reciclado com a idade de 28 dias; e Brita 1 (agregado graúdo natural).

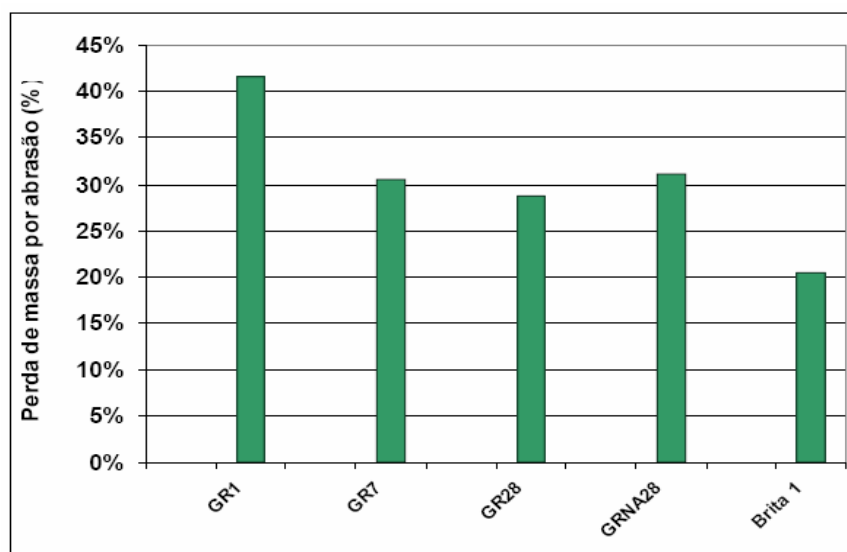


Figura 3.9 – Abrasão *Los Angeles* (BUTTLER, 2003).

Vale ressaltar que os agregados utilizados por Buttler (2003), para os ensaios de abrasão apresentados na Figura 3.9, são provenientes de concreto e não mistos com a presença de outros materiais nos resíduos (RCD), como partículas de cerâmicas, de rochas etc. A amostra GR1, que é referente ao agregado graúdo de concreto reciclado, com 1 (um) dia de idade, apresentou como resultado do Ensaio de Abrasão *Los Angeles* uma taxa superior aos 40%, correspondendo ao maior valor obtido. Também, observa-se que todos os valores obtidos dos ensaios foram significativamente superiores quando comparados ao resultado apresentado para o agregado graúdo natural, o qual se mostrou pouco acima de 20% quanto à perda de massa (abrasão). Portanto, todos os agregados graúdos reciclados e agregado graúdo natural apresentaram-se dentro da especificação normativa vigente, que prescreve um valor máximo recomendável de 50% para a taxa de Abrasão *Los Angeles*.

Todavia, a norma da ABNT pertinente a este ensaio - *Determinação da Abrasão "Los Angeles"* - NM 51 (ABNT, 2001b) é específica para agregados graúdos naturais de jazidas (rochas). Ainda não existe normalização, no Brasil, específica para o Ensaio de abrasão *Los Angeles* referente a agregados graúdos reciclados, ou seja, esta norma citada vem sendo usada tanto para os agregados graúdos naturais (AGN) como para os agregados graúdos reciclados (AGR).

3.2 ABORDAGEM SOBRE CUSTO ESTIMATIVO DE AGREGADOS RECICLADOS

O *custo* final da tonelada processada de RCD (agregados reciclados) foi da ordem de R\$ 5,00, segundo afirmou Pinto (1999, p. 96; grifo nosso), em sua tese de doutorado. Este pesquisador também apresentou uma tabela, resultante de seus estudos, que expressa os *preços* médios da época para a tonelada processada de agregados naturais, em diversas cidades de vários Estados brasileiros. A Tabela 3.7 apresenta estes locais e seus correspondentes preços da tonelada de agregados naturais.

Ainda, segundo o pesquisador Pinto (1999, p. 95), os componentes necessários para a determinação da composição do custo da tonelada processada de agregados reciclados foram criteriosamente considerados: custos de manutenção e reposição, provisão de água, força e luz, custos de mão-de-obra, juros, amortização e equipamentos para manejo interno. Assim sendo, e mediante a carência bibliográfica de informações comparativas de preços entre o agregado graúdo natural e reciclado, tentou-se, então, estabelecer alguns critérios para estimar o preço, e não custo, da tonelada de AGR. Tabela 3.7. Assim, poder-se-ia comparar os preços, por unidade de massa (tonelada), entre o AGR e o AGN.

Tabela 3.7 - Preços médios indicativos para os agregados naturais em regiões brasileiras (1).

Cidades	Região do país	Preço médio para agregados britados (R\$/t)
Porto Alegre / RS	S	11,00
Florianópolis / SC	S	15,80
Curitiba / PR	S	11,44
São Paulo / SP	SE	13,33
Santo André / SP	SE	13,33
Jundiaí / SP	SE	11,33
São José dos Campos / SP	SE	11,36
Ribeirão Preto / SP	SE	11,56
São José do Rio Preto / SP	SE	12,00
Rio de Janeiro / RJ	SE	11,00
Belo Horizonte / MG	SE	11,00
Brasília / DF	CO	18,67
Goiânia / GO	CO	14,67
Campo Grande / MS	CO	12,33
Salvador / BA	NE	20,00
Vitória da Conquista / BA	NE	18,67
Recife / PE	NE	18,00
Fortaleza / CE	NE	12,67
Belém / PA	N	30,00

(1) Pesquisa junto a distribuidores locais, para vendas de carga fechada, material posto em obra

Fonte: (PINTO, 1999, p. 96).

Entendeu-se que os preços médios dos agregados naturais foram compostos pelos seus custos de produção, em determinada unidade de medida (tonelada), acrescidos de toda a carga tributária legal vigente, além da taxa de lucro. Para a época (1.999), em média, a soma total destes tributos no país, relativos ao ramo de atividades ligadas ao setor de mineração (indústrias), girava em torno de 20%¹⁸, bem como os lucros líquidos eram da ordem de 25%, em seu limite superior. Deste modo, poder-se-ia estimar que o preço (venda), por exemplo, do AGR, corresponderia ao seu preço de custo de R\$ 5,00 / tonelada, de acordo com Pinto (1.999, p. 96), acrescido da carga tributária total (20%) e da taxa líquida de lucro (25%). Deste modo, o custo do AGR passaria de R\$ 5,00 para o preço de R\$ 7,50, a tonelada. Assim, então, foram comparados os preços de AGR com AGN, que passaram a se confrontar numa mesma dimensão econômica (parâmetro econômico-comparativo), ou seja, o preço da

¹⁸ Valor estimativo (taxa) da carga tributária total média aplicada às empresas/indústrias do setor de mineração, fornecido pelo departamento contábil-financeiro de uma empresa de britagem/mineradora estabelecida em Goiânia há mais de 20 anos.

tonelada estimada e fixada para o AGR com a média geral de preços da tonelada do AGN, obtida da Tabela 3.7. Para o cálculo da média geral de preços da tonelada do AGN, retirou-se um valor discrepante dos demais, o qual foi referente ao preço médio do agregado natural, relativo à cidade de Belém – PA. Assim, definiu-se que:

- A média aritmética simples dos preços médios regionais dos AGN, por tonelada, excluindo-se a cidade de Belém, foi de: **R\$ 13,79**; e
- O preço médio fixo estimado do AGR foi de **R\$ 7,50**.

Fixou-se o preço médio da tonelada de AGR, em R\$ 7,50, devido o sistema e custos de produção serem semelhantes em cidades mais urbanizadas do país, tais como as que foram apresentadas na Tabela 3.7. Portanto, com o preço médio da tonelada do AGR valendo R\$ 7,50 e R\$ 13,79 o preço do AGN, na época (1999), corresponderia dizer que o preço final de mercado da tonelada de AGN estaria 83,9% mais alto (caro), em relação ao preço do AGR. A Tabela 3.8, elaborada a partir da Tabela 3.7, representa as taxas relativas de preços entre os agregados reciclados e naturais, em diversos locais de algumas regiões do Brasil, estimadamente, a partir do preço estimado para a tonelada do AGN de R\$ 7,50, em 1999.

Tabela 3.8 - Preços médios indicativos para os AGN, em regiões brasileiras (1), preço fixo estimativo para os AGR (2) e percentuais de preços do AGR em relação ao AGN, em 1999, a partir dos dados de Pinto (1999).

Cidades	Região	Preço médio para agregados britados (R\$/t) (1)	Preço estimado do agregado reciclado (R\$/t) (2)	Preço percentual (peso) do agregado reciclado em relação ao agregado natural (%)
Porto Alegre/RS	Sul	11,00	7,50	68,18%
Florianópolis/SC	Sul	15,80	7,50	47,47%
Curitiba/PR	Sul	11,44	7,50	65,56%
São Paulo/SP	Sudeste	13,33	7,50	56,26%
Santo André/SP	Sudeste	13,33	7,50	56,26%
Jundiaí/SP	Sudeste	11,33	7,50	66,20%
São José dos Campos/SP	Sudeste	11,36	7,50	66,02%
Ribeirão Preto/SP	Sudeste	11,56	7,50	64,88%
São José do Rio Preto/SP	Sudeste	12,00	7,50	62,50%
Rio de Janeiro/RJ	Sudeste	11,00	7,50	68,18%
Belo Horizonte/MG	Sudeste	11,00	7,50	68,18%
Brasília/DF	Centro-Oeste	18,67	7,50	40,17%
Goiânia/GO	Centro-Oeste	14,67	7,50	51,12%
Campo Grande/MS	Centro-Oeste	12,33	7,50	60,83%
Salvador/BA	Nordeste	20,00	7,50	37,50%
Vitória da Conquista/BA	Nordeste	18,67	7,50	40,17%
Recife/PE	Nordeste	18,00	7,50	41,67%
Fortaleza/CE	Nordeste	12,67	7,50	59,19%
Belém/PA	Norte	30,00	7,50	25,00%

(1) Pesquisa junto a distribuidores locais, para vendas de carga fechada, material posto em obra

(2) Conforme apresentado anteriormente

Fonte: (1) (PINTO, 1999, p. 144).

Como as jazidas naturais (rochas) vêm se tornando escassas e as distâncias de transporte, entre os centros urbanos e os novos locais de exploração, têm aumentado com o passar dos anos, a tendência é de aumento progressivo de preço dos agregados naturais. Por outro lado, com a descoberta de que o agregado reciclado é viável e sua matéria prima (RCD) provém de fonte renovável e, ainda, que sua geração é crescente nas grandes cidades brasileiras, a tendência é de que o preço do agregado reciclado decresça com o aumento da sua demanda. Assim, e com base nas estimativas apresentadas, sobre os preços comparativos entre os agregados reciclados e naturais, levando-se em conta que os seus sistemas e custos de produção são semelhantes, poder-se-ia dizer que a diferença de preço entre o agregado natural e o reciclado, no mínimo, se manteve de 1999 para os dias atuais. Portanto, poder-se-ia afirmar que em centros urbanos, nos dias atuais, o preço do agregado reciclado seria equivalente à metade do preço do agregado natural, caso o beneficiamento do RCD fosse uma prática regular nas cidades de médio e grande porte do Brasil, sem contar os benefícios sócio-econômicos e ambientais, advindos da prática de reciclagem dos RCD.

A Tabela 3.9 apresenta valores coletados de vários locais do mundo, relativos aos custos e preços dos agregados reciclados e agregados naturais, respectivamente.

Tabela 3.9 - Gestão de RCD na Comunidade Européia comparativamente aos valores praticados em São Paulo. Custos e preços em Euro/tonelada (1) (2).

Localidade	Custo disposição	Custo transporte	Custo reciclagem	Preço agreg. Reciclado	Preço agreg. Natural
Bélgica	5,90	2,65	3,57	5,95	7,14
Dinamarca	35,31	6,31	5,36	5,23	6,49
França	2,87	2,87	5,02	7,17	4,30
Alemanha	24,02	7,30	5,88	5,88	6,37
Irlanda	1,32	3,95	--	--	5,42
Itália	0,98	2,27	2,43	3,24	4,54
Holanda	26,09	2,61	6,52	5,43	7,61
Espanha	0,78	6,21	2,95	4,27	5,82
Reino Unido	3,52	4,23	3,52	7,04	8,45
São Paulo / Brasil	1,50	3,76	2,71	--	7,22

(1) IVBR, 1995

(2) Cotação do Branco Central para o Euro em 16 jul. 1999 - R\$ 1,847

Fonte: (PINTO, 1999, p. 144).

Segundo o pesquisador Pinto (1999, p. 144), os dados apresentados apontam para o Brasil, representado na tabela pela cidade de São Paulo, uma condição competitiva quanto ao preço final da tonelada produzida do agregado reciclado.

4 CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE RCD

4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

De acordo com Leite (2001), ao levantar considerações sobre a utilização de agregados reciclados para concretos, deve-se estabelecer uma quantidade de água suficiente, sem excesso, evitando o elevado consumo de cimento para se alcançar um custo compatível com a resistência desejada, a partir da realização de misturas experimentais. Ressalta a autora que na “utilização de material reciclado como agregado para concreto devem ser realizadas misturas experimentais do mesmo modo que estas misturas são feitas para concretos convencionais” (p. 78).

Devido às formas irregulares das partículas dos agregados reciclados, da alta taxa de absorção de água e texturas ásperas, a trabalhabilidade do concreto é uma das propriedades mais afetadas por estes agregados (LEITE, 2001). Em função disto é recomendável, para a dosagem de concretos com quaisquer tipos de agregados reciclados, a pré-umidificação destes materiais e, caso necessário, a utilização de aditivos plastificantes que permitam a redução do transporte interno de água da pasta de cimento para o agregado seco e poroso (QUEBAUD et al., 1999; PIETERSEN; FRAAY, 1998; HENDRIKS e PIETERSEN, 1998 apud LEITE, 2001, p. 79).

4.2 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS COM AGREGADOS DE RCD

Dentre as propriedades mais afetadas no concreto, com a utilização de agregado reciclado, a trabalhabilidade e o módulo de elasticidade são demonstrados como as mais afetadas (TOPÇU; GUNÇAN, 1995, apud BUTTLER, 2003). Os estudos de Carrijo (2005) apontaram que, além de influenciar na trabalhabilidade e no módulo de elasticidade do concreto, a utilização do agregado de RCD também pode influenciar na resistência à compressão.

Neste contexto, John e Agopyan (2001, p. 8) afirmaram que a redução de resistências mecânicas verificadas nos agregados reciclados de RCD, quando comparados com agregados naturais, influencia as propriedades mecânicas dos concretos que se utilizam destes materiais. Segundo os pesquisadores citados, esta condição de influência, dos agregados reciclados sobre as propriedades mecânicas do concreto, pode ser explicada devido

à presença de partículas correspondentes às fases mais porosas e de menor resistência mecânica, tais como as argamassas e os produtos cerâmicos presentes na composição dos AGR de RCD. Desta forma, estas referidas partículas provocam taxas excessivas de absorção de água. Assim, podem-se explicar as recomendações que limitam a utilização de agregados reciclados para a produção de concretos estruturais.

4.2.1 Massas específicas

De acordo com Buttler (2003), a massa específica dos concretos produzidos com agregados reciclados, no estado fresco, é tendenciosamente menor quando comparadas às massas específicas dos concretos convencionais. Este fato pode ser explicado devido aos menores valores de massas específicas dos agregados reciclados, os quais influenciam diretamente na mesma propriedade no concreto com AGR. Os concretos produzidos com agregados reciclados incorporam maior quantidade de vazios, o que também contribui para a redução dos valores de suas massas específicas no estado endurecido.

Os concretos com agregados reciclados podem ser caracterizados como intermediários entre o concreto leve e o convencional, em relação as suas massas específicas. A massa específica dos concretos com reciclados diminui, gradualmente, na medida em que se aumenta o teor de substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados, de acordo com Latterza e Machado Jr. (1999 apud LEITE, 2001, p. 80).

As Tabelas 4.1 e 4.2 mostram resultados de massa específica, respectivamente, de concretos no estado fresco e no estado endurecido, estudados por Buttler (2003, p.139-140), conforme nomenclatura descrita anteriormente para as amostras estudadas (Item 3.1.5).

Tabela 4.1 - Massa específica dos concretos no estado fresco.

Dosagem	Massa específica (kg/dm³)	Relação reciclado/natural
Referência	2,49	1,00
CR1	2,39	0,96
CR7	2,37	0,95
CR28	2,38	0,96
CRNA28	2,36	0,95

Fonte: (BUTTLER, 2003).

Tabela 4.2 - Massa específica do concreto no estado endurecido.

Dosagem	Massa específica seca (kg/dm ³)	Relação reciclado/natural	Massa específica saturada (kg/dm ³)	Relação reciclado/natural
Referência	2,406	1,00	2,517	1,00
CR1	2,262	0,94	2,398	0,95
CR7	2,226	0,92	2,371	0,94
CR28	2,241	0,93	2,387	0,95
CRNA28	2,190	0,91	2,346	0,93

Fonte: (BUTTLER, 2003).

Observam-se resultados na Tabela 4.1, que expressam valores menores, na ordem de 5%, para as massas específicas dos concretos no estado fresco com reciclados, em relação à correspondente massa específica do concreto natural.

Analisando os resultados da Tabela 4.2, observa-se que o concreto de referência apresentou maiores valores de massa específica seca e saturada, em relação aos concretos reciclados. Isto foi devido a um valor maior de massa específica do agregado natural, em relação ao agregado reciclado.

4.2.2 Trabalhabilidade

Os propósitos de utilização de concretos requerem boas condições de trabalhabilidade para lançamentos, adensamentos, moldagens e acabamentos satisfatórios, quer sejam para utilização em formas de elementos estruturais ou em outros locais que exijam limites e precisões dimensionais. De forma geral e prática, as características de boa trabalhabilidade de um concreto relacionam-se às facilidades de manuseá-lo. Todavia, ressalta-se que outras propriedades estão associadas à trabalhabilidade, tais como a consistência ou fluidez, exsudação, segregação, ar incorporado, coesão etc.

Para verificação da característica de consistência de um concreto, a qual está relacionada à trabalhabilidade, utiliza-se, sob condições normativas, o cone de Abrams. Este

aparato permite, então, mensurar a consistência ou fluidez de um concreto, a partir dos respectivos abatimentos do tronco de cone. Os procedimentos do ensaio para verificação da consistência de concretos pelo abatimento do tronco de cone estão preconizados na NBR NM 67 (ABNT, 1998).

Vale lembrar, conforme aponta Neville (1997, p. 196-199), que não existe um ensaio específico para medir ou avaliar diretamente a trabalhabilidade de um concreto, com expressão de resultado por meio de uma grandeza física. Entretanto, a trabalhabilidade é uma propriedade essencial quanto ao produto final, pois o concreto deve ter esta característica em condições de garantir um adensamento satisfatório e adequado, ao máximo de compacidade, “com uma quantidade razoável de energia, ou com a quantidade de energia que se esteja preparado para aplicar em determinadas condições”.

Para Leite (2001), a trabalhabilidade pode ser considerada uma das propriedades importantes do concreto no estado fresco, uma vez que exerce grande influência nas propriedades do concreto endurecido. A maioria dos pesquisadores afirma que os concretos com agregados reciclados apresentam menores índices de consistência, quando comparados às misturas com agregados naturais de mesmo traço. Isto se justifica pela maior porosidade do agregado reciclado, o qual, por conseguinte, absorve maior quantidade de água da mistura.

Latterza e Machado Jr. (2003) concluem que a absorção e índice de vazios pertinentes aos AGR influem na trabalhabilidade do concreto produzido com este tipo de material. Por outro lado, estes mesmos pesquisadores afirmaram que o comportamento dos concretos produzidos com AGR de RCD, quanto à perda de trabalhabilidade, todavia, apresentou-se semelhante ao comportamento do concreto de referência (dosado com agregados naturais).

Santos (2006) realizou seus estudos produzindo concretos com agregados graúdos reciclados de RCD, em diversas dosagens e com diferentes taxas de substituição do agregado graúdo natural pelos reciclados. Esta pesquisa apontou resultados aceitáveis relativos à trabalhabilidade destes concretos, verificada por meio de ensaios de abatimento do tronco de cone (*slump test*) e demais análises visuais. O pesquisador relata em seus estudos que todos os concretos produzidos apresentaram características normais de trabalhabilidade: “normalmente trabalháveis”. Porém, para que esta propriedade fosse conferida em condições aceitáveis aos concretos produzidos com AGR de RCD, houve necessidade de compensar a quantidade de água, significativamente absorvida por estes agregados graúdos reciclados, sem que a relação água/cimento predefinida para cada dosagem fosse alterada. Além disso, de acordo com Santos (2006, p. 92-95), a relação cimento/agregados e correspondente relação

água/cimento não tiveram influência significativa sobre o abatimento dos concretos. Para explicar este fato, o pesquisador cita Neville (1997), o qual, por sua vez, afirmou ser o teor de água o agente principal na influência sobre a trabalhabilidade dos concretos. Ainda, de acordo com Neville (1997, p. 197), fixando-se o teor de água e as proporções da mistura, num determinado concreto, a trabalhabilidade deste vai depender somente da forma e textura dos agregados e da distribuição granulométrica.

4.2.3 Perda de abatimento

Esta característica intrínseca aos concretos pode ser muito relevante em algumas situações construtivas, sobretudo quando o concreto é produzido em canteiro de obras, com tempo de transporte e lançamento longos. Esta característica que os concretos têm de perda da consistência ou fluidez é influenciada, basicamente, pelas condições de temperatura do ambiente, dos materiais constituintes do concreto e da umidade relativa do ar. Os procedimentos do ensaio que determina a perda de abatimento do concreto fresco, ao longo do tempo, podem ser consultados na NBR 10342 (ABNT, 1992).

Latterza e Machado Jr. (2003) realizaram estudos comparativos entre concretos produzidos com agregados naturais e reciclados. Nas dosagens, produziu concretos com substituições de 50 e 100% dos agregados graúdos naturais por reciclados, dentro de faixa granulométrica semelhante. Os concretos com AGR de RCD apresentaram condições satisfatórias de trabalhabilidade e muito parecidas com as características correspondentes aos concretos de referência, os quais foram produzidos com agregados naturais. As perdas de abatimento verificadas para os concretos de referência ocorreram em média, sob procedimentos e limites normativos recomendados, após 121 (cento e vinte e um) minutos. Para o concreto dosado com AGR, com taxa de 50% de substituição, após 93 (noventa e três) minutos atingiu-se o limite mínimo aceitável de abatimento. E, finalmente, para o concreto dosado com 100% de AGR este limite foi atingido aos 96 (noventa e seis) minutos. Portanto, os tempos limites verificados em condições aceitáveis de perdas de abatimento, relativos aos concretos dosados com AGR, apresentaram-se praticamente os mesmos e na ordem de 1,5 horas.

A perda de fluidez dos concretos é influenciada por uma significativa quantidade de variáveis relacionadas a este fenômeno. “Deve-se considerar a temperatura ambiente no local deste ensaio, a temperatura da água e do cimento, além da umidade relativa do ar. A

composição química do cimento e sua finura são fatores que também podem influenciar os resultados” (SANTOS, 2006, p. 93).

Quanto aos resultados obtidos para os concretos dosados com 100% de AGR e 100% de agregado miúdo natural (areia lavada de rio), quando comparados aos correspondentes concretos de referência (dosados com agregados graúdos e miúdos naturais), com todos os agregados graúdos apresentando dimensão máxima característica de 19 mm (brita n.º 1), escreveu o pesquisador:

Os concretos de referência apresentaram abatimentos iniciais muito próximos, entre 110 mm e 120 mm, e também perda de abatimento em tempos semelhantes, entre 165 e 180 minutos. Da mesma forma, os concretos com 100 % de agregado graúdo reciclado tiveram seus batimentos iniciais entre 55 mm e 60 mm e perda de abatimento entre 120 e 135 minutos [...] (SANTOS, 2006, p. 94).

A perda de abatimento nos concretos com AGR de RCD não é influenciada pelo traço (proporção cimento : agregado). Estes concretos sofrem perda de abatimento, ao longo do tempo, semelhante ao que ocorre nos concretos convencionais, desde que seja feita a compensação da água absorvida pelos AGR. “O tempo de perda de abatimento mostrou que os concretos com agregado graúdo reciclado podem ser transportados, lançados e adensados em tempo normalmente requeridos nas obras”. Todavia, os concretos com AGR perdem trabalhabilidade (abatimento), quando comparados aos correspondentes concretos de referência, sob as mesmas características e condições de dosagem (SANTOS, 2006, p. 94-95).

4.2.4 Resistência à compressão

“A resistência de um material é definida como a capacidade deste resistir à tensão sem ruptura. [...] No concreto, portanto, a resistência é relacionada com a tensão requerida para causar a fratura [ruptura]”. O ensaio padrão que determina a resistência à compressão uniaxial [ou axial] aos 28 dias é aceito mundialmente como um índice geral da resistência do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 44).

Fundamentalmente, os fatores que afetam a resistência à compressão dos concretos, uma das propriedades mais importantes e, essencialmente, valorizada pelos engenheiros projetistas, são as características e proporções dos materiais utilizados na mistura, relação entre água e cimento (a/c), adensamento e condições de cura. Outras variáveis que podem também influenciar a resistência surgem em decorrência, interdependência ou combinação dos fatores citados: tipo e teor de cimento, porosidade da matriz da pasta de

cimento e do agregado, ar incorporado, zona de transição (entre a matriz e o agregado gráudo), procedimentos durante a dosagem e demais etapas pertinentes ao ensaio e efeito da idade (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 43-62; NEVILLE, 1997, p. 276-310).

A resistência à compressão de concretos produzidos com agregados reciclados de RCD está situada no intervalo entre 60% e 100% dos valores das resistências dos concretos convencionais correspondentes. Esta propriedade de resistência do concreto é influenciada, principalmente, pela alta porosidade interna e baixa resistência das partículas do agregado gráudo reciclado (HANSEN, 1992; TOPÇU E GUNÇAN, 1995; VÁZQUEZ et al., 2001 apud CARRIJO, 2005, p. 95).

De acordo com Coutinho (1997), a resistência à compressão dos concretos produzidos com RCD só não é influenciada pelas características de resistência do agregado gráudo, quando este apresenta valores característicos de resistência muito superiores aos valores da resistência esperada para o concreto a ser produzido. Caso contrário, a resistência dos agregados deve ser levada em consideração na análise dos fatores que possam interferir em questões de resistências finais dos concretos.

Os valores de resistência à compressão dos concretos com agregados reciclados e concretos de referência, relativos aos estudos de Zordan (1997, p. 105), são apresentados na Figura 4.1. Para este estudo foram produzidos concretos com agregados miúdos e gráudos reciclados de RCD. Quatro tipos distintos de RCD (A, B, C e D) deram origem aos agregados utilizados nos correspondentes concretos, os quais foram dosados em três proporções (1:3, 1:5 e 1:7). Um outro concreto convencional de referência (R), com agregados naturais, foi também produzido. As consistências foram predeterminadas e fixadas num intervalo que garantisse a boa e adequada trabalhabilidade de todos os concretos, partindo previamente de ensaios realizados em traços pilotos.

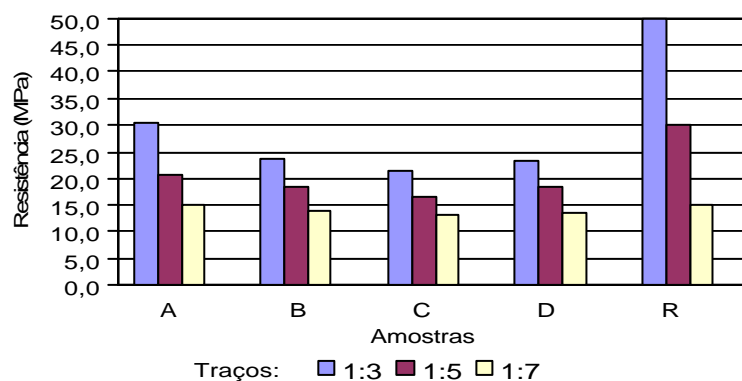


Figura 4.1 – Resistência à compressão simples do concreto aos 28 dias (ZORDAN, 1997).

Os estudos de Zordan (1997) apontaram que os concretos com agregados reciclados tendem a apresentar resistências inferiores, quando comparadas com as resistências obtidas para o concreto convencional (referência), conforme mostrou a Figura 4.1. Esta diferença entre as resistências equivalentes apresentou-se mais acentuada para as dosagens com traços mais ricos.

Por outro lado, a taxa de absorção do agregado reciclado pode diminuir o teor de água livre no concreto, quando este tipo de agregado é utilizado seco. Desta forma, poderá acontecer um incremento de aumento da resistência à compressão destes concretos com agregados reciclados de RCD, conforme afirmam (MACHADO Jr. et al., 1998 apud LEITE, 2001, p. 89).

Santos (2006) estudou as resistências à compressão aos 28 dias de idade de concretos dosados com agregado graúdo reciclado (AGR) de RCD e de concretos de referência, dosados com agregado graúdo natural (AGN). O AGN foi substituído por AGR em taxas que variaram de 25 a 100%, em 3 (três) grupos de traços de concretos (1 : 6,5 - pobre, 1 : 5,0 - intermediário e 1 : 3,5 - rico). Para cada grupo destes, produziu-se 5 (cinco) famílias: referência (com agregados graúdos naturais), A, B, C e D (com AGR) correspondentes às taxas de substituição de 25, 50, 75 e 100%, respectivamente. A relação entre água e cimento (a/c) correspondeu a 0,85 para os concretos pobres, 0,65 para os intermediários e 0,50 para os ricos. A Figura 4.2 apresenta os resultados da pesquisa.

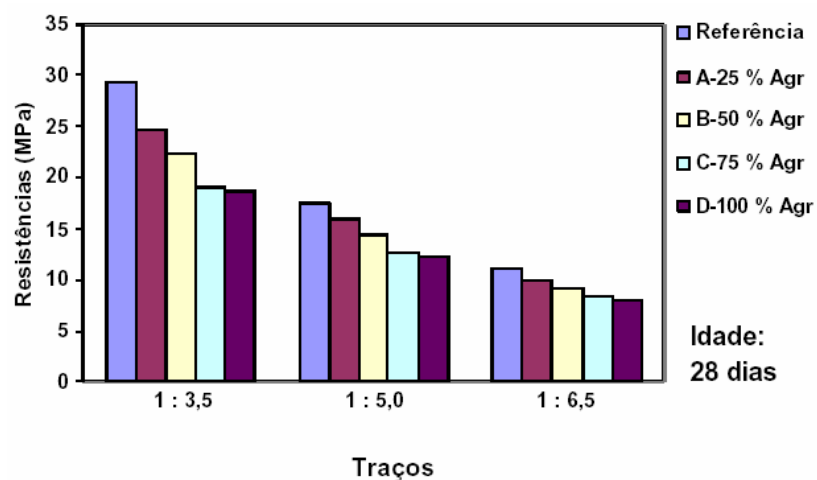


Figura 4.2 – Resistência à compressão aos 28 dias de idade (SANTOS, 2006, p.102).

Observa-se que, a partir dos valores de resistência à compressão apresentados na Figura 4.2, os concretos dosados com a presença de AGR apresentaram resistências inferiores aos correspondentes concretos convencionais (de referência). Os percentuais de redução da

resistência à compressão entre os concretos de referência e os concretos com 100% de AGR “(D-100% Agr)” foram de 36,5% para o traço rico (1 : 3,5), 29,5% para o traço intermediário (1 : 5,0) e 27,3% para o traço pobre (1 : 6,5).

4.2.5 Resistência à tração

Os elementos estruturais de concreto são, na maioria das vezes, projetados com premissa de que o concreto deve resistir até máxima solicitação de carga de compressão. De acordo com Mehta e Monteiro (1994), a resistência máxima à tração corresponderá de 7 a 11% do valor da resistência de compressão, para um mesmo elemento estrutural ou concreto. Entretanto, “as tensões de tração não podem ser ignoradas totalmente, porque a fissuração do concreto é freqüentemente a consequência de uma ruptura por tração” (p. 67). “À medida que a resistência à compressão do concreto aumenta a resistência à tração também aumenta, mas a uma velocidade decrescente” (p. 70).

Para Leite (2001, p. 96-97), a resistência à tração em concretos com agregados reciclados não obedece a um comportamento uniforme. Afirma a pesquisadora, de forma hipotética, que a resistência à tração leva em consideração mecanismos de aderência física entre as partículas, e que esta aderência é mais presente e relevante entre a matriz de concreto e a superfície dos grãos do agregado em materiais com forma mais irregular e textura mais rugosa. Sob essas condições, há um aumento da área superficial de contato e ocorre um maior entrelaçamento dos compostos de hidratação com os poros superficiais das partículas do material. Alicerçada no que fora exposto, portanto, escreveu a pesquisadora: “[...] avaliando as características do material reciclado, seria interessante mencionar que esse tipo de material oferece vantagens em relação às propriedades de aderência e, assim, o comportamento normal esperado seria uma melhoria da resistência à tração dos concretos produzidos com agregados reciclados”.

Os estudos de Santos (2006, p. 110) mostram os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, realizados em concretos de referência e correspondentes concretos dosados com AGR de RCD, aos 28 dias de idade, os quais são apresentados na Tabela 4.3 e Figura 4.3.

Os resultados de Santos (2006) apontam que os valores de resistência à tração dos concretos produzidos decrescem na medida em que o teor de substituição do AGN por AGR aumenta, bem como esse decréscimo de resistência, analogamente ao caso anterior, acontece

em função do empobrecimento do traço. Portanto, os resultados de Santos (2006) não corroboram a teoria de Leite (2001, p. 96-97).

Tabela 4.3 – Resistência à tração aos 28 dias de idade.

Traços / Resistências	Percentuais de substituição (%)				
	0	25	50	75	100
1 : 3,5	Ref	A1	B1	C1	D1
Resistência (MPa)	3,44	2,93	2,86	2,36	2,34
1 : 5,0	Ref	A2	B2	C2	D2
Resistência (MPa)	2,26	2,21	1,97	1,85	1,69
1 : 6,5	Ref	A3	B3	C3	D3
Resistência (MPa)	1,46	1,34	1,27	1,21	1,18

Fonte: (SANTOS, 2006, p.110).

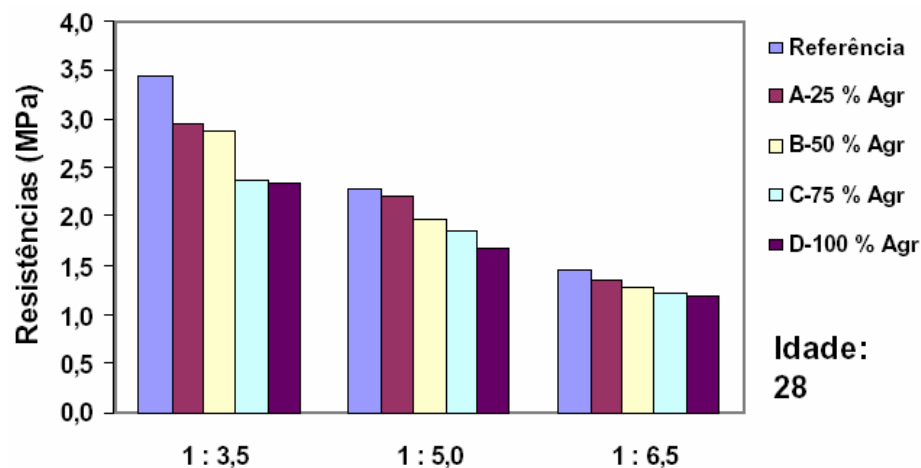


Figura 4.3 – Resistências à tração aos 28 dias de idade (SANTOS, 2006).

4.2.6 Módulo de deformação

De acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2003e) “o módulo de elasticidade pode ser considerado como um módulo de deformação, quando se trabalha com o material no regime elástico”. Para Mehta e Monteiro (1994, p. 81) “as deformações no concreto, que freqüentemente levam à fissuração, ocorrem como um resultado da resposta do material à carga externa e ao meio ambiente”. Portanto, segundo Levy (2001, p. 41), é fundamental o conhecimento sobre o módulo de deformação ou de elasticidade dos materiais, para os cálculos pertinentes a elaboração de projetos estruturais de engenharia.

Nesta condição, as flechas máximas admissíveis de um elemento estrutural de concreto armado devem ser determinadas a partir do estudo do módulo de deformação, para que não ocorram fissuras comprometedoras à estabilidade e durabilidade das estruturas.

Neville (1997, p. 413) enfatiza que não só a resistência à compressão dos concretos é de fundamental importância nos projetos estruturais, pois qualquer tensão é acompanhada de uma deformação e vice-versa, mesmo sabendo que as deformações podem surgir não somente por exclusividade de tensões. Conseqüentemente, o estudo da relação tensão-deformação num elemento estrutural de concreto deve ser bem elaborado e compreendido.

De forma geral, os fatores que afetam o módulo de deformação do concreto são: agregado graúdo, matriz da pasta de cimento, zona de transição e parâmetros de ensaio. Existe uma relação direta entre massa específica e módulo de deformação, em materiais homogêneos. No caso do concreto, que é considerado um material heterogêneo (multifásico), seu comportamento elástico é determinado pela fração volumétrica, massa específica, pelo módulo de deformação dos principais constituintes e pelas características da zona de transição. Os fatores que afetam a porosidade do agregado, da matriz da pasta de cimento e da zona de transição devem ser, ao mesmo tempo, considerados relevantes na influência sobre o módulo de deformação do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 89-91).

Segundo Leite (2001), os concretos produzidos com AGR de RCD apresentam-se mais deformáveis do que os concretos convencionais. A autora cita Levy (1997) para justificar este fato, o qual, por sua vez, afirma ser a camada de argamassa antiga, que geralmente se apresenta aderida às superfícies das partículas do AGR, e a maior porosidade dos materiais que compõem o RCD, como responsáveis pela maior deformabilidade verificada em concretos produzidos com AGR de RCD, quando comparados aos concretos convencionais.

O módulo de deformação do concreto depende, fundamentalmente, da pasta de cimento hidratada e do agregado graúdo utilizado. Quanto ao agregado, a granulometria, a dimensão máxima, a textura, a forma e a composição mineralógica são características importantes que, conseqüentemente, também influenciam o módulo de deformação dos concretos.

A Figura 4.4 apresenta os valores do módulo de deformação em função da taxa de substituição do agregado graúdo natural (AGN) por agregado graúdo reciclado (AGR), relativos aos estudos de Leite (2001).

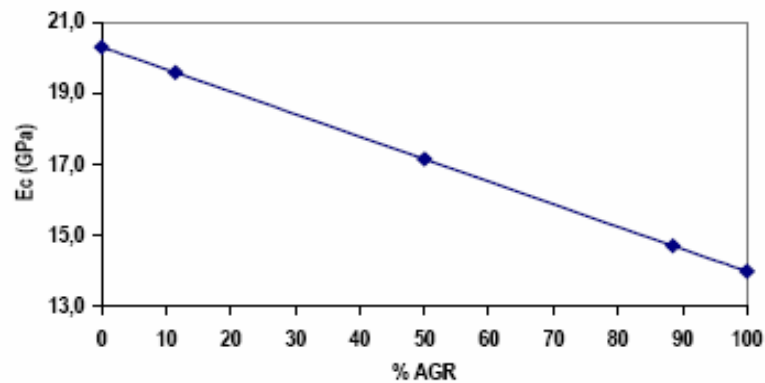


Figura 4.4 – Módulo de deformação em função de AGR (LEITE, 2001, p. 204).

Nestes estudos de Leite (2001) e de acordo com os resultados da Figura 4.4, o valor do módulo de deformação decresceu em função do aumento da taxa de substituição do AGN pelo AGR, numa razão constante. Em outras palavras, a relação entre o módulo de deformação e a taxa de substituição do AGN por AGR, representada pela curva (reta), nos estudos de Leite (2001), expressou o comportamento de uma função linear de grandezas inversamente proporcionais. Dessa forma, tal como apresentado no gráfico de Leite (2001), a relação entre essas duas grandezas apresentou característica atípica de comportamento, porquanto, geralmente, são verificadas relações não significativamente proporcionais entre as duas variáveis em questão, o que geraria, assim, gráficos representados por curvas não tanto lineares (retas).

5 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Para o desenvolvimento experimental, elaborou-se o planejamento das etapas necessárias ao cumprimento dos objetivos anunciados para o presente estudo. De forma sintetizada e prática, estas etapas abrangeram:

- a) Determinação da origem, coleta e do beneficiamento do RCD;
- b) Definição dos ensaios e aquisição de normas da ABNT;
- c) Verificação das condições dos equipamentos disponíveis para os ensaios;
- d) Adequações de espaços internos do laboratório e construção de novos aparatos;
- e) Escolha e aquisição dos materiais e ferramental;
- f) Estudo e definição do método de dosagem;
- g) Produção dos concretos;
- h) Identificação dos corpos-de-prova;
- i) Elaboração de mecanismos gerenciais para execução e controle dos ensaios;
- j) Execução dos ensaios de caracterização dos agregados para os concretos;
- k) Execução dos ensaios nos concretos, no estado fresco e endurecido;
- l) Anotações e organização dos resultados obtidos nos ensaios;
- m) Elaboração de gráficos comparativos das propriedades físicas e mecânicas dos concretos;
- n) Elaboração dos gráficos de dosagem a partir de regressões matemático-estatísticas;
- o) Compilação, edição e apresentação das equações obtidas por intermédio das regressões matemático-estatísticas;
- p) Apresentação e análises dos resultados.

O detalhamento dos materiais e métodos necessários para a execução dessas etapas do desenvolvimento experimental, visando atingir os objetivos propostos nesta pesquisa, é apresentado nos Itens 5.1 e 5.2 a seguir.

5.1 MATERIAIS

Para a produção dos concretos de referência (CR), utilizou-se:

- Cimento CII - F - 32 – a adoção deste tipo de cimento foi devido a sua ampla utilização, especificamente na construção civil goiana;
- Agregado graúdo natural britado proveniente de rocha micaxisto, com partículas de dimensão máxima característica igual a 19 mm – faixa granulométrica correspondente à brita n.º 1;
- Agregado miúdo: areia média quartzosa lavada de rio;
- Água potável proveniente da rede de abastecimento público – SANEAGO.

Os materiais constituintes dos concretos dosados com agregados graúdos reciclados (AGR) foram:

- Cimento CII F-32;
- Agregado graúdo natural (AGN) britado proveniente de rocha micaxisto, na granulometria correspondente a brita n.º 1 (partículas com dimensão máxima característica de 19 mm);
- Agregado graúdo reciclado (AGR) proveniente de RCD, na granulometria correspondente a brita n.º 1 (partículas com dimensão máxima característica de 19 mm);
- Agregado miúdo natural (AMN) – areia quartzosa lavada de rio; e
- Água potável proveniente da rede de abastecimento público (SANEAGO).

5.2 MÉTODOS

5.2.1 Origem, coleta e beneficiamento dos resíduos de construção (RCD)

Os RCD foram provenientes de edifício residencial de múltiplos pavimentos.

A obra escolhida para a coleta do material desta pesquisa encontrava-se em etapa construtiva de execução da estrutura de concreto armado e alvenarias, correspondendo à construção de um edifício residencial de múltiplos pavimentos, na cidade de Goiânia-GO. A empresa construtora deste edifício fez parte do grupo de empresas goianas, da capital, que participou do Programa de Gerenciamento de Resíduos Sólidos em Canteiros de Obras, tal como foi explanado no Capítulo 2, Item 2.1. A Figura 5.1 retrata o aspecto externo (fachada) desta obra, onde se pode observar algumas etapas construtivas em andamento, no instante em que se coletou o material (RCD).



Figura 5.1 – Aspecto externo da obra geradora do RCD utilizado para a produção de concretos com AGR.

A coleta seletiva de RCD “Classe A” foi realizada no canteiro de obra, com acondicionamento em caçamba, conforme mostra a Figura 5.2;



Figura 5.2 – Coleta seletiva de RCD “Classe A” no canteiro de obra.

Os RCD foram processados em um sistema de britagem simplificado, com a utilização de um britador de mandíbulas. A dimensão máxima das partículas do AGR obtido foi de 19 mm (zona granulométrica correspondente a brita n.º 1), predefinido pelas peneiras do sistema de britagem. O sistema de britagem produziu tanto o agregado graúdo reciclado (AGR) como o agregado miúdo reciclado (AMR). Todavia, o AMR foi descartado, pois não era de interesse para esta pesquisa. A Figura 5.3 mostra o aspecto das pilhas de agregados reciclados (AGR e AMR), logo após o processamento dos RCD.



Figura 5.3 – AGR e AMR após britagem do RCD em FURNAS-GO.

Logo após a britagem fez-se o transporte do AGR para o Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal de Goiás e o acondicionamento adequado, para evitar a contaminação deste material, conforme mostram as Figuras 5.4a e 5.4b. O Agregado graúdo reciclado (AGR) foi utilizado sem a realização de qualquer procedimento para retirada de impurezas (contaminantes). Portanto, utilizou-se o AGR para a produção dos concretos nas mesmas condições em que este saiu do sistema de britagem.



Fig. 5.4a



Fig. 5.4b

Figuras 5.4a e 5.4b – Acondicionamento do AGR.

5.2.2 Agregados e ensaios de caracterização

A NBR NM 27 (ABNT, 2001a) preconiza o método que se deve seguir para redução das quantidades originais dos agregados em quantidades menores, suficientes e necessárias para a realização dos ensaios de caracterização, sem que a amostra reduzida perca a sua representatividade em relação ao material original. Para a redução das amostras dos agregados foram seguidos os procedimentos normativos.

Os agregados graúdos, tanto o natural quanto o reciclado de RCD, foram obtidos na faixa granulométrica correspondente ao tamanho de “pedra ou brita nº. 1”, com dimensão máxima característica igual a 19 mm.

Os ensaios de caracterização dos agregados foram realizados de acordo com normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, no Laboratório de Materiais de Construção da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás - LMC/EEC/UFG. Os resultados de todos os ensaios executados e relativos aos agregados são apresentados no Item 6.1 do Capítulo 6.

AGREGADO GRAÚDO RECICLADO – AGR

A escolha das características do AGR, originadas a partir dos RCD processados, se deu em função das particularidades da obra cedente. Optou-se por RCD proveniente da execução de edifício residencial de múltiplos pavimentos, com etapa de execução das estruturas em andamento e de tecnologia construtiva convencional. Justifica-se essa escolha por ser o atual perfil regional de tecnologia construtiva e, provavelmente, este panorama não deve sofrer mudanças significativas, em curto e médio prazo. Por outro lado, esta categoria de edificação, de condomínios residenciais verticalizados, vem produzindo significativa parcela do volume total dos RCD em Goiânia-GO e noutras grandes cidades brasileiras. Caracterizou-se o AGR a partir dos seguintes ensaios:

- Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório
– NBR NM 27 (ABNT, 2001a);
- Determinação da composição granulométrica
– NBR NM 248 (ABNT, 2003c) e NBR 7211 (ABNT, 2005c);

- Abrasão *Los Angeles* – NBR NM 51 (ABNT, 2001b);
- Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água – NBR NM 53 (ABNT, 2003b);
- Determinação da massa unitária – NBR 7251 (ABNT, 1982); e
- Determinação da composição dos agregados reciclados graúdos por análise visual – NBR 15116 (ABNT, 2004).

AGREGADO GRAÚDO NATURAL – AGN

O AGN de “micaxisto” foi escolhido como agregado graúdo natural (AGN) por ser um material de consumo regional e popular. Sua procedência foi do município de Aparecida de Goiânia. Caracterizou-se o AGN com a realização dos ensaios de:

- Determinação da composição granulométrica – NBR NM 248 (ABNT, 2003c) e NBR 7211 (ABNT, 2003a);
- Abrasão *Los Angeles* – NBR NM 51 (ABNT, 2001b);
- Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água – NBR NM 53 (ABNT, 2003b); e
- Determinação da massa unitária – NBR 7251 (ABNT, 1982).

AGREGADO MIÚDO NATURAL – AMN

Utilizou-se areia quartzosa lavada de rio como agregado miúdo natural, pelo fato desta areia ser de fácil aquisição, sem impurezas, de uso tradicional e popular na região. Este material teve procedência do Rio do Peixe, município de Faina-GO. Os ensaios pertinentes ao AMN foram:

- Determinação da composição granulométrica – NBR NM 248 (ABNT, 2003c) e NBR 7211 (ABNT, 2005a);
- Determinação da massa específica e massa específica aparente – NBR NM 52 (ABNT, 2003a); e

- Determinação da massa unitária – NBR 7251 (ABNT, 1982).

5.2.2.1 Determinação da composição granulométrica

Os ensaios de determinação da composição granulométrica dos agregados graúdos (natural e reciclado) e miúdo (areia) foram realizados de acordo com os procedimentos recomendados pela NBR NM 248 (ABNT, 2003). Para a execução dos ensaios utilizou-se um sistema vibratório de peneiras metálicas acopladas, com aberturas de malhas de acordo com a Norma. No Capítulo 6, Itens 6.1.1.1, 6.1.2.1 e 6.1.3.1 são apresentados os resultados dos ensaios de granulometria dos agregados graúdos (AGN e AGR) e miúdo (AMN), com as suas respectivas curvas granulométricas e peneiras de séries normal e intermediária utilizadas.

Especificamente, para a determinação da granulometria do AGR, o volume total de agregado obtido a partir do beneficiamento do RCD, equivaleu a 2,5 m³. Este material foi reduzido para 1,0 m³, em consonância com o Item 5.3.2 (Método B – Quarteamento) da NBR NM 27 (ABNT, 2001a). A figura 5.5 mostra as frações retidas da amostra do AGR ensaiada, em cada peneira.



Figura 5.5 – Ensaio de determinação da composição granulométrica do AGR.

5.2.2.2 Abrasão *Los Angeles*

Seguindo as especificações da NBR NM 51 (ABNT, 2001b), utilizou-se a graduação “B” da “Tabela 2”, tanto para o AGR quanto para o AGN, na determinação da quantidade de material necessário ao ensaio de Abrasão *Los Angeles*, pois os ensaios de determinação da composição granulométrica apontaram para ambos a dimensão máxima característica das partículas igual a 19 mm (pedra ou brita n.º 1), o que serviu de parâmetro para a escolha da graduação “B”, anteriormente citada. A massa da amostra ensaiada conteve, sob estas condições normativas, o equivalente a 2.500,0 gramas do material retido na peneira de 12,5 mm e 2.500,0 gramas do material retido na peneira de 9,5 mm, totalizando 5.000,0 gramas. Posteriormente, estas duas frações do material foram lavadas em água corrente e secadas em estufa, separadamente, numa temperatura de 107,5 °C, com tolerância de variação de 2,5 °C, para mais ou para menos. Após a secagem, aferiu-se a massa do material, bem como as duas frações deste material foram misturadas. Em seguida, introduziu-se a amostra dentro do tambor da máquina *Los Angeles*. A carga abrasiva foi definida de acordo com a “Tabela 1” da referida Norma, em função da graduação “B” escolhida. Assim, determinou-se a carga abrasiva ($4.584,0 \pm 25$ gramas), a qual equivaleu ao total de 11 esferas de aço. A massa de cada esfera correspondeu a um valor compreendido no intervalo de 390,0 a 445,0 gramas. Após 500 rotações do tambor, numa velocidade de rotação de 30 a 33 rpm, retirou-se o material, o qual passou por um sistema de peneiras. A Figura 5.6 mostra as frações do material retido em cada peneira, enquanto a Figura 5.7 retrata a máquina *Los Angeles*.

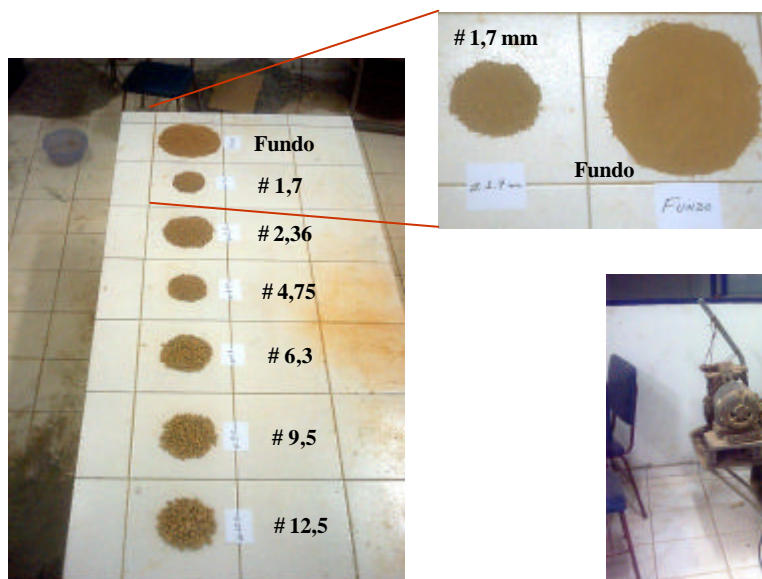


Figura 5.6 – Material retido nas peneiras após o ensaio de abrasão



Figura 5.7 – Máquina *Los Angeles*

5.2.2.3 Determinação da massa específica e absorção de água

Os ensaios de determinação de massa específica foram realizados tanto para os agregados graúdos reciclados quanto para os agregados graúdos naturais, conforme a NBR NM 53 (ABNT, 2003b). Para o agregado miúdo natural utilizou-se a NBR NM 52 (ABNT, 2003a).

Quanto aos ensaios de determinação da massa específica e absorção de água do AGR, a figura 5.8 exibe a aferição de massa numa amostra seca do AGR, antes da imersão em água por 24 horas. Esta amostra, antes do procedimento de imersão foi lavada em água corrente, enquanto acondicionada em peneira com abertura de malha quadrada de 4,75 mm e, posteriormente, secada em estufa por 24 horas numa temperatura constante de aproximadamente 105 °C. Este material (AGR) permaneceu por duas horas exposto às condições do ambiente (laboratório), logo após sua retirada da estufa. Neste momento, a temperatura estava em 28 °C e a umidade relativa do ar em 65%. A Figura 5.9 mostra o momento da pesagem hidrostática durante o ensaio de absorção do AGR, também o aparato que se construiu para atender às exigências normativas, preconizadas pela NBR NM 53 (ABNT, 2003b).



Figura 5.8 – Aferição de massa da amostra seca do AGR.



Figura 5.9 – Pesagem hidrostática no ensaio de absorção do AGR.

Após 24 horas de imersão do AGR em água, fez-se a leitura de massa da amostra ainda imersa (“pesagem hidrostática”). Procedeu-se, em seguida, a retirada da amostra do reservatório de água e remoção da água adsorvida e demais excessos superficiais, ou seja, remoção da quantidade de água não absorvida para o interior das partículas do AGR, a qual ficou aderida em torno das superfícies destas partículas do agregado. Desta forma, levou-se o AGR ao estado conhecido como “SSS” (agregado saturado com superfície seca). Conforme visto no Item 3.1.4 do Capítulo 3, este estado “SSS” atribuído aos agregados graúdos, teoricamente, seria a condição ideal para sua utilização em dosagens de concreto. Pois, nesta condição, não consumiria parcela da água calculada para uma determinada dosagem, em função de sua capacidade de absorção, nem tampouco acrescentaria água à dosagem por conta da água adsorvida ou por excessos de água presente nas superfícies das partículas. Conseqüentemente, dessa forma, pode-se melhor garantir que a relação entre a água e o cimento (a/c), calculada para uma dosagem, seja mantida durante o processo de mistura e durante o tempo necessário para o lançamento do concreto, sem comprometimentos às suas propriedades requeridas de bom desempenho, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

A Figura 5.10 retrata o procedimento realizado para remoção da água excedente, logo após a retirada da amostra que permaneceu imersa por 24 horas. Desta forma, procedeu-se a pesagem da amostra na condição “SSS” do AGR, cujo resultado, juntamente com os valores anteriormente obtidos da “pesagem hidrostática” e da amostra original seca (3 kg), foi utilizado para os cálculos da massa específica, massa específica aparente e absorção de água do AGR, de acordo com a NBR NM 53 (ABNT, 2003b).



Figura 5.10 – Remoção da água excedente da amostra saturada do AGR.

Conforme visto na Figura 5.9, foi confeccionado um par de cestas para facilitar a realização de ensaios extras, relativos à evolução da taxa de absorção nos AGR ao longo do tempo. Como parte do sistema de pesagem hidrostática, as duas cestas cilíndricas foram confeccionadas com malhas metálicas quadradas para fechamentos das laterais e dos fundos. A cesta externa foi estruturada com alça em condição de acoplamento ao resto do sistema e com malha de abertura igual a 4mm^2 . A outra, sem alça, com abertura de malha mais fina, igual a $1,0\text{mm}^2$, encaixava-se por dentro da cesta com alça, sem possibilitar o deslocamento entre ambas, enquanto imersas em água. A cesta interna, com abertura de malha correspondente a 2mm^2 , teve a função de reter as pequenas partículas da amostra do AGR, em situação de imersão, bem como de facilitar a colocação e retirada destas amostras durante as pesagens hidrostáticas sucessivas, sem que fosse preciso ser removida a cesta acoplada ao sistema de pesagem (cesta externa), o que poderia prejudicar as condições adequadas de posição, nivelamento e, conseqüentemente, de precisão de leitura da balança, caso remoções e recolocações sucessivas da cesta fossem feitas.

Dessa forma, buscou-se saber o comportamento evolutivo da taxa de absorção do AGR, em função do tempo, uma vez que, conforme visto, o ensaio realizado para a determinação da absorção de água do agregado, relativo à NBR NM 53 (ABNT, 2003b), resultou apenas no conhecimento da taxa de absorção após 24 horas de imersão da amostra em água. Entretanto, precisava-se conhecer a taxa de absorção relativa ao tempo pré-estabelecido para a realização de cada mistura de concreto, em betoneira; caso contrário, a água estipulada para determinada dosagem seria modificada, para menos, devido à significativa taxa de absorção pertinente ao AGR. Em conseqüência disso, a relação entre a água e o cimento (a/c) seria efetivamente alterada, de forma indesejada.

Além disso, necessitava-se ter conhecimento sobre o comportamento evolutivo da referida taxa de absorção no decorrer do tempo, a partir do momento em que o AGR entrasse em contato com a água, dentro da betoneira, até um determinado prazo decorrido, dentro do qual a trabalhabilidade não deveria sofrer influências negativas pelas condições da absorção de água e, tampouco, que a quantidade de água livre necessária para as reações de hidratação do cimento fosse, significativamente, modificada neste período. A partir disso, julgou-se necessário fazer a compensação da água absorvida pelo AGR, durante um intervalo equivalente e representativo do tempo médio gasto para o preparo e lançamento do concreto, em condições de produção em canteiros de obra. Para tanto, realizou-se ensaios extras que puderam resultar em valores da taxa de absorção do AGR, mensurados a partir do instante em que a amostra foi totalmente imersa, em água, até vários intervalos de tempos decorridos. Os

resultados destes ensaios prévios e o correspondente gráfico, que representa a taxa de absorção do AGR em função do tempo, podem ser vistos no Item 6.1.2.2 do Capítulo 6.

5.2.2.4 Determinação da massa unitária

Por definição, a massa unitária do agregado no estado solto é a relação ou quociente entre a massa do material lançado num recipiente e o seu volume. Portanto, levam-se em conta os vazios existentes entre as partículas do agregado. Mensurar a massa unitária é de muita relevância para especificação de traços de concreto produzidos em canteiros de obra, onde a dosagem é procedida com medidas dos materiais em volume. Para a execução deste ensaio do agregado no estado solto, utilizou-se um recipiente metálico, previamente aferido quanto ao seu volume útil, de fundo quadrado com dimensão interna de lados igual a 316 mm e altura de 200 mm. Os procedimentos seguiram as orientações da NBR 7251 (ABNT, 1982).

5.2.2.5 – Determinação da composição do AGR por análise visual

O ensaio de determinação da composição do AGR foi realizado com a utilização de lupas. A amostra provisória foi retirada do local onde estava acondicionado o material reciclado, de acordo com as especificações da NBR 15116 (ABNT, 2004). A massa total de ensaio foi de 5,0 kg (quilos). Uma quantidade maior que a massa de ensaio foi lavada em água corrente, dentro de uma peneira de abertura de malha igual a 4,8 mm. Após isso levou-se o material para a estufa, onde permaneceu até a estabilidade de massa, numa temperatura constante de 105 °C, com tolerância de variação de 5 °C para mais ou para menos.

Após a constância de massa, o material foi retirado da estufa e permaneceu em temperatura ambiente até seu resfriamento. Pesou-se, então, a quantidade de 4,0 kg em balança de precisão. Logo após a aferição da massa, iniciou-se o processo de separação das partículas, em quatro grupos:

- Grupo 1: fragmentos que apresentam pasta de cimento endurecida em mais de 50% do volume;
- Grupo 2: fragmentos constituídos por rocha em mais de 50% do volume;
- Grupo 3: fragmentos de cerâmica branca ou vermelha, com superfície não polida, em mais de 50% do volume;

- ❖ Grupo 4: fragmentos de materiais não minerais de natureza orgânica, tais como madeira, plástico, betume e materiais carbonizados, e de contaminantes como vidros, vidrados cerâmicos e gesso.

Após a separação de todas as partículas da amostra, as massas de cada um dos quatro grupos foram aferidas. As porcentagens correspondentes de cada grupo em relação à massa total da amostra foram calculadas, assim como demonstra a Figura 5.11 que permite visualizar as frações de cada um destes grupos.

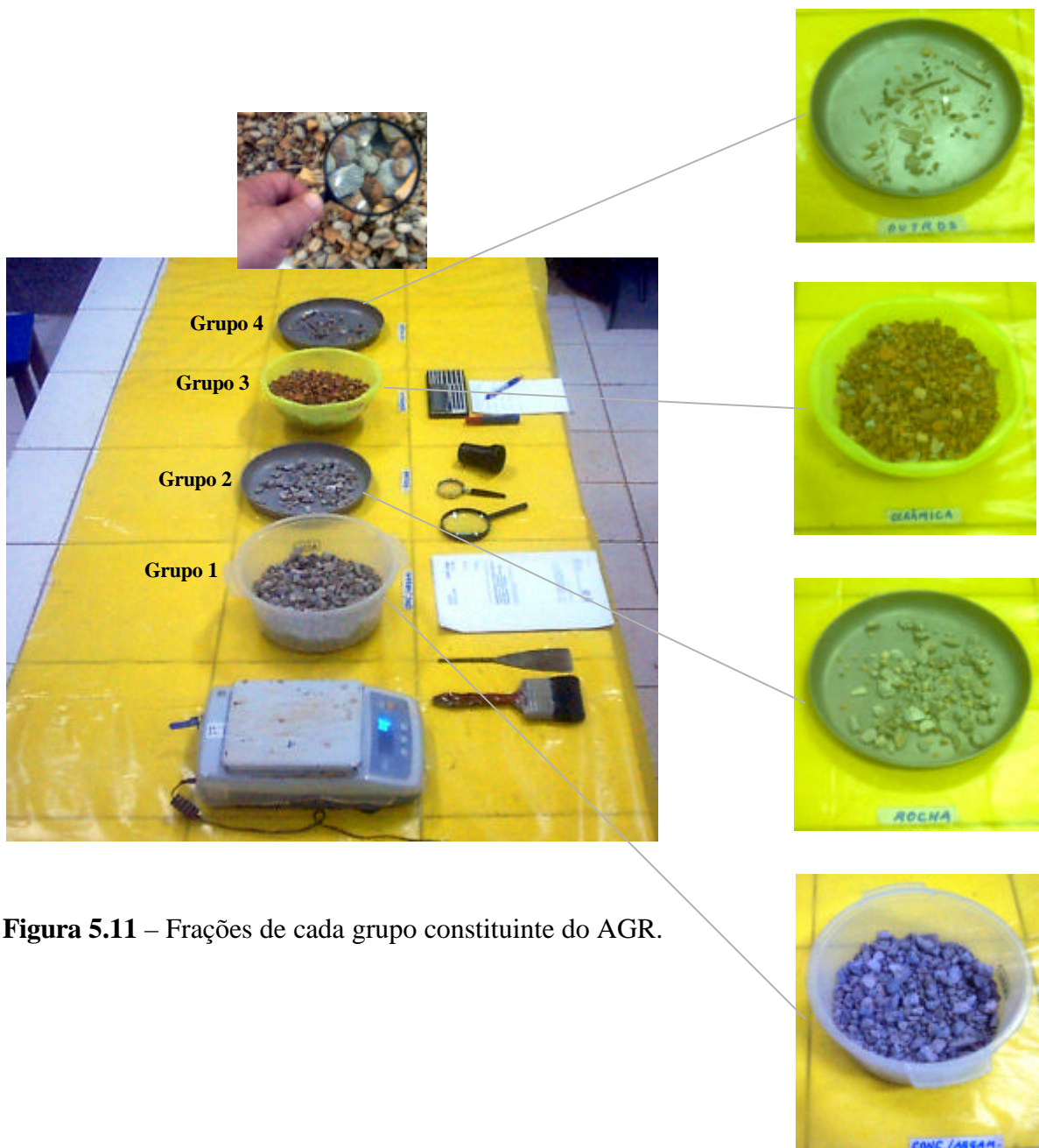


Figura 5.11 – Frações de cada grupo constituinte do AGR.

5.2.3 Organograma para a produção dos concretos

Foram produzidas quatro famílias de concretos com AGR e AMN (*CAGR*) e uma família de concretos de referência (*CR*) com AGN e AMN. As quatro famílias de concretos com AGR (*CAGR*) foram formadas por diferentes taxas de substituições do AGN por AGR, as quais foram de 25, 50, 75 e 100%. Para cada uma das cinco famílias de concreto, produziram-se três traços: pobre (1 : 6,5), intermediário ou normal (1 : 5,0) e rico (1 : 3,5). O organograma, representado na Figura 5.12, permite uma compreensão mais clara dos tipos de concretos que foram produzidos.

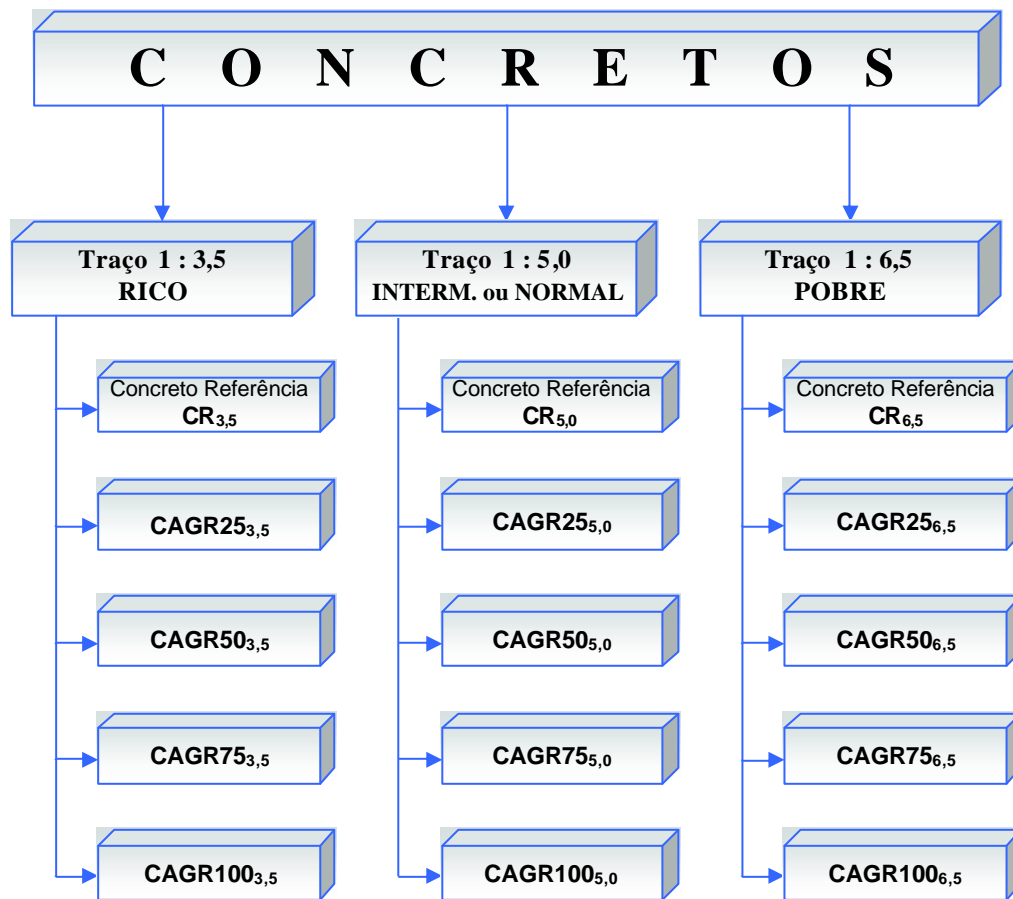


Figura 5.12 – Organograma para a produção dos concretos.

De acordo com a Figura 5.12, por exemplo, para cada uma das cinco famílias (*CR*, *CAGR25*, *CAGR50*, *CAGR75* e *CAGR100*), produziu-se concretos nos traços de dosagem [1 : 3,5], os quais passaram a ser identificados como: [*CR_{3,5}*], [*CAGR_{25,5}*], [*CAGR_{50,5}*], [*CAGR_{75,5}*] e [*CAGR_{100,5}*]. Analogamente, esta nomenclatura indexada com

subscrição numérica, que indica a proporção de dosagem [cimento : agregados secos (m)], foi utilizada para identificar as demais famílias e suas correspondentes proporções de dosagem, em massa.

5.2.4 Método de dosagem

Os concretos foram produzidos segundo o método de dosagem intitulado *Método IPT/EPUSP*, o qual foi desenvolvido por pesquisadores vinculados ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), conforme apresentado no Manual de Dosagem e Controle do Concreto (Helene; Terzian, 1992, p. 225-299). Este método para dosagem de concretos estruturais permite expressar a partir de um sistema de eixos ortogonais, similares ao sistema de eixos cartesianos, do 1.º ao 4.º quadrante, no sentido horário: a curva ou “Lei de Abrams”, a curva (reta) do abatimento (“Lei de Lyse”), o consumo de cimento em função da proporção “cimento : agregados secos” (Quadrante de Molinari) e o quadrante de consumo de cimento em função da resistência à compressão, respectivamente.

Para os concretos convencionais ou de referência seguiu-se, a rigor, os procedimentos especificados no método citado, partindo-se da premissa que seriam necessários três pontos para se determinar uma curva representativa da correlação entre duas características ou propriedades do concreto estudado, em cada um dos quadrantes mencionados anteriormente. Para isso, inicialmente, executou-se um traço piloto na proporção de 1 : 5,0 [cimento : agregados secos totais (m)], em massa, nomeado traço intermediário ou normal. Por tentativas e observações práticas, ajustou-se o teor de argamassa ideal nesta proporção de mistura, com acréscimos de AMN e cimento até ser obtido o aspecto esperado, mantendo-se a proporção inicial pré-estabelecida (1 : 5,0). Acertou-se, então, a consistência do concreto, dentro de limites que promoveram características visualmente aceitáveis, realizando pequenos acréscimos de água a partir de uma proveta graduada. A medida da consistência foi aferida pelo abatimento do tronco de cone, a qual foi considerada aceitável caso estivesse num determinado intervalo entre 50 e 120 milímetros (concreto trabalhável).

Mantendo-se o mesmo valor do teor ideal de argamassa definido no traço anterior (1 : 5), executou-se mais dois traços: um na proporção de 1 : 3,5, nomeado de traço rico, e o outro na proporção de 1 : 6,5, que foi chamado de traço pobre, para os quais foram também adequados os valores da medida de consistência, sob os mesmos critérios de aferição e aceitabilidade adotados para o concreto normal ou intermediário.

Os ensaios relativos às taxas de absorção do AGR apresentaram resultados significativamente altos, o que tornou imprescindível o conhecimento das condições do processo evolutivo destas taxas, ao longo do tempo, para a determinação de procedimentos de dosagem dos concretos com material reciclado. Decidiu-se, portanto, levar em consideração a quantidade de água absorvida pela parcela de AGR, nos concretos que os continham. Apesar do AGN também absorver água, porém em quantidade muito pequena, não se levou em consideração os efeitos desta absorção nos parâmetros de dosagem.

5.2.5 Determinação e ajustes de traços para os concretos

Para cada um dos 3 (três) grupos de concretos, (1 : 3,5 – rico); (1 : 5 – intermediário) e (1 : 6,5 – pobre), a relação entre a água e o cimento (a/c) foi acertada em função da trabalhabilidade (aceitável) que, por sua vez, foi definida com ajuda de traços pilotos. Neste momento, também foi avaliado e aferido o teor de argamassa ideal, a partir do concreto de referência correspondente ao traço intermediário (1 : 5). Estes mesmos parâmetros de dosagem usados para aos concretos de referência foram avaliados e também empregados nos correspondentes traços críticos, ou seja, nos traços dos concretos com 100% de substituição do AGN por AGR. Assim, foram definidas e mantidas as relações a/c para cada um dos 5 (cinco) concretos pertencentes ao grupo de mesma proporção de dosagem (traço 1 : m). Porém, para que a relação a/c fosse garantida nos concretos com AGR, os quais absorvem excessivamente a água, fez-se a chamada “compensação de água”, em função da massa de AGR a ser utilizada na dosagem.

Previamente, esperava-se que as substituições gradativo-parciais do agregado gráúdo natural (AGN) pelo agregado gráúdo reciclado (AGR) pudessem provocar perdas de trabalhabilidade (consistência) nos concretos, na medida em que o AGN fosse substituído pelo AGR. Portanto, o valor da medida da consistência deveria estar compreendido num determinado intervalo, de máximo e mínimo, para que atendesse a todas as dosagens de concretos sem comprometimento de suas características de adequada trabalhabilidade (consistência). Sob estas condições foram produzidos os concretos de referência e todos os demais concretos com AGR de RCD, bem como a organização dos dados obtidos das dosagens. A Figura 5.13 registra o momento da verificação visual do teor de argamassa num concreto intermediário (1 : 5,0) com 50% de teor de substituição [CAGR50_{5,0}].



Figura 5.13 – Verificação do teor de argamassa.

5.2.6 Critérios para dosagem dos concretos

Para a dosagem experimental dos concretos, buscou-se desenvolver procedimentos que pudessem ser normalmente adotados e, sobretudo, facilmente colocados em prática nos canteiros de obra, em relação à manipulação do AGR e sua adequada utilização no preparo de concretos.

Frente à possibilidade de o AGR ser utilizado como alternativa de substituição do AGN, como já é fato em muitos países, sobretudo quando o foco local é direcionado às obras públicas e populares - não públicas, justificam-se as preocupações quanto à adequação de procedimentos de dosagem, para a produção de concretos que cumpram os requisitos de desempenho em seus propósitos de utilização.

O AGR foi produzido na granulometria correspondente à “brita n.º 1”, porque obras populares são comumente executadas com a presença de elementos estruturais delgados de concreto armado, ou seja, de pouca espessura. Conseqüentemente, os espaços entre armaduras de aço são muito pequenos e insuficientes para permitirem a passagem de agregados com dimensão máxima característica acima de 19 mm.

Por outro lado, quanto mais graúdo for o agregado, mais econômico fica o metro cúbico de concreto produzido. Com base nas duas condições citadas, uma de ordem técnica e a outra econômica, optou-se por apenas um tipo de composição granulométrica para os

agregados graúdos: dimensão máxima característica de 19 mm, correspondente à pedra ou brita “n.º 1”.

Após o transporte do material reciclado (AGR), para o Laboratório de Materiais da UFG, este permaneceu espalhado e envolvido com lona plástica, a céu aberto, sobre piso pavimentado e limpo, em frente às dependências do laboratório, durante um período não chuvoso de aproximadamente 40 dias. Após este período, já com aspecto de material totalmente seco, foi coletada uma amostra reduzida de quantidade suficiente para a realização dos experimentos. Posteriormente, esta amostra foi acondicionada em um reservatório plástico, com tampa, no interior das dependências do laboratório, onde permaneceu durante a etapa dos ensaios laboratoriais.

Quanto aos agregados naturais, AMN e AGN, foram adquiridos no comércio de materiais de construção da cidade de Goiânia-GO. Receberam acondicionamentos semelhantes ao do AGR, quando depositados na parte externa do laboratório. Porém, foram levados para o interior do laboratório, após secagem ao ar livre, na medida em que eram demandados no transcorrer dos ensaios realizados.

Antes do início da etapa de dosagem dos concretos, foram executados os devidos ensaios de caracterização dos agregados. Concomitante com estes ensaios, todos os equipamentos e ferramental foram checados, quanti-qualitativamente, para início da etapa de dosagem dos concretos.

Para a mistura dos traços de concreto foi utilizada uma betoneira comum de 320 litros. O tempo total para mistura de cada traço, após iniciadas as rotações da betoneira, foi de aproximadamente 7 (sete) minutos para os concretos com AGR e de 6 (seis) minutos para os concretos de referência, contados a partir da entrada primeiro tipo de material na betoneira, até o momento da remoção do concreto, de dentro da betoneira, para medidas de consistência (abatimento pelo *slump test*).

O tempo total, de cada mistura de concreto com AGR, teve maior duração (sete minutos) pelo fato de ter sido inicialmente colocado na betoneira o AGR e parte da água total, em quantidade acima daquela que seria absorvida pelo material reciclado. Após contato de todas as partículas do AGR com esta quantidade de água, fez-se uma parada de rotações do tambor da betoneira por 60 segundos, para que a porção equivalente ao material reciclado pudesse concluir a absorção de toda a quantidade de água adicional (compensada). Assim, manteve-se a relação água/cimento (*a/c*) efetivamente pré-estabelecida para a mistura, sem levar em consideração a quantidade de água absorvida. Reitera-se, portanto, que exclusivamente para os concretos dosados com a presença de material reciclado, além da água

necessária para a mistura, foi acrescentada uma quantidade extra para compensar a absorção relativa à massa do AGR utilizado nestes determinados traços. Esta absorção influenciaria negativamente a trabalhabilidade, caso não fosse acrescentada a quantidade extra de água (água compensada). A seqüência de entrada dos materiais na betoneira em rotação (operante), para os traços dos concretos de referência, foi:

- parte da água (70%);
- agregado graúdo natural – AGN (100%);
- cimento (100%);
- agregado miúdo natural – AMN (100%); e
- restante da água (30%).

Enquanto que, para os concretos com agregados graúdos reciclados (AGR), esta seqüência foi:

- AGR (100% da quantidade calculada para o traço, correspondente à taxa de substituição);
- parte da água (80%);
- AGN (100% da quantidade calculada para o traço);
- cimento (100%);
- AMN (100%); e
- restante da água (20%).

5.2.7 Ensaios nos concretos em estado fresco

Os ensaios executados nos concretos em estado fresco foram:

- Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone – NBR NM 67 (ABNT, 1998);
- Determinação da massa específica – Concreto fresco – Método gravimétrico - NBR 9833 (ABNT, 1987); e
- Determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico – NBR NM 47 (ABNT, 2002).

5.2.7.1 Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone

De acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 1998), executou-se o ensaio para determinação da consistência dos concretos pelo método do abatimento do tronco de cone. Foram definidos valores de máximo e mínimo permissíveis para as medidas de abatimento dos concretos produzidos. Dessa forma, as medidas de abatimento que compreendessem dentro do intervalo delimitado por estes valores limites, de máximo e mínimo, seriam consideradas aceitáveis e corresponderiam a concretos “normalmente trabalháveis”¹⁹.

Assim, verificou-se essa característica relacionada à trabalhabilidade dos concretos produzidos, os quais apresentaram medidas de consistência correspondentes a valores que se encaixaram dentro do intervalo preestabelecido. Os valores de máximo e mínimo permissíveis, para as medidas de abatimento do tronco de cone, foram correspondentes a 120 mm e 50 mm, respectivamente. O aspecto geral de um concreto produzido com AGR, o “CAGR50_{5,0}”, logo após a retirada do cone de Abrams no final do ensaio de abatimento, pode ser observado na Figura 5.14.



Figura 5.14 – Medida da consistência e aspecto geral do concreto com AGR.

¹⁹ Expressão utilizada por SANTOS (2006) para designar concretos de boa trabalhabilidade ou de trabalhabilidade aceitável, os quais, nesta condição, atendem aos seus propósitos de utilização corrente na construção civil.

Além da verificação da trabalhabilidade pelo método do abatimento, fez-se mais uma checagem visual em relação ao teor de argamassa, aproveitando-se do concreto ainda com a forma de tronco de cone, como mostrado na Figura 5.14. Para isso, observou-se o aspecto da superfície lateral deste concreto. Caso a superfície se apresentasse com características de boa compactação e sem a presença de vazios, considerar-se-ia que o concreto apresentava adequado de argamassa. Reitera-se que, num momento anterior, esta mesma condição já teria sido verificada, porém quando o concreto ainda estava dentro da betoneira, conforme visualizado na Figura 5.13. Procedeu-se, ainda, outra observação relevante quanto a possível formação de camada de água ao redor da base do tronco de cone do concreto, o que seria indicativo de tendência de exsudação de água na mistura por falta de finos. (HELENE; TERZIAN, 1992, p. 246).

5.2.7.2 Determinação da massa específica dos concretos em estado fresco

As massas específicas dos concretos em estado fresco foram determinadas de modo semelhante ao método gravimétrico, especificado na NBR 9833 (ABNT, 1987). Neste ensaio, utilizou-se um cilindro metálico como recipiente de medida, com volume precisamente conhecido de 8,0 dm³ (oito decímetros cúbicos). Este recipiente, parte integrante do sistema de medição pressométrica de ar incorporado, foi preenchido com concreto fresco logo após os testes relativos à trabalhabilidade. O preenchimento deste recipiente se deu em três camadas de igual volume, devidamente compactadas com 25 golpes aplicados em cada uma das camadas, utilizando-se uma haste padronizada pela referida Norma (Figura 5.15). Após o preenchimento total do recipiente, com a colocação e adensamento da terceira e última camada de concreto, fez-se o seu devido nivelamento (arrasamento) superficial com régua metálica (Figura 5.16). Por fim, fez-se a limpeza nas superfícies externas do recipiente (Figura 5.17), o qual foi levado à balança para aferição de massa do concreto fresco (Figura 5.18). A relação ou quociente entre o valor da massa de concreto fresco e o volume do recipiente, determinou a medida da massa específica do concreto, em kg/dm³ (quilo por decímetro cúbico). Em seqüência, aproveitou-se o recipiente devidamente preenchido com concreto para a determinação do teor de ar incorporado pelo método pressométrico, conforme registra a Figura 5.19. O medidor de ar utilizado foi do “tipo B”, o qual tem princípio operacional baseado na “lei de Boyle”, segundo a NBR NM 47 (ABNT, 2002).



Figura 5.15 – Adensamento do concreto para ensaio de massa específica.



Figura 5.16 – Acabamento superficial do concreto fresco para ensaio de massa específica.



Figura 5.17 – Limpeza do recipiente para aferição de massa específica do concreto fresco.



Figura 5.18 – Medida da massa específica do concreto fresco.



Figura 5.19 – Determinação do teor de ar incorporado pelo método pressométrico.

5.2.7.3 Moldagem e cura dos corpos-de-prova

Para a moldagem dos corpos-de-prova (CPs) de concreto foram utilizadas formas metálicas com dimensões internas de 200 mm de altura por 100 mm de diâmetro. O adensamento do concreto no interior das formas foi manual, de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2003d). A Figura 5.20 mostra o final de uma das etapas de moldagem dos CPs, enquanto a Figura 5.21 permite visualizar as condições de acondicionamento destes exemplares em câmara úmida, logo após as desformas ou desmoldagens, de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2003d).



Figura 5.20 – Moldagem dos corpos-de-prova.



Figura 5.21 – Acondicionamento dos corpos-de-prova em câmara úmida.

Os corpos de prova (CPs) permaneceram em processo de cura úmida, até o momento da execução dos ensaios para avaliação de algumas propriedades físicas e mecânicas, em idades que variaram de 3 a 56 dias. Todos os procedimentos de moldagem e cura dos CPs foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção da UFG, assim como todas as etapas de dosagem dos concretos.

Foram moldados 315 corpos-de-prova, em 15 traços de concreto. Assim, para cada traço de concreto fez-se a moldagem de 21 CPs.

5.2.8 Ensaio em concretos no estado endurecido

Para esta condição dos concretos, foram executados os seguintes ensaios:

- Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos
– NBR 5739 (ABNT, 1994a);
- Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos – NBR 7222 (ABNT, 1994b);
- Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação
– NBR 8522 (ABNT, 2003e); e
- Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica – NBR 9778 (ABNT, 2005b).

Na realização dos ensaios de avaliação das propriedades mecânicas dos concretos, padronizou-se procedimentos com intuito de minimizar a variabilidade dos resultados, em função das interferências externas, tais como a utilização de enxofre sem reaproveitamento para capeamentos das bases dos CPs, paralelismo entre as superfícies capeadas com enxofre (bases opostas do CP), perpendicularidade entre as superfícies capeadas com enxofre e as geratrizes dos CPs, planeza e lisura das superfícies dos capeamentos, constância nas velocidades de cargas aplicadas pela prensa, posicionamentos centralizados dos eixos axiais de gravidade dos CPs com o centro geométrico do disco ou prato de base da prensa e execução dos ensaios pela mesma pessoa etc..

5.2.8.1 Resistência à compressão uniaxial

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão uniaxial dos concretos, representados pelos seus correspondentes corpos-de-prova cilíndricos, com dimensões de 100 milímetros de diâmetro e 200 milímetros de altura, foram obtidos a partir dos procedimentos especificados na NBR 5739 (ABNT, 1994a). A Figura 5.22 mostra as condições padronizadas dos capeamentos realizados para os ensaios de resistência, bem como para outros que requereram este procedimento. Os capeamentos de enxofre foram executados de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2003d), Item 9.4.2. A Figura 5.23 ilustra o ensaio de resistência à compressão.



Figura 5.22 – Aspecto geral dos capeamentos de enxofre.



Figura 5.23 – Ensaio de resistência à compressão uniaxial.

5.2.8.2 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral estabelece que o contato do corpo-de-prova com os pratos da máquina de compressão (prensa) deve ser somente ao longo de duas geratrizes do CP, diretamente opostas. Para isso, ao longo destas geratrizes, que fizeram contato com os pratos ou discos da prensa, fixou-se talas (tiras) de madeira resistente, de comprimento igual à altura do CP (200 mm), largura de 15 mm e espessura com 3 mm, de acordo com as especificações apresentadas pela NBR 7222 (ABNT, 1994b). A Figura 5.24 mostra o posicionamento destas tiras de madeira em CPs preparados

para o ensaio. A posição do CP na máquina de compressão, durante a aplicação de carga, pode ser visualizado na Figura 5.25.



Figura 5.24 – Posicionamento das tiras de madeira nos corpos-de-prova.



Figura 5.25 – Execução do ensaio de tração por compressão diametral.

5.2.8.3 Módulo de deformação ou de elasticidade – tangente inicial

Os ensaios para determinação do módulo de deformação ou de elasticidade tangente à origem ou inicial foram executados a partir de valores médios de resistência à compressão. Para o ensaio de resistência, pertinente ao ensaio do módulo de deformação, utilizou-se um par de CPs. De posse da carga média de ruptura destes, utilizou-se mais três CPs que se submeteram às cargas de compressão que variaram de 0,5 MPa (meio Mega Pascal) até 30% do valor da carga média de ruptura, fornecida pelo ensaio auxiliar anterior de resistência. No regime elástico, as deformações sofridas pelos CPs, correspondentes aos níveis de cargas aplicadas, permitiram os cálculos do módulo de deformação ou de elasticidade do concreto, de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2003e). A Figura 5.26 mostra a

colocação das pastilhas de suporte às agulhas leitoras dos extensômetros analógicos utilizados, nas geratrizes do CP e em posições simétricas. Enquanto as Figuras 5.27 e 5.28 permitem visualizar a colocação dos extensômetros no CP e o momento da aplicação de cargas durante o ensaio, respectivamente.

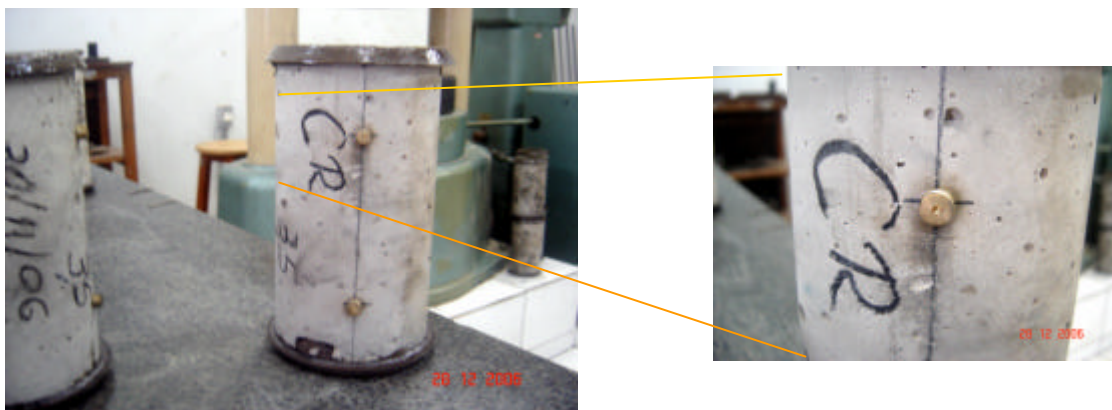


Figura 5.26 – Fixação das pastilhas de suporte para as agulhas leitoras do extensômetro.



Figura 5.27 – Fixação do extensômetro no corpo-de-prova.

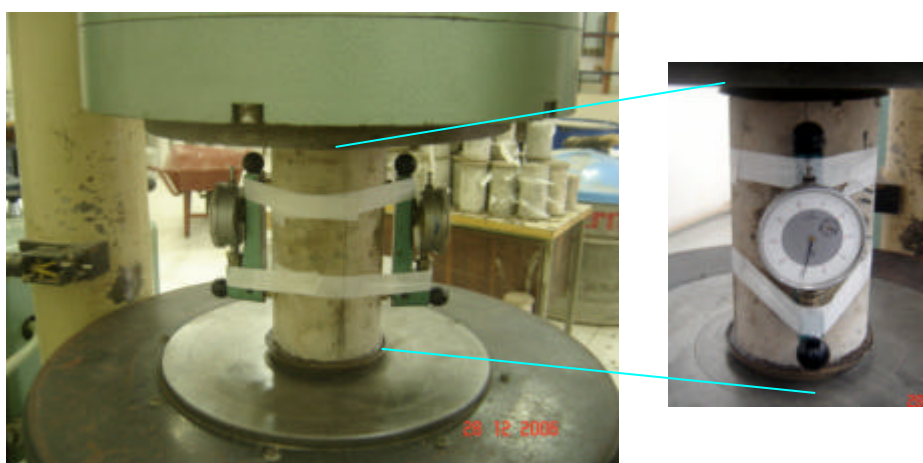


Figura 5.28 – Ensaio de determinação do módulo de deformação tangente inicial.

5.2.8.4 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

Os procedimentos pertinentes ao ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica consistiram em etapas de aferições de massas dos CPs após período em estufa, durante e após períodos de imersão em água com temperatura entre 19 °C e 25 °C e, finalmente, após período que somou o tempo de imersão em água fervente e em água à temperatura ambiente. Como resultados do ensaio, obteve-se a massa específica da amostra seca, massa específica da amostra saturada, massa específica real e índice de vazios. Os procedimentos para a realização destes ensaios seguiram as prescrições da NBR 9778 (ABNT, 2005b).

A Figura 5.29 registra o instante da colocação de um lote de CPs em estufa, Os quais permaneceram no seu interior com temperaturas variando de 100 °C a 110 °C, por 72 horas. As Figuras 5.30 e 5.31 retratam um momento de medida hidrostática de massa de um CP e um momento de imersão em água fervente, respectivamente.



Figura 5.29 – Secagem dos corpos-de-prova em estufa para ensaio de absorção.



Figura 5.30 – Medida hidrostática de massa do CP e verificação da temperatura da água.



Figura 5.31 – Imersão de corpos-de-prova em água fervente.

5.2.9 Modelagem matemático-estatística e diagrama de dosagem para concretos

De posse dos resultados dos ensaios referentes às propriedades mecânicas dos concretos, juntamente com os demais valores paramétricos, advindos dos cálculos das dosagens, foram realizadas regressões matemático-estatísticas para determinação da melhor curva representativa ou tendencial da correlação ou relação funcional entre as variáveis dependentes e independentes correlacionadas às propriedades mecânicas dos concretos estudados. Para cada uma das cinco famílias de concreto (CR, CAGR25, CAGR50, CAGR75 e CAGR100) foram elaborados os diagramas de dosagem pertinentes às propriedades mecânicas avaliadas, bem como as correspondentes equações de dosagem. Os diagramas e equações de dosagem dos concretos são apresentados nos Itens 6.5.1, 6.5.2 e 6.5.3 do Capítulo 6.

As curvas geradas nos quadrantes do diagrama de dosagem possibilitaram obter, graficamente, os parâmetros de dosagem necessários às características ou propriedades mecânicas desejadas no concreto a ser produzido. Bastando, para tanto, partir do conhecimento ou da necessidade de apenas um destes parâmetros de dosagem para se encontrar os demais. A Figura 5.32, por exemplo, apresenta um diagrama de dosagem, de forma esquemática, para resistência à compressão (f_{cd}) de um concreto, aos 3, 7, 28 e 56 dias de idade.

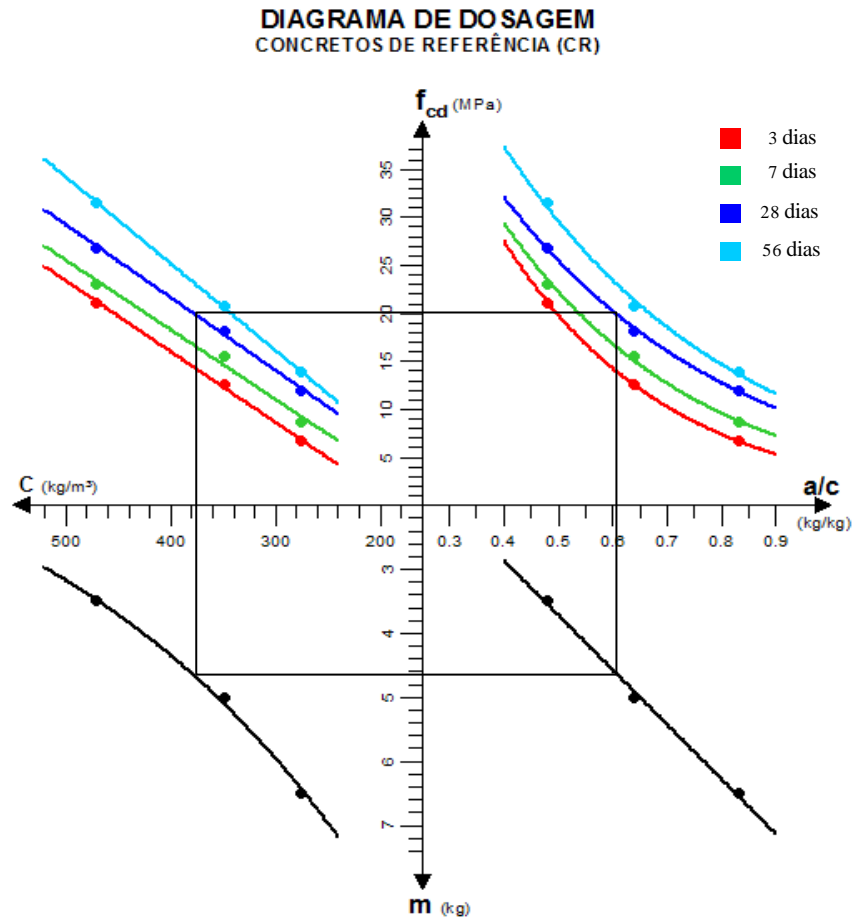


Figura 5.32 – Diagrama de dosagem

Os mesmos parâmetros de dosagem obtidos pelo método gráfico podem ser igualmente encontrados pelo método analítico, com a utilização das equações que se correlacionam ou representam as curvas traçadas nos quadrantes do diagrama de dosagem, para se produzir concretos com determinadas propriedades mecânicas desejadas.

Reitera-se que para a presente pesquisa foram estudados e elaborados os diagramas de dosagem pertinentes às resistências à compressão dos concretos, aos 3, 7, 28 e 56 dias de idade. Os diagramas referentes às resistências à tração por compressão diametral e módulo de deformação tangente inicial dos concretos, correspondem à idade de 28 dias.

6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

6.1.1 Agregado graúdo natural – AGN

6.1.1.1 Composição granulométrica do AGN

A pedra natural britada de micaxisto (AGN) apresentou granulometria correspondente à graduação comercial de brita nº. 1, com dimensão máxima característica de 19 mm e distribuição contínua, praticamente dentro dos limites recomendados pela NBR NM 248 (ABNT, 2003c). O módulo de finura atingiu o valor de 6,91, conforme mostra a Tabela 6.1. Os valores em negrito correspondem às peneiras da série normal.

Tabela 6.1 – Composição granulométrica do agregado graúdo natural (micaxisto).

Abertura das		PORCENTAGENS MÉDIAS RETIDAS								
Peneiras (mm)	ENSAIO			LIMITES DA DISTRIBUIÇÃO						
	Massa	Massa retidas (g)	Porcentagens retidas	Zona granulométrica d/D						
	Massa	Média	Simples	Acum.	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75	
75	0,0	0,0	0,0	0	0	-	-	-	-	0 - 5
63	0,0	0,0	0,0	0	0	-	-	-	-	5 - 30
50	0,0	0,0	0,0	0	0	-	-	-	0 - 5	75 - 100
37,5	0,0	0,0	0,0	0	0	-	-	-	5 - 30	90 - 100
31,5	0,0	0,0	0,0	0	0	-	-	0 - 5	75 - 100	95 - 100
25	0,0	0,0	0,0	0	0	-	0 - 5	5 - 25	87 - 100	-
19	317,0	305,0	311,0	3,11%	3,11%	-	2 - 15	65 - 95	95 - 100	-
12,5	6467,0	6511,0	6489,0	64,89%	68,00%	0 - 5	80 - 100	92 - 100	-	-
9,5	2180,0	2094,0	2137,0	21,37%	89,37%	2 - 15	92 - 100	95 - 100	-	-
6,3	588,0	630,0	609,0	6,09%	95,46%	40 - 65	95 - 100	-	-	-
4,75	361,0	373,0	367,0	3,67%	99,13%	80 - 100	-	-	-	-
2,36	40,0	38,0	39,0	0,39%	99,52%	95 - 100	-	-	-	-
Prato	47,0	49,0	48,0	0,48%	100,00%	-	-	-	-	-
TOTAIS	10000	10000	10000	100%	-	-	-	-	-	-
Módulo de finura										6,91
Dimensão máxima característica (mm)										19
Graduação comercial										Brita 1

O ensaio de determinação da composição granulométrica do agregado graúdo natural (AGN) foi realizado em duas amostras. Cada uma destas amostras foi seca em estufa e peneirada com a utilização de peneiras da série normal e intermediária, como pode ser observado na Tabela 6.1, que são os conjuntos de peneiras com abertura de malhas sucessivas estabelecidas pela Norma.

O AGN atendeu as especificações quanto aos limites normativos. A amostra manteve-se dentro dos limites inferior e superior das frações percentuais que delimitam a zona granulométrica especificada para a brita nº 1, conforme mostra a Figura 6.1.

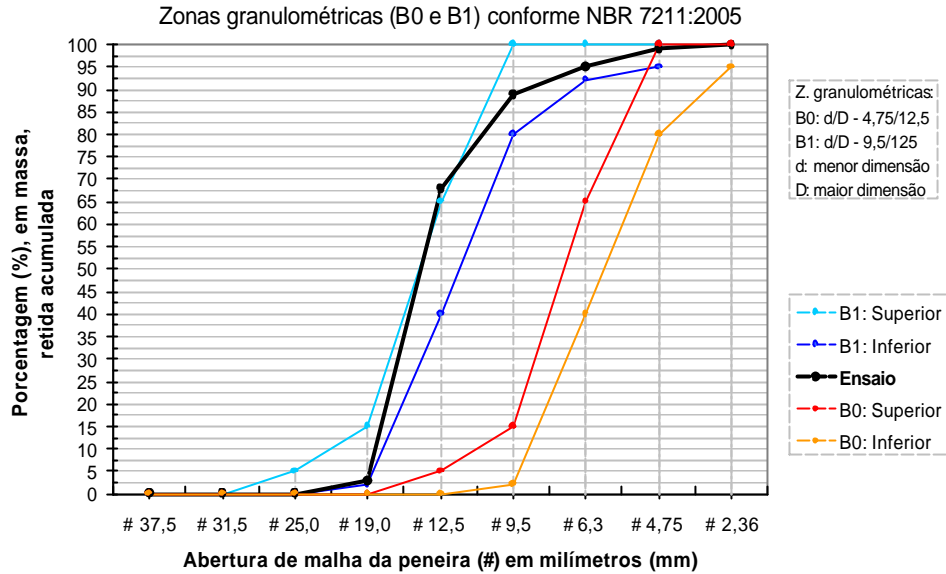


Figura 6.1 – Curva representativa da composição granulométrica do agregado graúdo natural.

6.1.1.2 Massa específica, massa unitária e absorção de água do AGN

Obteve-se o valor de $2,76 \text{ kg/dm}^3$ para a massa específica do agregado graúdo natural, enquanto que o valor verificado para massa unitária foi de $1,44 \text{ kg/dm}^3$. A absorção de água apontou a taxa de $0,87 \%$, após imersão por 24 horas.

6.1.1.3 Abrasão *Los Angeles* do AGN

O resultado do ensaio de abrasão *Los Angeles* apontou taxa de perda de massa equivalente a $31,20\%$ para o AGN. Esta taxa aferida atendeu as recomendações da NBR NM 51 (ABNT, 2001b), que recomenda a utilização de agregados graúdos naturais, para concretos, com taxa de abrasão *Los Angeles* não superior a 50% .

6.1.2 Agregado graúdo reciclado - AGR

6.1.2.1 Composição granulométrica do AGR

A amostra do AGR ensaiada para a determinação da composição granulométrica apresentou boa distribuição quanto à variação do tamanho das partículas. Porém, os percentuais de massa acumulada, retida nas peneiras, corresponderam a limites de distribuição

que variaram entre a zona granulométrica característica da brita n.º 0 (zero), como também da brita n.º 1. Entretanto, os resultados do ensaio indicaram que a dimensão máxima característica das partículas foi de 19 mm (pedra ou brita n.º 1) e que o módulo de finura correspondeu ao valor de 6,3. A Tabela 6.2 e a Figura 6.2 mostram os resultados do ensaio de composição granulométrica do AGR e a correspondente curva granulométrica, respectivamente. Os valores em negrito correspondem às peneiras da série normal.

Tabela 6.2 – Composição granulométrica do agregado graúdo reciclado (AGR).

Abertura das Peneiras (mm)	PORCENTAGENS MÉDIAS RETIDAS									
	ENSAIO					LIMITES DA DISTRIBUIÇÃO				
	Massa	Massa	Porcentagens retidas	Zona granulométrica d/D						
(g)	(g)	Média	Simples	Acum.	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75	
75	0,0	0,0	0,0	0	0	-	-	-	-	0 - 5
63	0,0	0,0	0,0	0	0	-	-	-	-	5 - 30
50	0,0	0,0	0,0	0	0	-	-	-	0 - 5	75 - 100
37,5	0,0	0,0	0,0	0	0	-	-	-	5 - 30	90 - 100
31,5	0,0	0,0	0,0	0	0	-	-	0 - 5	75 - 100	95 - 100
25	0,0	0,0	0,0	0	0	-	0 - 5	5 - 25	87 - 100	-
19	89	87	88,0	0,88%	0,88%	-	2 - 15	65 - 95	95 - 100	-
12,5	2200	2242	2221,0	22,21%	23,09%	0 - 5	80 - 100	92 - 100	-	-
9,5	2318	2254	2286,0	22,86%	45,95%	2 - 15	92 - 100	95 - 100	-	-
6,3	2654	2716	2685,0	26,85%	72,80%	40 - 65	95 - 100	-	-	-
4,75	1567	1537	1552,0	15,52%	88,32%	80 - 100	-	-	-	-
2,36	1012	998	1005,0	10,05%	98,37%	95 - 100	-	-	-	-
Prato	160	166	163,0	1,63%	100,00%	-	-	-	-	-
TOTAIS	10000	10000	10000	100%	-	-	-	-	-	-
Módulo de finura										6,30
Dimensão máxima característica (mm)										19
Gradação comercial										Brita 1

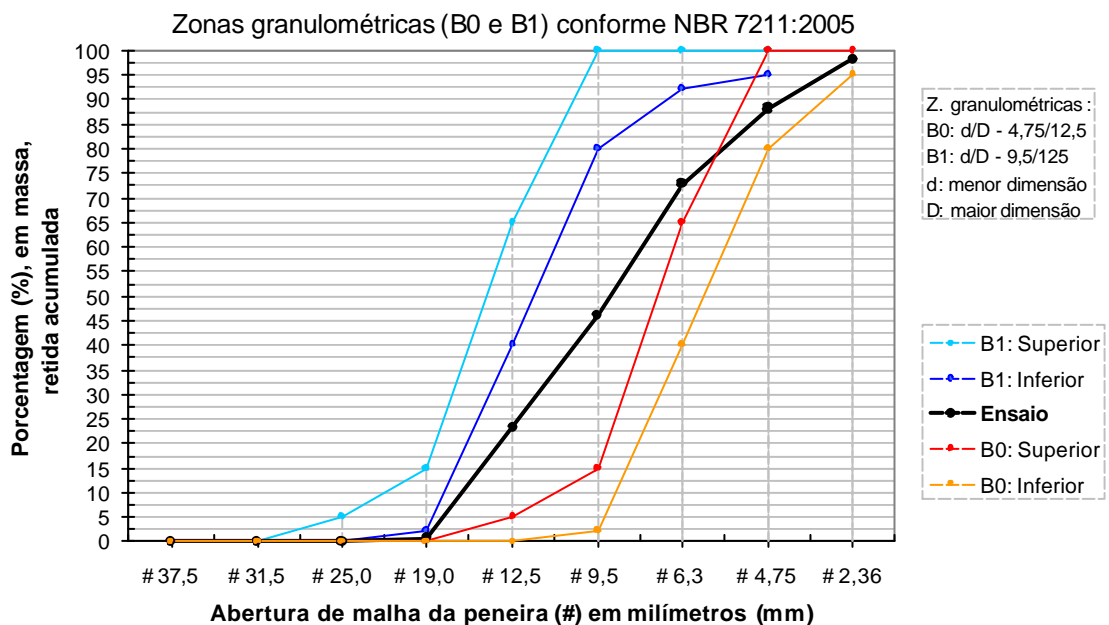


Figura 6.2 – Curva granulométrica do agregado graúdo reciclado (AGR).

6.1.2.2 Massa específica, massa unitária e absorção de água do AGR

O ensaio de determinação da massa específica do AGR seco apresentou valor de $1,86 \text{ g/cm}^3$, enquanto a sua massa específica, na condição saturada com superfície seca (SSS), correspondeu a $2,12 \text{ g/cm}^3$. A massa específica aparente aferiu $2,53 \text{ g/cm}^3$ e a massa unitária em estado solto foi de $1,06 \text{ kg/dm}^3$.

A taxa de absorção de água do AGR, após 24 horas de imersão foi de 13,09 %. A Figura 6.3 mostra o ensaio realizado para determinação da taxa evolutiva da absorção de água do AGR, ou seja, a variação da taxa de absorção do AGR, no decorrer de um período de 24 horas.

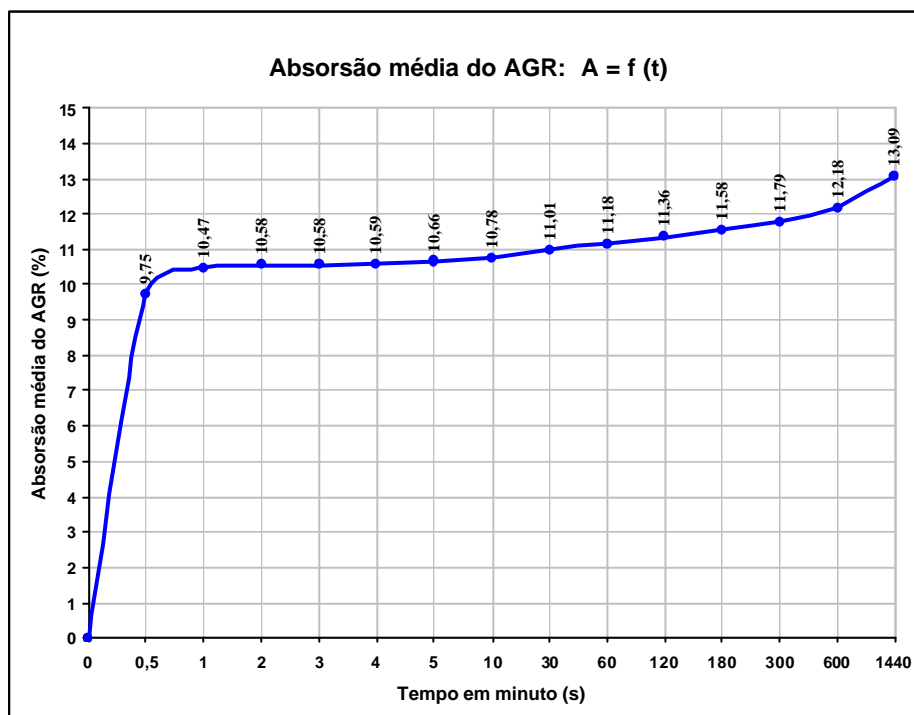


Figura 6.3 – Variação da taxa de absorção do AGR ao longo do tempo.

Os resultados dos ensaios de absorção de água do AGR, quando comparado ao AGN, revelaram alta taxa de absorção após um período de 24 horas de imersão. Entretanto, os ensaios realizados para averiguação do comportamento evolutivo da taxa de absorção ao longo do tempo, apontaram que o AGR absorve água em velocidade muito alta apenas no primeiro minuto, contados a partir do momento em que o material é colocado em condição de imersão em água, o que corroborou os estudos de Santos (2006). Assim, após um minuto em condição imersa, o AGR chegou a absorver, em média, cerca de 80% da taxa total de absorção relativa ao período de 24 horas (14400 minutos), de acordo com a Figura 6.3.

Outro fato muito relevante é que a taxa de absorção do AGR permaneceu praticamente inalterada entre o primeiro e o décimo minuto, após a condição de imersão em água. A partir do décimo minuto em diante, a taxa de absorção evoluiu muito lentamente, até atingir os 100%, ao final de 24 horas. A partir destas observações relativas às condições de evolução da taxa de absorção de água do AGR, decidiu-se que o valor adequado para a taxa de compensação de água (acréscimo de água), em relação à massa da parcela de AGR, nas dosagens dos concretos, seria de 10,5%. Portanto, após os cálculos de dosagem pertinentes aos traços de concretos com material reciclado (AGR), acrescentou-se mais água em quantidade correspondente a 10,5% da massa de AGR consumido no determinado traço, para compensar a água absorvida por esta fração de AGR, no primeiro minuto. Assim, a quantidade de água necessária para promover relações calculadas entre a água e o cimento (relação a/c) dos concretos foi mantida, sobretudo durante o tempo gasto para o processo de mistura dos materiais na betoneira e seqüente moldagem dos corpos-de-prova.

6.1.2.3 Abrasão *Los Angeles* do AGR

O valor da taxa de perda de massa da amostra ensaiada do AGR, referente ao ensaio de abrasão Los Angeles, foi de 52,27%. Essa taxa apresenta-se pouco superior ao recomendado pela Norma pertinente e relativa aos agregados graúdos naturais para concreto (50%). Porém, tratando-se de agregados graúdos reciclados, não se tem especificações em normas brasileiras, até o presente momento, quanto ao limite máximo recomendável para a taxa de abrasão dos AGR.

6.1.2.4 Composição do AGR por análise visual

O ensaio de determinação da composição dos AGR por análise visual, recomendado pela NBR 15116 (ABNT, 2004), não especifica que sejam separadas as partículas de concreto das partículas de argamassa. Porém, quando observadas com a ajuda de lentes de aumento eficientes (lupas), poderiam ser normalmente identificadas e separadas, individualmente. A separação individual das duas fases (concreto e argamassa) permitiria melhor analisar a origem do RCD e, conseqüentemente, avaliar previamente algumas características do AGR, as quais teriam possível influência nas propriedades do concreto.

A composição do AGR por análise visual, conforme classificação apresentada no capítulo anterior, Item 5.2.2.5, apontou predominância de partículas pertencentes ao Grupo 1 (fragmentos que apresentaram pasta de cimento endurecida em mais de 50% do volume) que totalizou 53,7% da massa ensaiada. O teor de materiais contaminantes (Grupo 4) apresentou-se abaixo do limite máximo (2%) especificado na NBR 15116 (ANBT, 2004), conforme mostra a Figura 6.4.

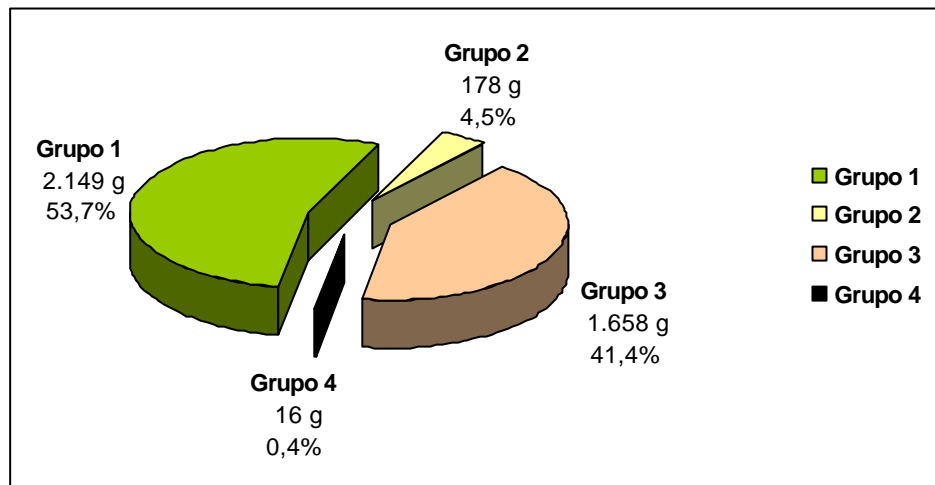


Figura 6.4 – Composição do AGR de RCD.

A presença também significativa de partículas relativas ao Grupo 3 (fragmentos de cerâmicas), que corresponderam a 41,4%, em relação ao total, em massa, da amostra de AGR ensaiada, indicou que este material cerâmico fez 77,1% em relação à quantidade de partículas pertencentes ao Grupo 1 (fragmentos que apresentaram pasta de cimento endurecida). Essas quantidades expressivas de partículas que se fizeram presentes na composição do AGR, relativas ao “Grupo 1” e “Grupo 3”, juntamente com as demais quantidades de partículas correspondentes ao “Grupos 2” e “Grupo 4”, indicaram as condições quanti-qualitativas do AGR produzido a partir de RCD proveniente de obra predial, que se utilizou do sistema construtivo convencional. Por sua vez, este sistema construtivo convencional, de edifícios de múltiplos pavimentos verticalizados, normalmente apresenta concomitância entre as etapas de execução das alvenarias (com tijolos cerâmicos) e estruturas de concreto armado. Desta forma, quantidades significativas já eram esperadas, tanto para os fragmentos de pasta de cimento (Grupo 1) quanto para os fragmentos de material cerâmico (Grupo 3), pertinentes ao AGR obtido destes RCD de “Classe A”. As partículas pertencentes

ao “Grupo 1” tiveram origem dos resíduos remanescentes da tubulação de bombeamento em finais de concretagem, sobras de concretos produzidos na própria obra, desperdícios de argamassa de assentamento de tijolos e de argamassa de revestimentos internos.

Santos (2006) estudou concretos produzidos com AGR de RCD originários de construção predial, com características construtivas semelhantes a obra que foi escolhida para ser cedente dos RCD ao presente estudo. Ambas as pesquisas tiveram a mesma empresa construtora como fornecedora dos RCD e o mesmo processo de beneficiamento para estes, desde a coleta seletiva do material, na obra, até o sistema de britagem. Porém, os RCD obtidos por Santos (2006) provinham de uma obra que se encontrava em fase construtiva de finalização das alvenarias e, eminentemente, com serviços de execução dos revestimentos argamassados internos e externos. Portanto, já concluída a fase de execução das estruturas de concreto armado.

Para facilitar uma análise comparativa entre os resultados aferidos por Santos (2006) e os dados obtidos no presente estudo, quanto à influência da (s) etapa (s) construtiva (s) sobre as características quântico-qualitativas (composições) dos AGR obtidos, a partir do padrão de obra mencionado no parágrafo anterior, a Figura 6.5 reproduz os resultados da composição do AGR estudado pelo pesquisador Santos (2006).

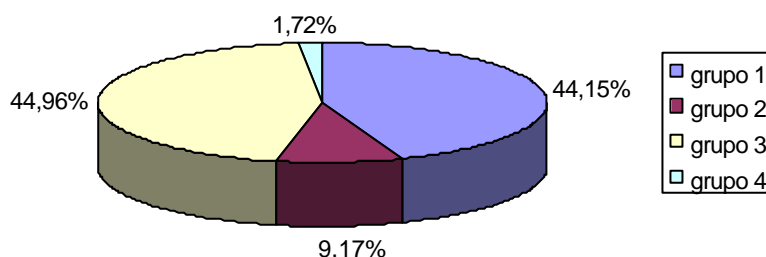


Figura 6.5 – Porcentagens de constituintes no entulho reciclado [AGR] (SANTOS, 2006).

Comparando-se as Figuras 6.4 e 6.5 verificou-se o aumento percentual do material constituinte do Grupo 1 (fragmentos de pasta de cimento) em relação aos estudos de Santos (2006), enquanto que os materiais constituintes dos Grupos 2, 3 e 4 apresentaram valores percentuais menores.

As expectativas foram correspondidas em relação à taxa percentual de materiais (partículas) pertinentes ao Grupo 1 – “53,7%”, quando comparada à correspondente taxa aferida por Santos (2006) – “44,15%”. A explicação disso reside no fato de que a obra cedente do RCD, para a pesquisa de Santos (2006), não mais se encontrava em fase de

execução da estrutura de concreto armado, ou seja, não promoveu sobras ou desperdícios significativos de concreto que pudessem ser descartados como entulho (RCD).

A taxa referente às partículas ou fragmentos correspondentes ao Grupo 2 que perpez total de 4,5%, equivaleu praticamente à metade do resultado encontrado por Santos (2006), 9,17%, referente aos materiais (fragmentos) constituintes do AGR, classificados como rocha. A explicação para este fato pode advir, mais uma vez, das diferentes fases construtivas em que se encontravam as edificações fornecedoras dos RCD. A obra que se encontrava em etapa eminente dos serviços de execução de alvenarias e revestimentos argamassados, que no caso correspondeu à obra cedente dos RCD estudados por Santos (2006), utilizou-se de areia lavada de rio, previamente peneirada na obra, para a produção de argamassas de assentamento de tijolos e de revestimentos. As partículas com dimensões acima de 4,75 mm, separadas no processo de peneiramento na obra, quando não reaproveitadas, foram descartadas e se juntaram ao entulho (RCD). Este material, por sua vez, depois de passar pelo sistema de britagem que o transformou em AGR, manteve em sua composição parte das referidas partículas originadas da areia (pedregulhos), sendo, durante o ensaio de determinação da composição do AGR, provavelmente, encontradas e facilmente separadas como rocha (pedregulho). Possivelmente, também, as sobras ou perdas de argamassas presentes nos RCD, durante o processo de britagem, permitiram que as partículas maiores da areia se desprendessem da pasta de cimento endurecida, tornando-as soltas (pedregulhos). Desta forma, estes pedregulhos soltos provavelmente foram encontrados e separados como rocha, durante o ensaio de determinação da composição do AGR.

A quantidade significativa de materiais cerâmicos presentes no AGR, 41,4%, equiparou-se ao equivalente valor percentual encontrado por Santos (2006), 44,96%, relativo aos materiais pertencentes ao Grupo 3. Em ambos os casos a execução dos serviços pertinentes às alvenarias de tijolos cerâmicos vazados eram intensos, o que, conseqüentemente, gerou valores expressivos quanto a taxa percentual de incidência deste tipo de material na composição dos AGR. A cerâmica vermelha, proveniente dos tijolos, foi o material predominantemente encontrado como parte integrante desta fração constituinte do AGR.

Quanto aos materiais pertencentes ao Grupo 4, considerados contaminantes, registrou-se a taxa de 0,4%, que é um valor percentual expressivamente abaixo do recomendado pela Norma pertinente (até 2%). O baixo teor de materiais contaminantes, verificados no AGR, decorreu dos efeitos das orientações e recomendações feitas diretamente ao engenheiro responsável pela obra e aos seus encarregados, para que o processo seletivo de

coleta dos RCD fosse rigorosamente de acordo com as Normas pertinentes e, sobretudo, que os demais funcionários da obra fossem orientados e conscientizados sobre os procedimentos necessários e adequados à coleta seletiva do RCD de Classe A.

6.1.3 Agregado miúdo natural – AMN

6.1.3.1 Composição granulométrica do AMN

A Tabela 6.3 apresenta a distribuição granulométrica do AMN e a Figura 6.4 representa a curva granulométrica deste material.

Tabela 6.3 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo AMN (areia lavada de rio).

Abertura das Peneiras (mm)	PORCENTAGENS MÉDIAS RETIDAS								
	ENSAIO					LIMITES DA DISTRIBUIÇÃO			
	Massas retidas		% retidas			Lim. Inferiores		Lim. Superiores	
	Massa (g)	Massa (g)	Média (g)	Simplex	Acumuladas	utilizável	ótima	ótima	utilizável
9,5	0	0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0
6,3	10,9	11,1	11,0	1,1	1,1	0	0	0	7
4,8	14,0	14,4	14,2	1,4	2,5	0	0	5	10
2,4	65,9	70,9	68,4	6,8	9,4	0	10	20	25
1,2	190,1	194,7	192,4	19,2	28,6	5	20	30	50
0,6	277,1	280,5	278,8	27,9	56,5	15	35	55	70
0,3	280,0	275,6	277,8	27,8	84,3	50	65	85	95
0,15	137,9	128,1	133,0	13,3	97,6	85	90	95	100
Prato	24,1	24,7	24,4	2,4	100	-	-	-	-
TOTAIS	1000,0	1000,0	1000,0	100	-	-	-	-	-
Dimensão máxima característica (mm)									4,8
Módulo de finura									2,65

O agregado miúdo natural (areia quartzosa lavada de rio) mostrou-se com distribuição granulométrica praticamente dentro dos limites ótimos especificados pela NBR NM 248 (ABNT, 2003c), conforme pode ser visualizado na Figura 6.6. A dimensão máxima característica, que é a abertura de malha, em milímetros, da peneira na qual ficou retida (acumulada) a porcentagem de agregados, em massa, igual ou imediatamente inferior a 5%, equivaleu a 4,8 mm. O módulo de finura calculado pela soma das porcentagens retidas acumuladas, em massa, nas peneiras da série normal, dividida por 100, resultou num valor de 2,65. Assim, o agregado miúdo natural (AMN) atendeu de forma satisfatória e adequada ao seu propósito de utilização: produção de concretos.

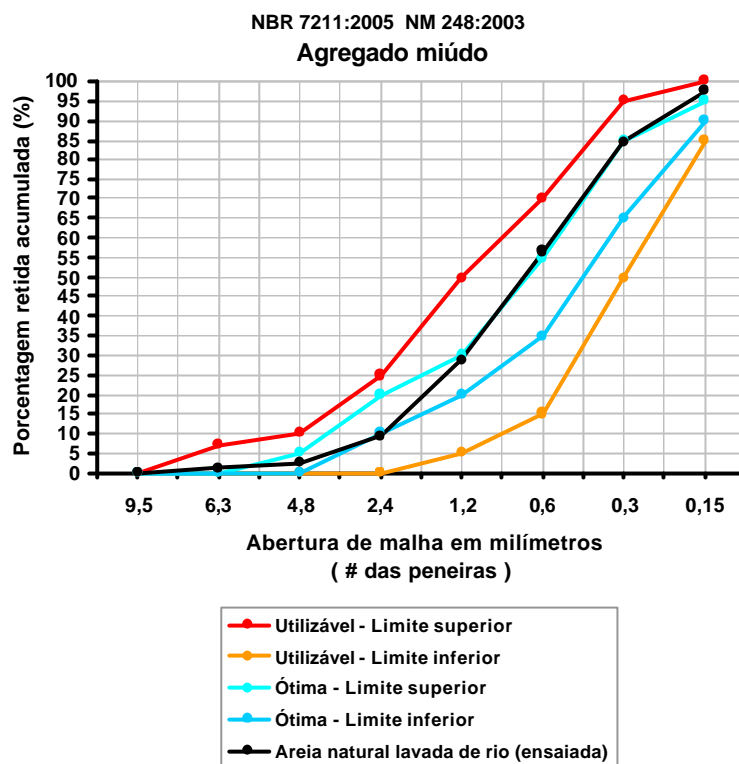


Figura 6.6 – Curva representativa da distribuição granulométrica do AMN.

6.1.3.2 Massa específica e massa unitária do AMN

O agregado miúdo natural (areia) apresentou o valor de $2,62 \text{ kg/dm}^3$ como resultado de massa específica e massa unitária de $1,51 \text{ g/cm}^3$. Ressalta-se que os valores de massa específica e massa unitária são utilizados fundamentalmente como parâmetros de cálculos de dosagem, bem como na conversão de traços especificados em massa para traços em volume, os quais são utilizados em obras.

6.2 PARÂMETROS DE DOSAGEM E TRAÇOS DOS CONCRETOS

Rememorando, de modo resumido o que fora exposto nos Itens 5.2.3, 5.2.4 e 5.2.5 do capítulo anterior, após o ajuste dos parâmetros de dosagem e a partir dos traços pilotos, obtiveram-se as aferições da relação entre a água e o cimento (a/c) para cada uma dos grupos de concreto, os quais foram denominados de concretos pobres, intermediários ou normais e ricos, em função da relação cimento/agregados (1 : m). Deste modo, as Tabelas 6.4, 6.5 e 6.6

mostram os parâmetros de dosagem dos concretos produzidos e agrupados da forma citada, bem como as condições climáticas da sala de dosagem durante a produção dos concretos.

Tabela 6.4 – Parâmetros de dosagem dos concretos “pobres” – Traço 1 : 6,5.

CONCRETOS POBRES Traço em massa	Ident. do concreto	CR _{6,5}	CAGR25 _{6,5}	CAGR50 _{6,5}	CAGR75 _{6,5}	CAGR100 _{6,5}
	1 : m	1 : 6,5	1 : 6,5	1 : 6,5	1 : 6,5	1 : 6,5
	1 : a : b _n : b _r	1 : 2,975 : 3,525 : 0	1 : 2,975 : 2,644 : 0,881	1 : 2,975 : 1,763 : 1,763	1 : 2,975 : 0,881 : 2,644	1 : 2,975 : 0 : 3,525
Teor de argamassa (%)		53	53	53	53	53
Cimento (kg)		11,573	11,233	10,788	10,486	10,178
Massa do agregado miúdo (areia) (kg)		34,430	33,418	32,094	31,196	30,279
Massa do agregado graúdo natural = b _n (kg)		40,795	29,697	19,014	9,241	0,000
Massa do agregado graúdo reciclado = b _r (kg)		0,000	9,899	19,014	27,722	35,877
Água (kg)		9,606	9,323	8,954	8,703	8,448
Água compensada (absorção média: 10,5%)		0,000	1,039	1,996	2,911	3,767
Relação água/cimento (a/c) (kg/kg)		0,83	0,83	0,83	0,83	0,83
Consumo de cimento por m ³ de concreto (kg/m ³)		275,552	266,361	256,830	248,109	241,573
Consumo total de água por m ³ de concreto (kg/m ³)		228,710	221,985	213,192	207,222	201,135
Quantidade de corpos-de-prova (CP's) moldados		21	21	21	21	21
Temperatura da sala de dosagem (°C)		27,6	27,5	27,5	28,8	27,6
Umidade relativa do ar - U. R. ar (%)		35	39	39	36	35
Data da dosagem e moldagens dos CP's		22/11/2006	23/11/2006	23/11/2006	23/11/2006	22/11/2006

Tabela 6.5 – Parâmetros de dosagem dos concretos “normais” – Traço 1 : 5,0.

CONCRETOS NORMAIS Traço em massa	Ident. dos concretos	CR _{5,0}	CAGR25 _{5,0}	CAGR50 _{5,0}	CAGR75 _{5,0}	CAGR100 _{5,0}
	1 : m	1 : 5,0	1 : 5,0	1 : 5,0	1 : 5,0	1 : 5,0
	1 : a : b _n : b _r	1 : 2,180 : 2,820 : 0	1 : 2,180 : 2,115 : 0,705	1 : 2,180 : 1,410 : 1,410	1 : 2,180 : 0,705 : 2,115	1 : 2,180 : 0 : 2,820
Teor de argamassa (%)		53	53	53	53	53
Cimento (kg)		14,671	14,191	13,709	13,183	12,832
Massa do agregado miúdo (areia) (kg)		31,983	30,936	29,885	28,739	27,973
Massa do agregado graúdo natural = b _n (kg)		41,372	30,014	19,329	9,294	0
Massa do agregado graúdo reciclado = b _r (kg)		0	10,005	19,329	27,882	36,186
Água (kg)		9,389	9,082	8,774	8,437	8,212
Água compensada (absorção média: 10,5%)		0	1,051	2,030	2,928	3,799
Relação água/cimento (a/c) (kg/kg)		0,64	0,64	0,64	0,64	0,64
Consumo de cimento por m ³ de concreto (kg/m ³)		349,309	337,882	326,399	314,538	306,157
Consumo total de água por m ³ de concreto (kg/m ³)		223,558	216,245	208,896	200,885	195,53
Quantidade de corpos-de-prova (CP's) moldados		21	21	21	21	21
Temperatura da sala de dosagem (°C)		27,6	27,3	27,4	27,9	27,8
Umidade relativa do ar - U. R. ar (%)		44	44	45	41	43
Data da dosagem e moldagens dos CP's		24/11/2006	29/11/2006	29/11/2006	29/11/2006	24/11/2006

Tabela 6.6 – Parâmetros de dosagem dos concretos “ricos” – Traço 1 : 3,5.

CONCRETOS RICOS Traço em massa	Ident. dos concretos	CR _{3,5}	CAGR25 _{3,5}	CAGR50 _{3,5}	CAGR75 _{3,5}	CAGR100 _{3,5}
	1 : m	1 : 3,5	1 : 3,5	1 : 3,5	1 : 3,5	1 : 3,5
	1 : a : b _n : b _r	1 : 1,385 : 2,115 : 0	1 : 1,385 : 1,586 : 0,529	1 : 1,385 : 1,058 : 1,058	1 : 1,385 : 0,529 : 1,586	1 : 1,385 : 0 : 2,115
Teor de argamassa (%)		53	53	53	53	53
Cimento (kg)		19,792	19,082	18,449	17,886	17,317
Massa do agregado miúdo (areia) (kg)		27,412	26,429	25,552	24,773	23,984
Massa do agregado graúdo natural = b _n (kg)		41,859	30,260	19,510	9,457	0
Massa do agregado graúdo reciclado = b _r (kg)		0	10,090	19,510	28,372	36,625
Água (kg)		9,500	9,159	8,855	8,585	8,312
Água compensada (absorção média: 10,5%)		0	1,059	2,049	2,979	3,846
Relação água/cimento (a/c) (kg/kg)		0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
Consumo de cimento por m ³ de concreto (kg/m ³)		471,231	454,334	439,18	425,865	412,730
Consumo total de água por m ³ de concreto (kg/m ³)		226,191	218,080	210,845	204,415	197,906
Quantidade de corpos-de-prova (CP's) moldados		21	21	21	21	21
Temperatura da sala de dosagem (°C)		25,9	25,6	26,5	27,5	26
Umidade relativa do ar - U. R. (%)		54	50	48	44	48
Data da dosagem e moldagens dos CP's		30/11/2006	1/12/2006	1/12/2006	1/12/2006	30/11/2006

De acordo com o critério adotado, fixando-se valores da relação entre a água e o cimento (a/c) predeterminados a cada um dos três grupos de concretos, reunidos segundo a proporção de dosagem ($1 : m$), foram encontradas as relações “ a/c ” de 0,48, 0,64 e 0,83 para os concretos ricos, normais e pobres, respectivamente, conforme observado nas Tabelas 6.4, 6.5 e 6.6.

Do ponto de vista econômico, os concretos produzidos a partir do traço rico ($1 : 3,5$), aos quais corresponderam a a/c de 0,48 o consumo expressivo de cimento, que variou de 471,23 kg/m^3 para o concreto de referência até 412,30 kg/m^3 para o concreto com 100% de substituição do AGN pelo AGR. Por outro lado, a medida em que se aumentou o teor de substituição, do AGN por AGR, encontraram-se reduções nos consumos de cimento, para os concretos de mesma proporção de dosagem ($1 : m$). A Figura 6.7 permite analisar os consumos de cimento para todos os concretos produzidos, os quais se apresentam graficamente agrupados de acordo com o teor de substituição do AGN pelo AGR.

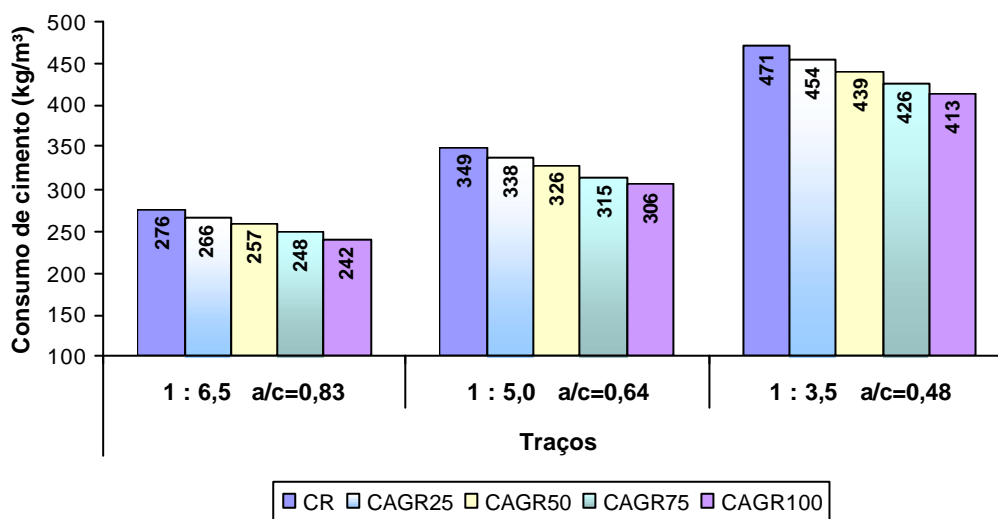


Figura 6.7 – Consumos de cimento dos concretos produzidos.

As médias de consumo de cimento para os concretos dosados com AGR, foram de 253 kg/m^3 (kg de cimento por m^3 de concreto) para os traços pobres, 321 kg/m^3 para os traços intermediários ou normais e para os traços ricos a média de consumo atingiu 433 kg/m^3 . As reduções dos consumos de cimento, verificadas entre os concretos de mesmo traço e na medida em que se aumentou o teor de AGR, decorreram do aumento do teor de ar aprisionado e da redução da massa específica referente à parcela do agregado graúdo presente no traço. Para os cálculos dos consumos de cimento, levou-se em consideração o teor de ar aprisionado

nos concretos em estado fresco, as proporções unitárias de dosagem dos materiais constituintes dos concretos, os valores das massas específicas do cimento e dos agregados e a relação água/cimento (a/c). Para a medição do teor de ar aprisionado utilizou-se o método pressométrico, conforme explicitado no item 5.2.7.2 do capítulo anterior. Os resultados dos ensaios do teor de ar aprisionado nos concretos são apresentados no Item 6.3.3.

6.3 ENSAIOS NOS CONCRETOS EM ESTADO FRESCO

6.3.1 Trabalhabilidade pelo abatimentos do tronco de cone (*slump test*)

Entendeu-se que os concretos de um mesmo grupo (mesmo traço) apresentaram tendências evidentes de perda da trabalhabilidade, na medida em que se aumentou o teor de substituição do AGN pelo AGR. Este entendimento teve como premissa a abordagem sobre trabalhabilidade dos concretos com agregados reciclados apresentada no Capítulo 4, Item 4.2.2, especialmente quando Neville (1997, p. 197) escreveu sobre os fatores que influenciam a trabalhabilidade, o qual afirmou que “o principal fator é o teor de água²⁰ da mistura” e que “fixando o teor de água e outras proporções da mistura, a trabalhabilidade é determinada pelo tamanho máximo do agregado, sua granulometria, forma e textura”. A Figura 6.8 apresenta as medidas de abatimento do tronco de cone obtidas para os concretos produzidos.

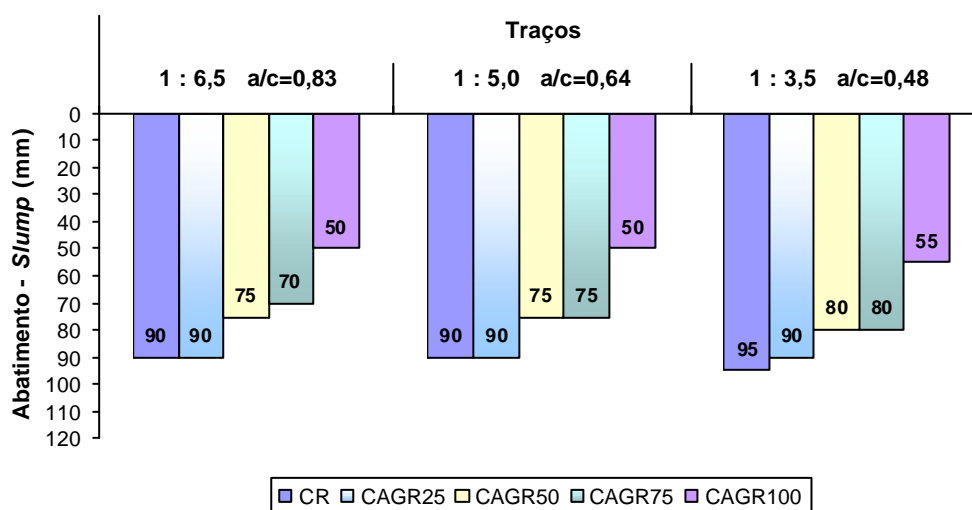


Figura 6.8 – Medidas de abatimento do tronco de cone – *slump test*

²⁰ O teor de água pode ser entendido e expresso como uma taxa (%) definida pelo quociente entre a massa de água e a soma das massas dos materiais sólidos/secos constituintes da mistura do concreto (traço unitário).

Numa análise comparativa entre os concretos de mesma proporção de dosagem, pertencentes ao mesmo grupo (1 : m), os resultados das medidas de abatimento dos concretos corresponderam ao esperado. Obtiveram-se reduções nos valores do abatimento medidos pelo tronco de cone, à medida que se aumentou o teor de substituição do AGN por AGR. Porém, os valores aferidos para os abatimentos se apresentaram dentro dos limites previstos e os correspondentes concretos apresentaram-se em condições “normalmente trabalháveis”.

Também, evidenciou-se que para os concretos de mesmo teor de água nas misturas, mesmo que pertencentes a proporções de dosagem (traços) diferentes, os valores dos abatimentos apresentaram-se iguais ou semelhantes. A título de exemplo, conforme mostra a Figura 6.7, a família de concretos CAGR100 apresentou abatimentos de 50 mm para o “traço pobre” (1 : 6,5), 50 mm para o “traço normal” (1 : 5,0) e 55 mm para o “traço rico” (1 : 3,5), cujos valores se apresentam iguais ou semelhantes quando comparados. Portanto, neste caso o que influenciou a trabalhabilidade, medida pelo abatimento do tronco de cone, foi efetivamente a constância do teor de água presente nas misturas: 11,0%, aproximadamente.

6.3.2 Massa específica

Os concretos apresentaram redução de massa específica na medida em que se aumentou o teor de substituição do AGN pelo AGR, conforme mostram os resultados contidos na Figura 6.9. Para os concretos pobres (1 : 6,5; $a/c=0,83$) o percentual médio de redução da massa específica foi de 3,76%, de um concreto para outro, na medida em que se aumentou o teor de AGR. Analogamente, para os concretos normais (1 ; 5,0; $a/c=0,64$) e ricos (1 : 3,5; $a/c= 0,48$) os percentuais médios de redução da massa específica corresponderam a 3,24% e 3,33%, respectivamente. Numa análise comparativa entre os concretos de referência (CR_{6,5}; CR_{5,0} e CR_{3,5}) e os correspondentes concretos com 100% de AGR (CAGR100_{6,5}; CAGR100_{5,0} e CAGR100_{3,5}) a massa específica apresentou uma taxa de redução média de 13,07%, conforme mostra a Tabela 6.7.

Tabela 6.7 – Valores comparativos entre massas específicas dos CR e CAGR100.

Concretos	Traços		
	1 : 6,5	1 : 5,0	1 : 3,5
	Massa Específica (kg/dm ³)		
CR	2,320	2,333	2,370
CAGR100	1,990	2,045	2,070
Percentual de redução da massa específica (%)	14,22	12,34	12,66
Média total de redução da massa específica (%)	13,07		

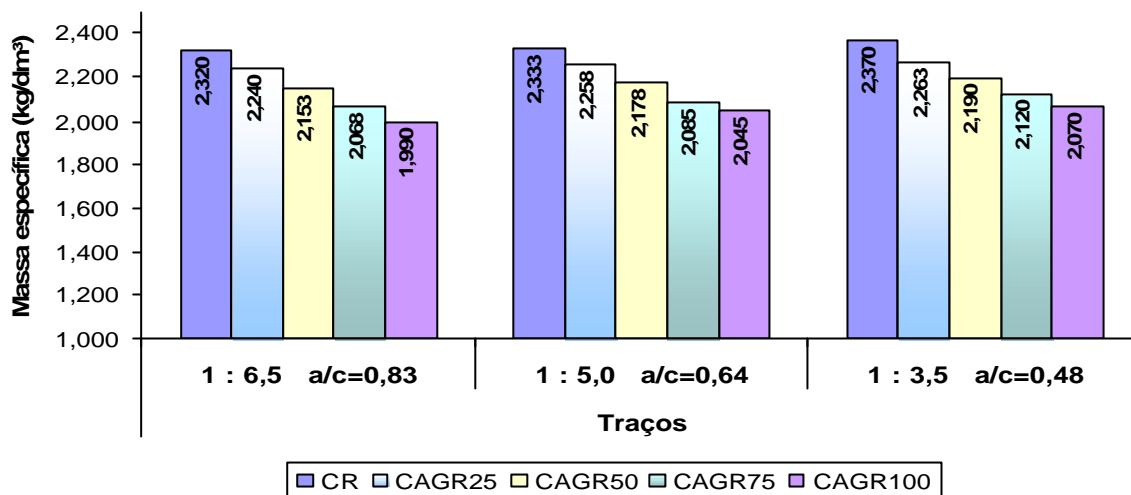


Figura 6.9 – Massa específica dos concretos no estado fresco

Por análise dedutiva, as massas específicas dos AGR aliadas aos teores de ar aprisionado, na medida em que se aumentou a taxa de substituição do AGN para o AGR, influenciaram os decréscimos apresentados nas massas específicas dos concretos em estado fresco.

6.3.3 Teor de ar aprisionado

Os teores de ar aprisionado nos concretos, no estado fresco, apresentaram-se crescentes na medida em que se aumentou a taxa de substituição do AGN por AGR, conforme mostra a Figura 6.10.

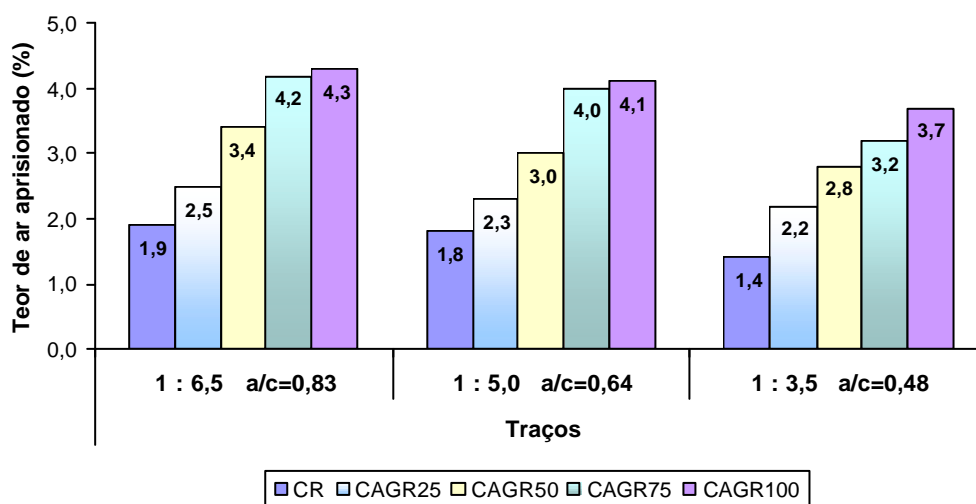


Figura 6.10 – Teor de ar aprisionado nos concretos em estado fresco.

Por outro lado, a partir do gráfico apresentado na Figura 6.10, verificou-se que o teor de ar aprisionado decresceu em função do enriquecimento dos traços, do pobre (1 : 6,5) para o rico (1 : 3,5), quando comparados os concretos de mesma família (nomenclatura).

De acordo com Neville (1995 apud Leite 2001, p. 160) “o concreto ao ser adensado oferece uma resistência a esse processo e esta resistência está intimamente ligada a quantidade de ar aprisionado na mistura de concreto”. [...] “Quanto maior a quantidade de ar aprisionado menor é a resistência ao adensamento”.

Para Leite (2001, p. 160) as afirmações citadas anteriormente, a partir de Neville, podem explicar a maior facilidade que os concretos dosados com agregados reciclados oferecem ao adensamento e, conseqüentemente, apresentam-se com maior facilidade de moldagem porque aprisionam teores de ar mais elevados, quando comparados aos concretos convencionais dosados com agregados naturais. Explica a pesquisadora que os concretos com agregados reciclados aprisionam teores significativos de ar às misturas devido a alta porosidade que as partículas destes agregados apresentam.

Outro aspecto que, possivelmente, pode contribuir efetivamente para que os concretos produzidos com agregados graúdos reciclados (mistos) se apresentem com maior teor de ar incorporado é a forma lamelar alongada de suas partículas, provenientes de materiais cerâmicos. Estas partículas, durante as revoluções da mistura dentro da betoneira, podem figurar como pequenas lâminas ou micro-pás aeradoras.

6.4 ENSAIOS NOS CONCRETOS EM ESTADO ENDURECIDO

6.4.1 Massa específica

De acordo com a pesquisadora Leite (2001, p. 227), “a massa específica dos concretos com agregados reciclados é menor que a massa específica de concretos com agregados naturais”, pelo fato do agregado graúdo reciclado exercer forte influência sobre os resultados de massa específica dos concretos no estado endurecido.

Os resultados de massa específica dos concretos, aos 28 dias de idade, são graficamente apresentados na Figura 6.11. Na proporção em que o teor de substituição do AGN por AGR aumentou, houve redução progressiva dos valores da massa específica nos concretos com AGR, independente da proporção de dosagem. A taxa média de redução da massa específica dos concretos com 100% de teor de substituição, em relação aos concretos de referência, apresentou-se em torno de 7%, conforme pode ser analisado na Figura 6.12.

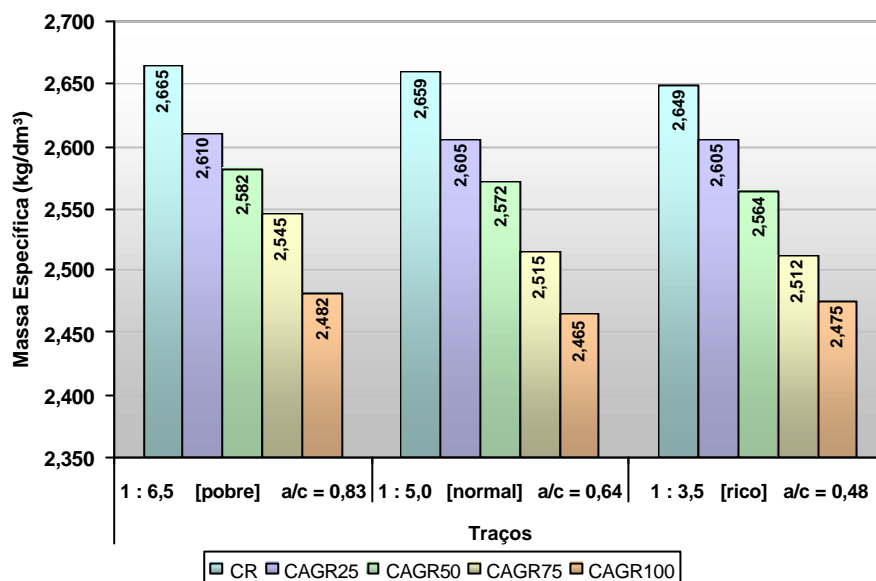


Figura 6.11 – Massas específicas dos concretos em estado endurecido.

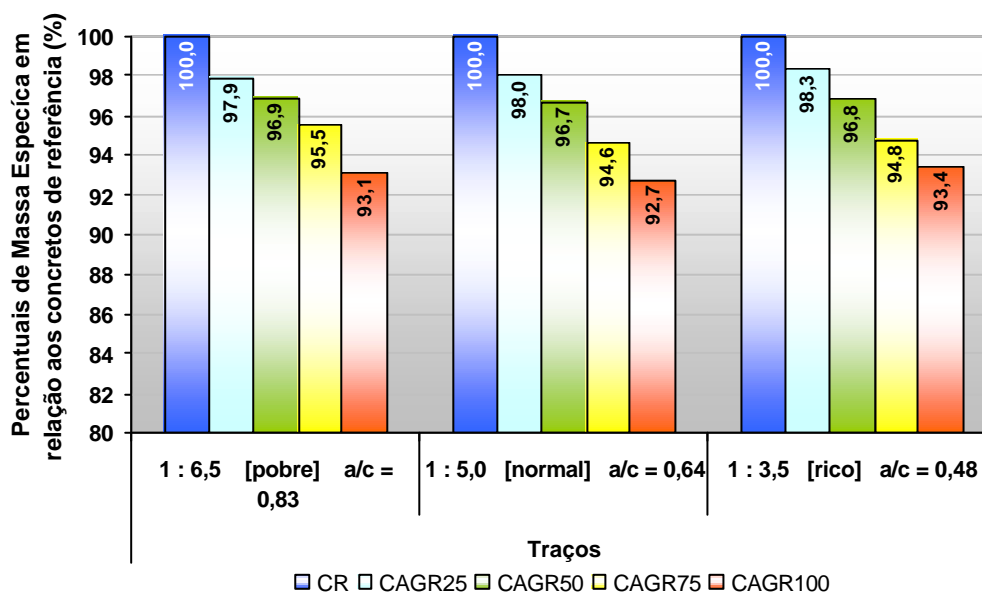


Figura 6.12 – Percentuais de massas específicas em relação aos concretos de referência.

6.4.2 Absorção de água

Do ponto de vista do estudo da tecnologia do concreto, a avaliação da absorção de água é uma condição que permite identificar possíveis problemas no desempenho do concreto, relativo à sua durabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 1994). O monitoramento da absorção de

água do concreto procura determinar justamente o total de poros permeáveis apresentados em sua estrutura (LEVY, 2001, p. 137).

Nos concretos com agregados reciclados, a absorção de água é maior em relação aos concretos de referência. Este fato poderia ser explicado pelas características do AGR, tais como a sua alta absorção, menor densidade. Assim, no concreto, poderia implicar no aumento do diâmetro dos poros capilares maiores e pela “proporção em volume mais importante dos capilares de menor diâmetro” que é característico dos concretos com agregados reciclados (LEVY, 2001, p. 138). Nas Figuras 6.13 e 6.14 são apresentados os valores encontrados para a absorção de água dos concretos, aos 28 dias de idade, e os percentuais comparativos entre os concretos com AGR e os concretos de referência.

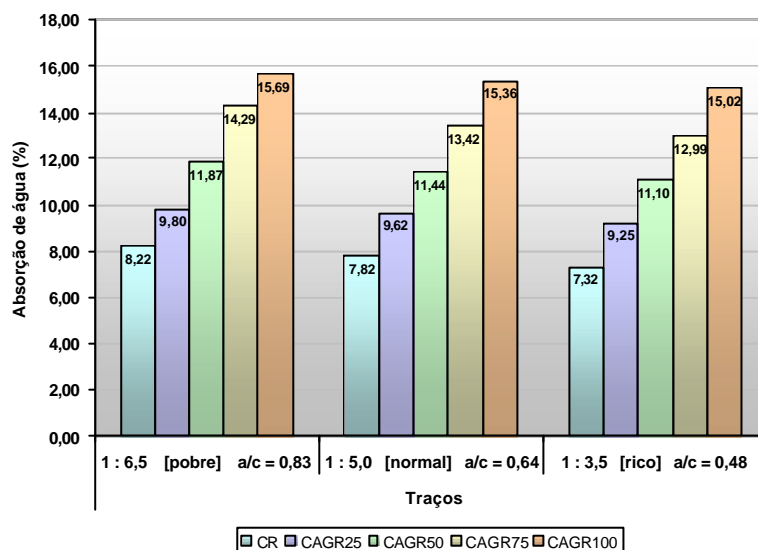


Figura 6.13 – Absorção de água

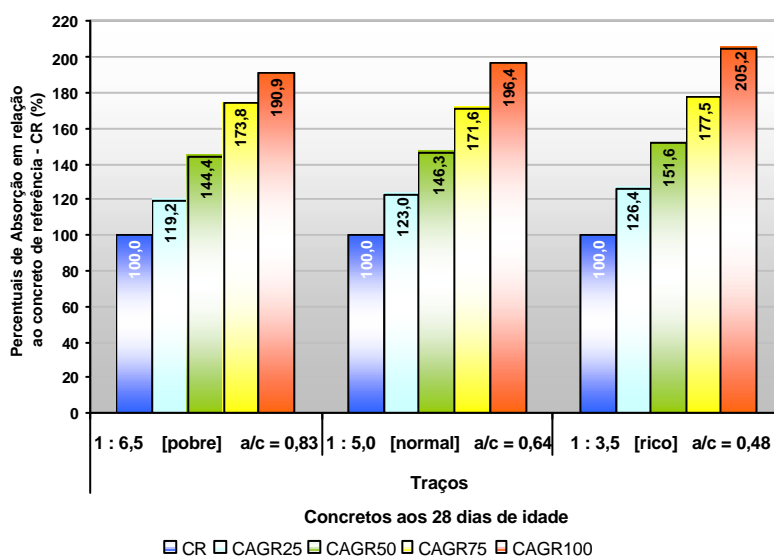


Figura 6.14 - Percentuais de absorção de água em relação aos concretos de referência.

Os resultados de absorção de água verificados para os concretos de mesma família, ou seja, de mesmo teor de substituição de AGN por AGR, decresceram na medida em que se enriqueceram os traços. De acordo com a Figura 6.13, os concretos de referência apresentaram taxas de absorção de água que variaram de 7,22% a 8,22% do concreto rico ao pobre, respectivamente. Enquanto que, para os concretos com 100% de AGR (CAGR100), analogamente, essas taxas variaram de 15,02% a 15,09%, ou seja, praticamente não variaram.

De acordo com a Figura 6.14, os aumentos de absorção de água dos concretos com 100% de AGR, em relação aos concretos de referência, atingiram taxas de 90,9% para o CAGR100 (rico), 96,4% para o CAGR100 (normal) e 105,2% para o CAGR100 (pobre).

6.4.3 Índice de vazios

De acordo com Levy (2001, p. 137) ‘b índice de vazios está relacionado a todos os poros existentes na estrutura de concreto’. O conhecimento desta estrutura de poros, de uma forma indireta, possibilita a previsão da durabilidade de um determinado concreto, visto que permite conhecer a forma pela qual os agentes agressivos “se difundirão ou penetrarão através do interior da massa de concreto”.

A Figura 6.15 apresenta os índices de vazios dos concretos, aos 28 dias de idade. Da mesma forma em que houve crescimento nos valores de absorção de água, na medida em que se substituiu o AGN por AGR, houve progressivo aumento nos índices de vazios. Dentre os concretos com AGR, o CAGR25, dosado com traço rico, apresentou a menor taxa de absorção de água, como também o menor índice de vazios, os quais foram de 9,25% e 19,41%, respectivamente.

Os maiores índices de vazios foram apresentados pelos concretos com 100% de substituição do AGN por AGR, com valores de 28,03%, 27,46% e 27,10%, medidos do concreto mais pobre para o concreto com traço mais rico. A pesquisa realizada por Santos (2006) apresentou resultados similares, com valores de 26,70% para o concreto de traço pobre (1 : 6,5), 24,30% para o concreto de traço normal (1 : 5,0) e 23,60% para o concreto de traço rico (1 : 3,5). Na pesquisa de Santos (2006, p. 116) a relação do índice de vazios e a absorção de água também apresentou valores crescentes, se comparados aos concretos de referência, o que para o autor significa uma tendência dos concretos com AGR. Para o pesquisador, “os resultados mostram a natureza porosa dos concretos com agregado reciclado estudados, com altos índices de vazios e menores valores de massa específica”.

Na Figura 6.16 são apresentados os percentuais de índices de vazios em relação ao concreto de referência. Os percentuais de aumento relativo dos índices de vazios entre concretos de referência e concretos com 100% de AGR, perfizeram os valores de 56% no traço mais pobre, 59,5% no traço normal e 66,9% no traço mais rico.

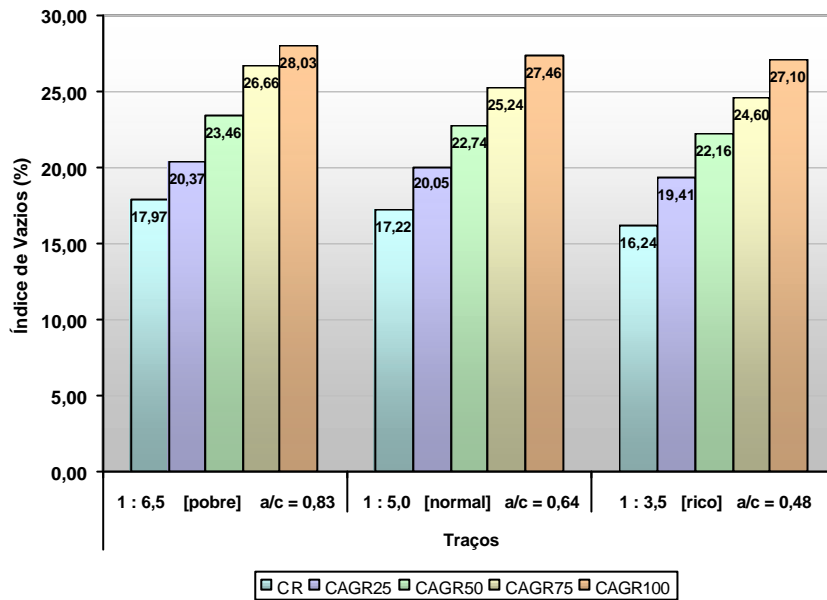


Figura 6.15 – Índice de vazios

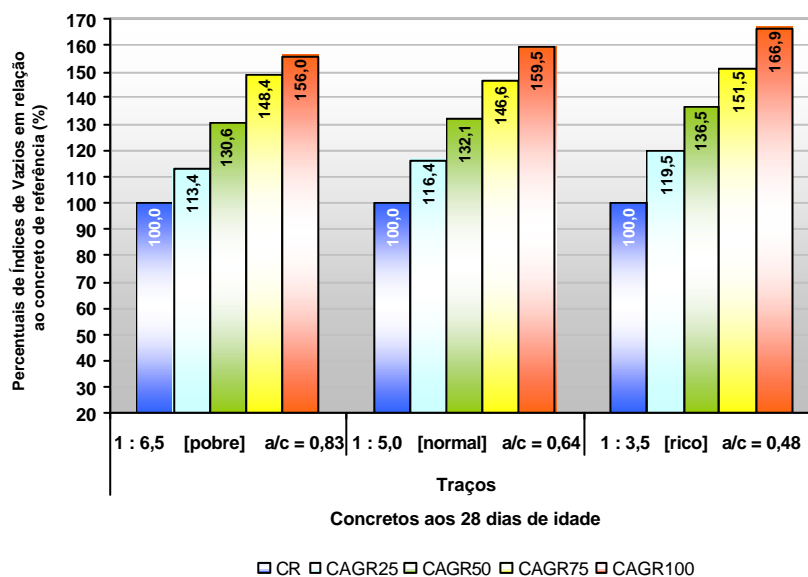


Figura 6.16 - Percentuais de índices de vazios em relação aos concretos de referência.

6.4.4 Propriedades mecânicas dos concretos

Os resultados dos ensaios relativos às propriedades mecânicas dos concretos são apresentados na Tabela 6.8. Os ensaios de tração por compressão diametral e módulo de deformação tangente inicial foram realizados para os concretos com 28 dias de idade. Os ensaios de resistência à compressão foram executados aos 3, 7, 28 e 56 dias de idade.

Tabela 6.8 – Resultados dos ensaios das propriedades mecânicas dos concretos: resistência à compressão, módulo de deformação tangente inicial e tração por compressão diametral.

Idade	Concretos	Resistência à compressão (MPa)			Módulo de deformação (GPa)			Tração por compressão diametral (MPa)		
		Traços			Traços			Traços		
		Pobre 1 : 6,5	Normal 1 : 5,0	Rico 1 : 3,5	Pobre 1 : 6,5	Normal 1 : 5,0	Rico 1 : 3,5	Pobre 1 : 6,5	Normal 1 : 5,0	Rico 1 : 3,5
3 dias	CR	6,66	12,52	21,16						
	CAGR25	6,22	9,88	18,01						
	CAGR50	5,49	9,00	15,81						
	CAGR75	4,91	7,98	14,13						
	CAGR100	4,47	7,10	10,84						
7 dias	CR	8,64	15,59	23,03						
	CAGR25	8,49	13,10	20,72						
	CAGR50	7,54	11,49	17,72						
	CAGR75	6,37	10,25	15,89						
	CAGR100	5,71	9,22	13,91						
28 dias	CR	11,93	18,23	26,87	20,01	22,49	25,88	1,74	2,51	3,27
	CAGR25	10,62	15,80	25,26	17,69	19,79	22,75	1,54	2,06	2,80
	CAGR50	9,81	13,98	22,70	16,20	18,68	20,28	1,40	1,89	2,46
	CAGR75	9,00	13,03	20,94	14,18	15,57	17,97	1,28	1,74	2,26
	CAGR100	8,20	12,15	18,60	11,53	13,33	15,71	1,15	1,50	1,94
56 dias	CR	13,84	20,72	31,55						
	CAGR25	12,15	18,08	28,85						
	CAGR50	10,91	16,99	26,43						
	CAGR75	10,18	15,30	23,72						
	CAGR100	9,37	14,13	20,79						

6.4.4.1 Resistências à compressão

De forma gradativa, os valores das resistências à compressão dos concretos sofreram reduções, na medida em que os teores de substituição do AGN por AGR foram aumentados. Esta constatação vai de encontro com resultados de outras pesquisas correlatas, conforme descrições no Capítulo 4, Item 4.2.4.

Após analisar a Tabela 6.7, a partir das proporções dos traços e relações entre a água e o cimento (a/c), pode-se constatar que os resultados das resistências à compressão dos concretos convencionais (CR – dosados com agregados naturais) apresentam-se inferiores às expectativas. Para melhor entendimento desta observação recorre-se aos pesquisadores

Helene e Terzian (1992, p. 241) que estudaram vários tipos de cimento Portland, a nível nacional. Desta feita, apresentaram equações que permitem calcular os valores médios da resistência à compressão axial de concretos aos 3, 7, 28, 63 e 91 dias de idade, em função da relação água cimento (a/c), a partir do tipo de cimento. A equação definida para o cálculo da resistência de concretos convencionais produzidos com o cimento Portland comum (CP 32), aos 28 dias de idade, foi assim apresentada:

$$f_{d28} = 92,8 \div (7,9)^{a/c}$$

De acordo com a equação de Helene e Terzian, para uma relação a/c igual a 0,48, ter-se-ia um valor de resistência à compressão de concretos, aos 28 dias, equivalente a 34,41 MPa (Mega Pascals). Verifica-se, na Tabela 6.7, que o concreto de referência (CR) dosado sob as condições do traço rico (1 : 3,5), com relação “ a/c ” igual a 0,48, apresentou resultado de 26,87 MPa para a resistência à compressão, aos 28 dias de idade. Dessa forma, este resultado atinge 70,1% do valor apontado pela equação de Helene e Terzian, ou seja, a resistência aferida para o concreto de referência (CR), em questão, ficou praticamente 30% abaixo do que deveria ter atingido.

Logo após a constatação deste fato, buscou-se saber qual o motivo que, efetivamente, pudesse ter conduzido a estes valores de resistências. Com isso, todos os cálculos de dosagens, máquinas e equipamentos foram novamente checados, sem quaisquer problemas encontrados. Concluiu-se, então, que o cimento recém fabricado, quando utilizado na produção dos concretos, não havia cumprido integralmente o seu “papel” de desempenho, em detrimento das especificações normativas relacionadas à fabricação deste produto. Partiu-se, então, para a execução de dois ensaios de determinação da resistência do cimento. Um ensaio foi executado no Laboratório de Materiais de Construção da UFG e outro no Laboratório de Concreto de FURNAS-GO, os quais confirmaram a hipótese inicial. Estes resultados podem ser vistos no Anexo A do presente trabalho. Entretanto, entendeu-se que a influência negativa do baixo desempenho do cimento utilizado foi o mesmo, tanto para os concretos convencionais de referência (CR) quanto para os concretos dosados com agregados graúdos reciclados (CAGR), pois toda a quantidade do produto utilizado fazia parte do mesmo lote e de única data de fabricação. Assim, contudo, a relevância dos estudos não poderia ser integralmente prejudicada com este fato, sobretudo quanto às análises comparativas entre os concretos de referência e os concretos com agregados graúdos reciclados. Além disso, para melhores interpretações das propriedades mecânicas avaliadas,

são apresentados resultados comparativos percentuais entre os concretos dosados com AGR e os correspondentes concretos de referência, dosados com AGN.

Quando se trata de tecnologia do concreto, a resistência à compressão é a propriedade mais pesquisada. “Esse ensaio normalmente é executado, pois está diretamente ligado à relação a/c e, esta relação, sempre está relacionada à propriedade pesquisada através de algum modelo matemático” (LEVY, 2001, p.122). Assim como afirmou Levy, para todas as propriedades mecânicas estudadas na presente pesquisa, elaborou-se modelos matemáticos que correlacionam estas propriedades a algumas variáveis que as influenciam. Estes modelos matemáticos são apresentados no Item 6.5.

6.4.4.1.1 Resistências à compressão aos 3 dias de idade

Os resultados de resistências a compressão dos concretos, aos 3 dias de idade, são mostrados na Figura 6.17.

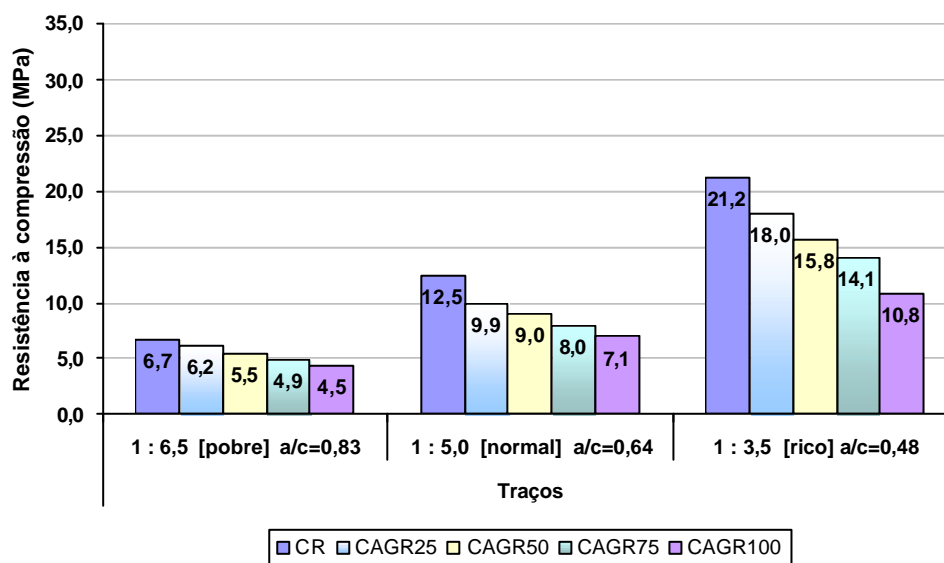


Figura 6.17 – Resistências à compressão aos 3 dias de idade.

De acordo com a Figura 6.17, para cada um dos três grupos de concretos, a resistência à compressão foi diminuindo na medida em que se aumentou o teor de substituição do AGN por AGR. Quando comparados os valores das resistências entre concretos pertencentes ao mesmo traço (grupo), verificou-se que a diferença entre estes valores se tornou cada vez maior, na proporção em que se enriqueceram os traços. Os valores

percentuais de resistências dos concretos com AGR, em relação aos concretos de referência, estão apresentados na Figura 6.18.

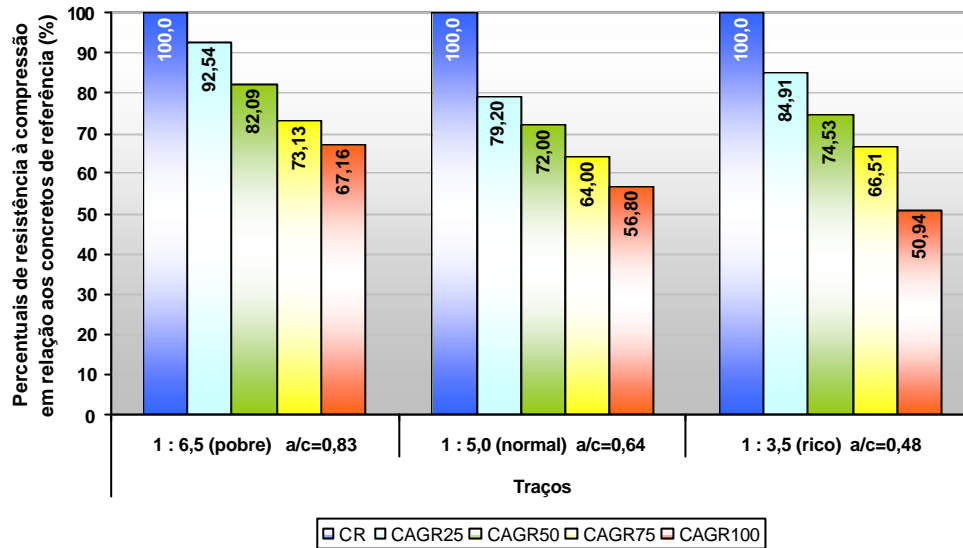


Figura 6.18 – Percentuais de resistências à compressão aos 3 dias de idade em relação aos concretos de referência.

6.4.4.1.2 Resistências à compressão aos 7 dias de idade

Os resultados de resistências a compressão dos concretos, aos 7 dias de idade, são mostrados na Figura 6.19. Os valores percentuais de resistências dos concretos com AGR, em relação aos concretos de referência, estão apresentados na Figura 6.20.

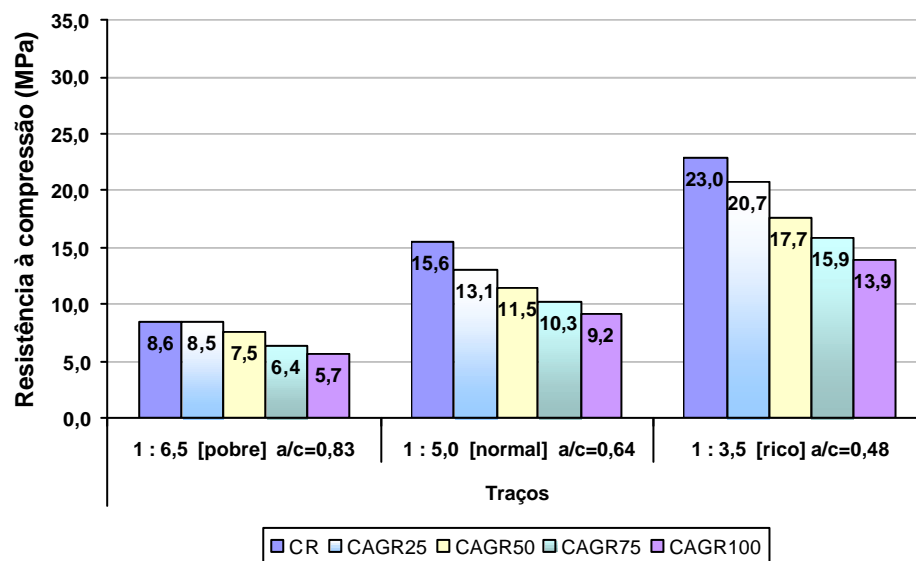


Figura 6.19 – Resistências à compressão aos 7 dias de idade.

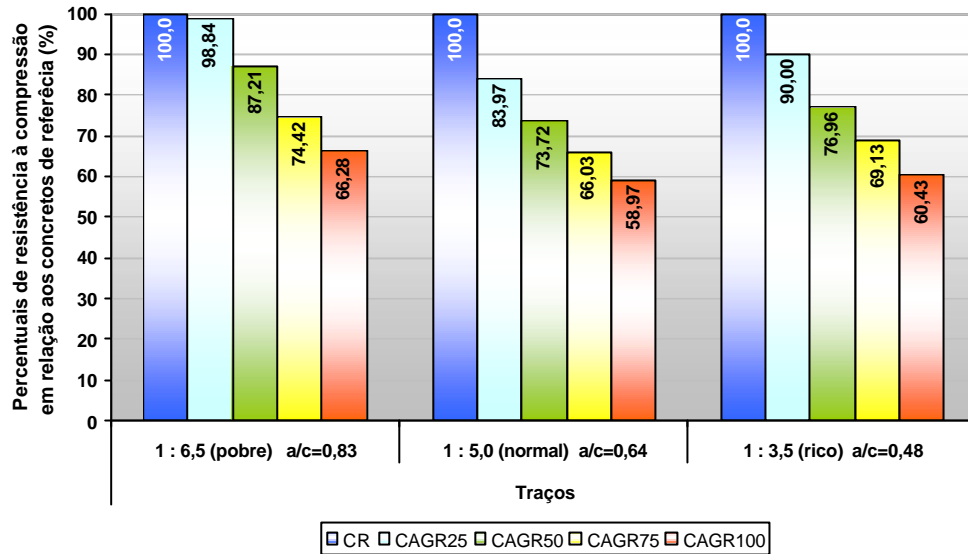


Figura 6.20 - Percentuais de resistências à compressão aos 7 dias de idade em relação aos concretos de referência.

O histograma apresentado na Figura 6.20 mostra que a diferença entre os percentuais de resistências dos concretos com AGR, em relação aos concretos de referência, tornaram-se menores dentre os concretos pobres (1 : 6,5), variando de 66% para o CAGR100 e 98% para o CAGR25. De forma geral, os resultados de resistência dos concretos com AGR atingiram percentuais que variaram de 58% a 98% das resistências aferidas para os concretos de referência. Na Tabela 6.9 são apresentados os percentuais de ganho de resistência à compressão dos concretos, de 3 para 7 dias de idade.

Tabela 6.9 – Percentuais de ganho de resistência à compressão de 3 para 7 dias de idade.

Idades	Concretos	Traços		
		1 : 6,5	1 : 5,0	1 : 3,5
Resistências aos 3 dias de idade (MPa)	CR	6,70	12,50	21,20
	CAGR25	6,20	9,90	18,00
	CAGR50	5,50	9,00	15,80
	CAGR75	4,90	8,00	14,10
	CAGR100	4,50	7,10	10,80
Resistências aos 7 dias de idade (MPa)	CR	8,60	15,60	23,00
	CAGR25	8,50	13,10	20,70
	CAGR50	7,50	11,50	17,70
	CAGR75	6,40	10,30	15,90
	CAGR100	5,70	9,20	13,90
Percentuais de ganho de resistência (%)	CR	28,36	24,80	8,49
	CAGR25	37,10	32,32	15,00
	CAGR50	36,36	27,78	12,03
	CAGR75	30,61	28,75	12,77
	CAGR100	26,67	29,58	28,70
Média para os CAGR (%)		32,7	29,6	17,1

O incremento da resistência à compressão, de 3 para 7 dias de idade, apresentou-se maior para os concretos pobres, com reciclados (CAGR), atingindo uma média de ganho de 32,7%. Na medida em que se enriqueceu o traço dos concretos, reduziram-se os valores médios percentuais de ganho de resistência. Ao comparar os ganhos de resistências entre os concretos pertencentes ao mesmo grupo (traço), identifica-se que a substituição do AGN pelo AGR influenciou no percentual de ganho, sendo decrescente na medida em que a taxa de substituição aumentou. Vale destacar que as taxas médias de ganhos de resistência dos concretos com AGR foram superiores às equivalentes taxas dos concretos de referência, para os três grupos (traços), conforme visualização na Tabela 6.9.

6.4.4.1.3 Resistências à compressão aos 28 dias de idade

Os resultados das resistências à compressão dos concretos, aos 28 dias de idade, e percentuais de resistências dos concretos com AGR em relação aos concretos de referência são apresentados nas Figuras 6.21 e 6.22, respectivamente.

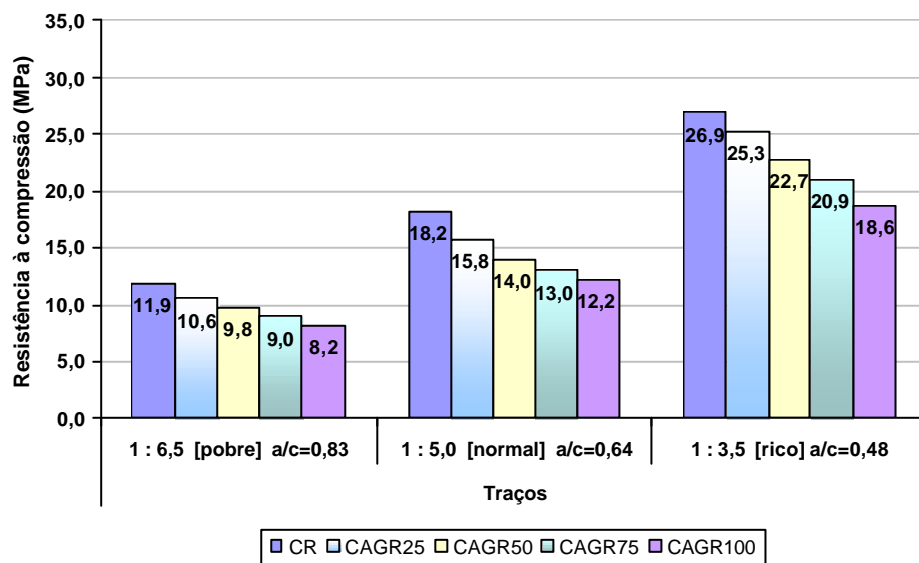


Figura 6.21 – Resistências à compressão aos 28 dias de idade.

Analogamente ao que ocorreu aos 3 e 7 dias de idade, os valores de resistência à compressão dos concretos reduziram-se na proporção em que se aumentou os teores de substituição do AGN por AGR. Na Tabela 6.10 são apresentados os percentuais de ganho de resistência à compressão dos concretos, de 7 para 28 dias de idade.

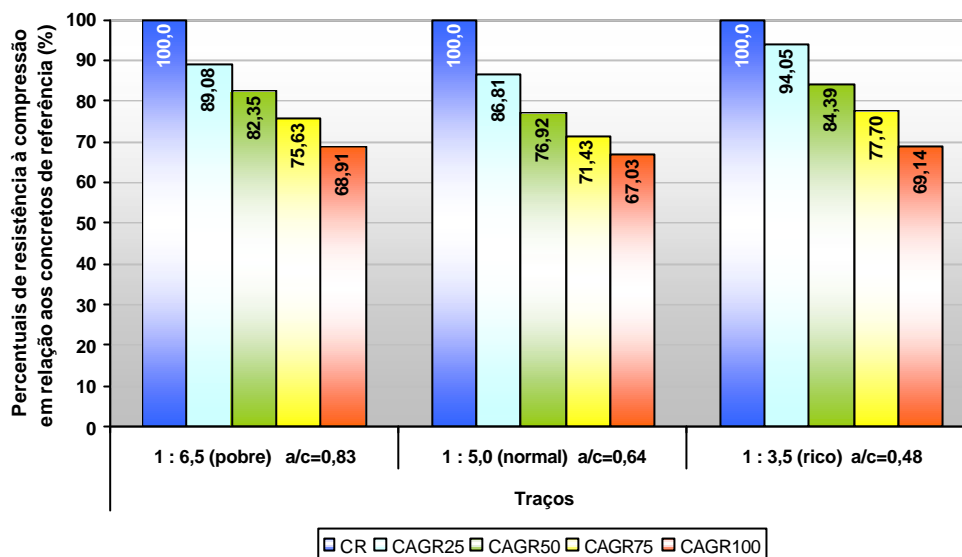


Figura 6.22 - Percentuais de resistências à compressão dos concretos, aos 28 dias de idade, em relação aos concretos de referência.

O CAGR25, pertencente ao grupo de concretos ricos, apresentou valor de resistência percentual mais próximo em relação ao concreto de referência (94,05%). De forma geral, os resultados de resistência dos concretos com AGR atingiram percentuais que variaram de 67% a 94% dos valores encontrados de resistências para os concretos de referência.

Tabela 6.10 - Percentuais de ganho de resistência à compressão de 7 para 28 dias de idade.

Idades	Concretos	Traços		
		1 : 6,5	1 : 5,0	1 : 3,5
Resistências aos 7 dias de idade (MPa)	CR	8,60	15,60	23,00
	CAGR25	8,50	13,10	20,70
	CAGR50	7,50	11,50	17,70
	CAGR75	6,40	10,30	15,90
	CAGR100	5,70	9,20	13,90
Resistências aos 28 dias de idade (MPa)	CR	11,90	18,20	26,90
	CAGR25	10,60	15,80	25,30
	CAGR50	9,80	14,00	22,70
	CAGR75	9,00	13,00	20,90
	CAGR100	8,20	12,20	18,60
Percentuais de ganho de resistência (%)	CR	38,37	16,67	16,96
	CAGR25	24,71	20,61	22,22
	CAGR50	30,67	21,74	28,25
	CAGR75	40,63	26,21	31,45
	CAGR100	43,86	32,61	33,81
Média para os CAGR (%)		35,0	25,3	28,9

O ganho de resistência à compressão, de 7 para 28 dias de idade, apresentou-se maior para os concretos pobres, com reciclados (CAGR), atingindo uma média de 35,0%. Ao

comparar os ganhos de resistências entre os concretos pertencentes ao mesmo grupo (traço), identifica-se que a substituição do AGN pelo AGR influenciou no percentual de ganho, analogamente com o que ocorreu no período de 3 para 7 dias de idade. Houve decréscimo do ganho médio de resistência nos concretos com AGR, na proporção em que a taxa de substituição aumentou.

6.4.4.1.4 Resistências à compressão aos 56 dias de idade

Nas Figuras 6.23 e 6.24 podem ser observados os valores resultantes dos ensaios de resistência à compressão e percentuais de resistências dos concretos com AGR em relação aos concretos de referência, aos 56 dias de idade, respectivamente.

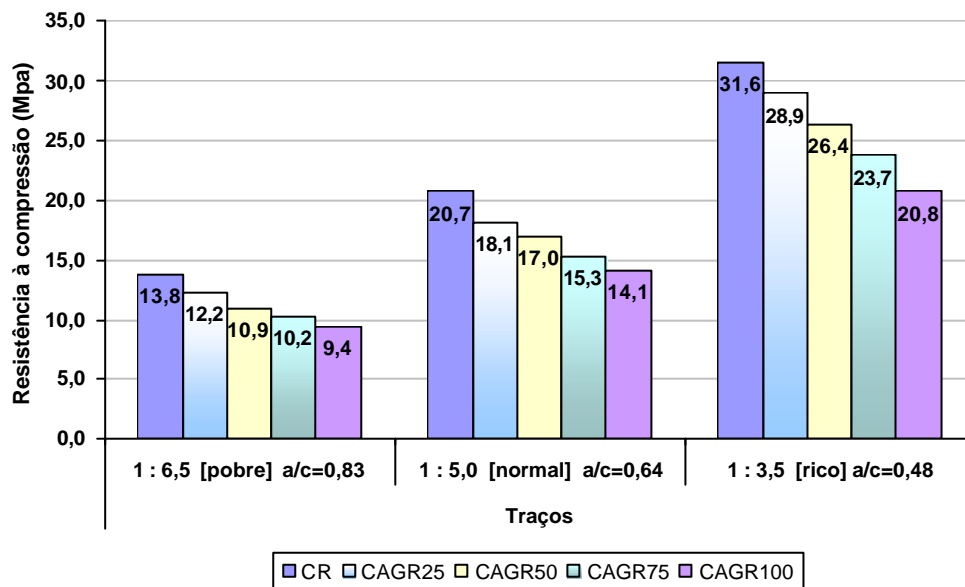


Figura 6.23 – Resistências à compressão aos 56 dias de idade.

Nesta idade final de avaliação, aos 56 dias, os resultados de resistência à compressão, visualizados a partir dos percentuais comparativos entre os concretos com AGR e os concretos de referência, apontaram que para os teores de substituição superiores a 50%, do AGN por AGR, as resistências passaram a apresentar reduções significativas (próximas de 30%) a partir dos concretos com 75% de AGR, conforme visualização na Figura 6.24.

Na Tabela 6.11 são apresentados os percentuais de ganhos de resistência à compressão de 28 para 56 dias de idade. A média geral de ganho de resistência dos concretos com AGR, neste período, correspondeu a 14,93%, sendo que o maior ganho médio foi verificado para os concretos com AGR de traço normal, numa taxa de 17,33%.

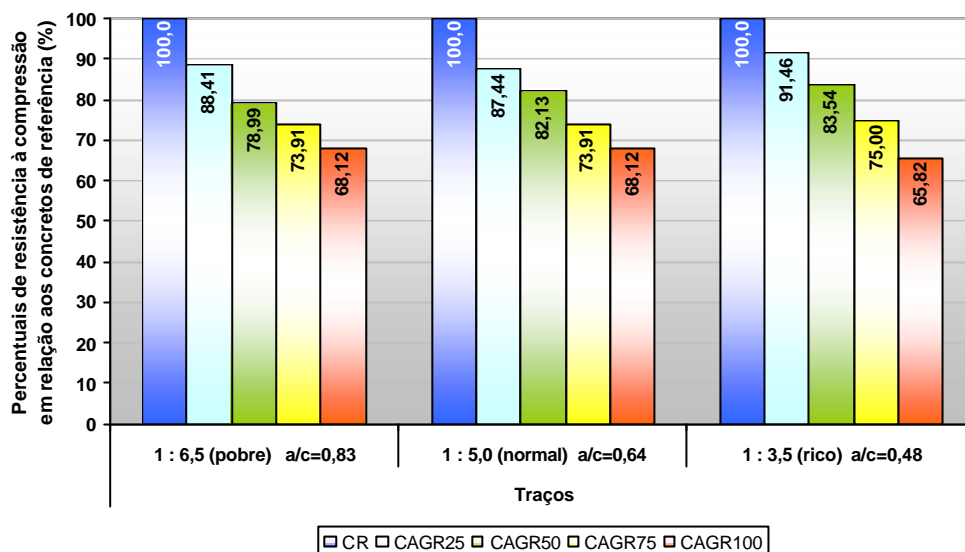


Figura 6.24 - Percentuais de resistências à compressão aos 56 dias de idade em relação aos concretos de referência.

Tabela 6.11 - Percentuais de ganho de resistência à compressão de 28 para 56 dias de idade.

Idades	Concretos	Traços		
		1 : 6,5	1 : 5,0	1 : 3,5
Resistências aos 28 dias de idade (MPa)	CR	11,90	18,20	26,90
	CAGR25	10,60	15,80	25,30
	CAGR50	9,80	14,00	22,70
	CAGR75	9,00	13,00	20,90
	CAGR100	8,20	12,20	18,60
Resistências aos 56 dias de idade (MPa)	CR	13,80	20,70	31,60
	CAGR25	12,20	18,10	28,90
	CAGR50	10,90	17,00	26,40
	CAGR75	10,20	15,30	23,70
	CAGR100	9,40	14,10	20,80
Percentuais de ganho de resistência (%)	CR	15,97	13,74	17,47
	CAGR25	15,09	14,56	14,23
	CAGR50	11,22	21,43	16,30
	CAGR75	13,33	17,69	13,40
	CAGR100	14,63	15,57	11,83
Média para os CAGR (%)		13,6	17,3	13,9

Os percentuais de ganho de resistência, de 28 para 56 dias de idade, correspondentes aos concretos de referência equivaleram a 15,97%, 13,74% e 17,47% para os traços pobre, normal e rico, respectivamente.

A comparação entre os ganhos de resistência à compressão dos concretos pode ser visualizada na Tabela 6.12. Os maiores ganhos de resistência ocorreu para os concretos de traço pobre (1 : 6,5), no período de 7 para 28 dias de idade.

Tabela 6.12 - Percentuais de ganho de resistência à compressão de 3 para 7 dias, 7 para 28 dias e 28 para 56 dias de idade.

Idades	Concretos	Traços		
		1 : 6,5	1 : 5,0	1 : 3,5
Percentuais de ganho de resistência de 3 para 7 dias (%)	CR	28,36	24,80	8,49
	CAGR25	37,10	32,32	15,00
	CAGR50	36,36	27,78	12,03
	CAGR75	30,61	28,75	12,77
	CAGR100	26,67	29,58	28,70
Percentuais de ganho de resistência de 7 para 28 dias (%)	CR	38,37	16,67	16,96
	CAGR25	24,71	20,61	22,22
	CAGR50	30,67	21,74	28,25
	CAGR75	40,63	26,21	31,45
	CAGR100	43,86	32,61	33,81
Percentuais de ganho de resistência de 28 para 56 dias (%)	CR	15,97	13,74	17,47
	CAGR25	15,09	14,56	14,23
	CAGR50	11,22	21,43	16,30
	CAGR75	13,33	17,69	13,40
	CAGR100	14,63	15,57	11,83

De forma geral, os concretos dosados com agregados graúdos reciclados perderam em resistência à compressão na medida em que se aumentou o teor de substituição de AGN por AGR, em todas as idades e em todos os traços executados.

6.4.4.2 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado nos concretos aos 28 dias de idade. Os resultados são apresentados na Figura 6.25.

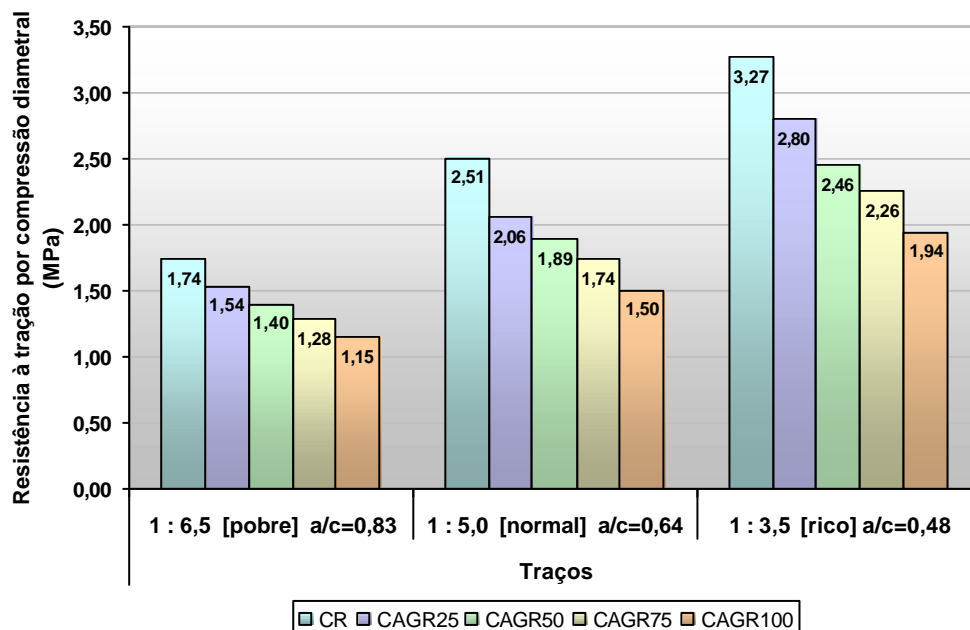


Figura 6.25 – Resistências à tração por compressão diametral

Para todos os traços com AGR, os ensaios de resistência à tração por compressão diametral, quando comparados aos concretos de referência, apresentaram decréscimos de valores na medida em que se aumentou o teor de AGR. Entretanto, para os concretos pobres (1 : 6,5) com AGR, os quais contêm maior quantidade de agregados, verificou-se melhores resultados percentuais, quando comparados ao concreto de referência de mesmo traço, conforme mostra a Figura 6.26. Este fato pode encontrar explicação, com base em Leite (2001, p.96) quando, hipoteticamente, diz que a resistência à tração leva em consideração mecanismos de aderência física entre as partículas do AGR e que, sendo estas de superfícies mais rugosas e mais irregulares (angulosas), há melhorias de aderência entre a matriz de concreto e a superfície dos grãos do AGR, devido ao maior entrelaçamento dos compostos de hidratação com os poros superficiais das partículas.

Na Figura 6.26 são apresentados os percentuais de resistência à tração por compressão diametral alcançados pelos concretos com AGR, em relação aos concretos de referência. Os quocientes resultantes da razão tração/compressão, em percentual, aos 28 dias de idade, são apresentados na Tabela 6.13.

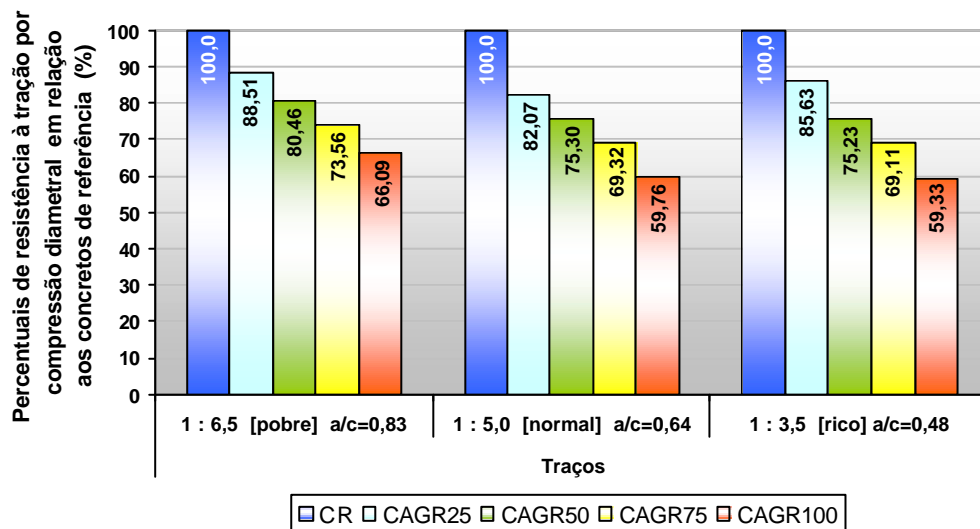


Figura 6.26 - Percentuais de resistências à tração por compressão diametral em relação aos concretos de referência.

A Tabela 6.13 mostra que a razão entre as resistências à tração e à compressão nos concretos de referência apresentou-se com taxas de 14,6%, 13,8% e 12,2%, do concreto mais pobre para o mais rico. Mehta e Monteiro (1994) afirmam que a razão entre as resistências à tração e à compressão compreende valores de 10 a 11% para concretos de baixa resistência,

de 8 a 9% para concretos de média resistência e 7% para concretos de alta resistência. No entanto, ressaltam os autores que nos ensaios de resistência à tração “por compressão diametral”, como é o caso desta pesquisa, esses valores apresentam-se ligeiramente maiores (p.72).

Tabela 6.13 – Valores de resistência à tração e à compressão e razão tração/compressão, em percentual, aos 28 dias de idade.

Traços	Resistências	Concretos				
		CR	CAGR25	CAGR50	CAGR75	CAGR100
1 : 6,5 [pobre]	Resistência à Compreensão	11,9	10,6	9,8	9,0	8,2
	Resistência à Tração	1,74	1,54	1,40	1,28	1,15
a/c=0,83	Razão tração/compressão (%)	14,6%	14,5%	14,3%	14,2%	14,0%
1 : 5,0 [normal]	Resistência à Compreensão	18,20	15,80	14,00	13,00	12,20
	Resistência à Tração	2,51	2,06	1,89	1,74	1,50
a/c=0,64	Razão tração/compressão (%)	13,8%	13,0%	13,5%	13,4%	12,3%
1 : 3,5 [rico]	Resistência à Compreensão	26,90	25,30	22,70	20,90	18,60
	Resistência à Tração	3,27	2,80	2,46	2,26	1,94
a/c=0,48	Razão tração/compressão (%)	12,2%	11,1%	10,8%	10,8%	10,4%
	Média Geral	13,5%	12,9%	12,9%	12,8%	12,2%

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), as resistências à compressão e à tração estão intimamente relacionadas, mas sem uma proporcionalidade direta. Para os autores, aumentando-se a resistência à compressão implica dizer que também a resistência à tração será aumentada (p. 70). Sobre a razão tração/compressão dizem os autores:

A relação entre as resistências à compressão e a razão resistência à tração/compressão parece ser determinada pelo efeito de vários fatores nas propriedades da matriz e da zona de transição no concreto [...]. Observa-se que não apenas o tempo de cura, mas também as características da mistura do concreto, tais como o fator água/cimento, tipo de agregado e aditivos afetam a razão resistência à tração/compressão em vários níveis (p.72).

A Figura 6.27 mostra as superfícies internas de um corpo-de-prova de concreto rico (1 : 3,5), com 75% de taxa de substituição do AGN por AGR – CAGR75_{3,5}, após ruptura total, ao final do ensaio de resistência à tração por compressão diametral. As imagens apresentadas mostram, desde um panorama geral, das superfícies internas do CP ensaiado, até uma imagem ampliada de microscópio óptico, focado numa região multifásica do concreto, onde possibilita a visualização da matriz entre partículas do AGN e AGR.

A partícula de AGR se apresentou com aspecto superficial de total ruptura, enquanto que a partícula do AGN mostrou-se com ruptura parcial, conforme seta indicativa na imagem ampliada na Figura 6.26. Na medida em que se enriqueceu o traço, possivelmente, assim, diminuiu-se a porosidade da matriz e da zona de transição (ZT), em função de provável

melhoria da resistência intrínseca dos produtos de hidratação que compreendem a ZT e, em consequência disto, conferiram-se melhorias nos resultados de resistência à tração e à compressão (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 72). Portanto, para um CP sob ação de cargas (forças) externas, quanto maior for o desempenho da matriz do concreto maior será a solicitação às propriedades físicas e mecânicas do agregado, as quais passam a ser condições relevantes e influentes nas resistências do concreto.

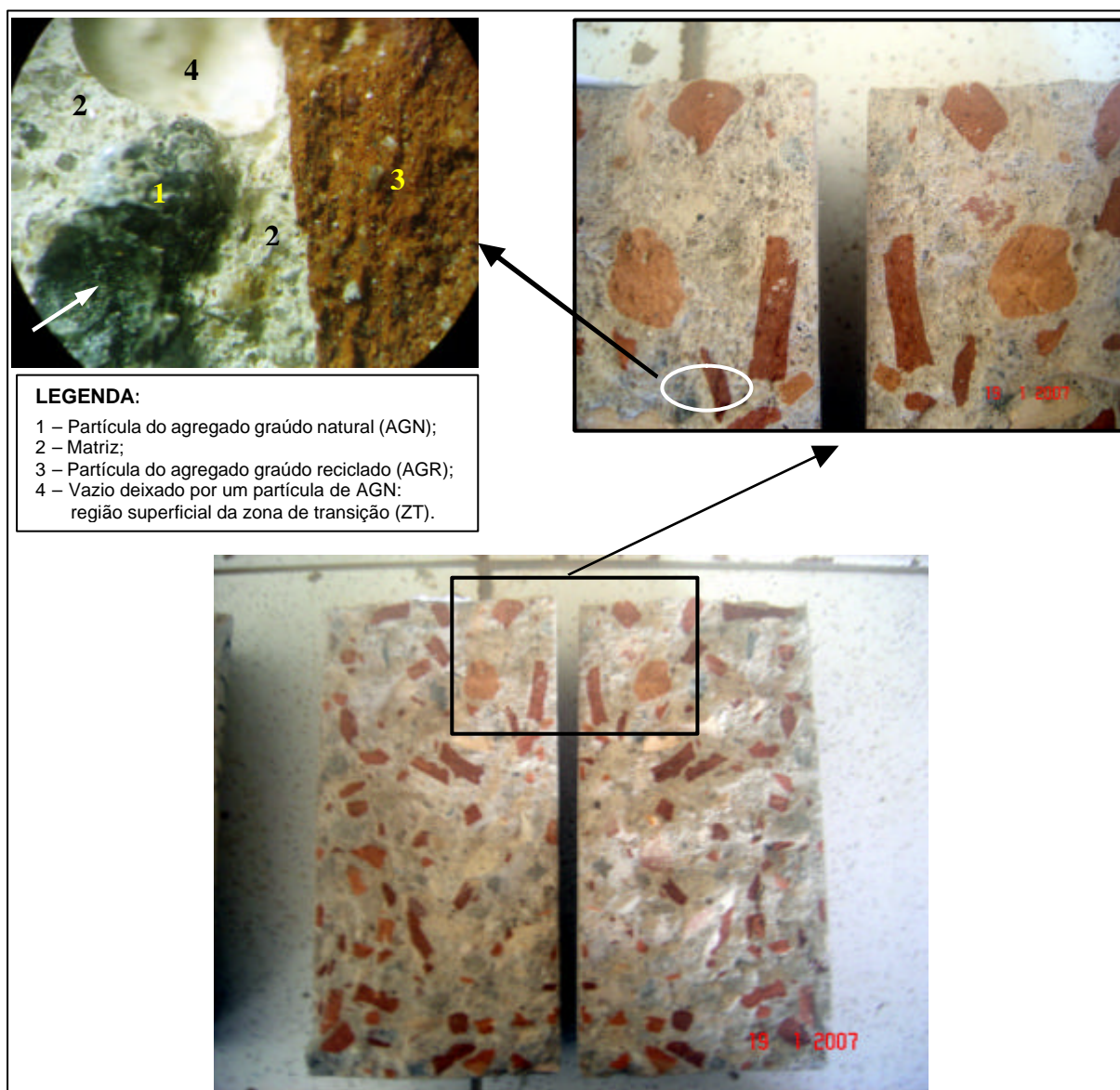


Figura 6.27 – CP rompido após ensaio de resistência à tração por compressão diametral

6.4.4.3 Módulo de deformação

De acordo com o Capítulo 4, Item 4.2.6, o módulo de deformação do concreto é influenciado, fundamentalmente, pelo agregado graúdo, matriz da pasta de cimento, zona de

transição (ZT) e parâmetros de ensaio. No caso do concreto, que é considerado um material heterogêneo (multifásico), seu comportamento elástico é determinado pela fração volumétrica, massa específica, pelo módulo de deformação dos principais constituintes e pelas características da ZT. Também, sabendo-se que a massa específica é inversamente proporcional à porosidade, passam a ser relevantes na influência sobre o módulo de deformação do concreto os fatores que afetam a porosidade do agregado, da matriz da pasta de cimento e da ZT (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Na medida em que se substituiu o AGN por AGR, houve decréscimo nos valores do módulo de deformação dos concretos. O maior resultado, equivalente a 25,68 GPa (Giga Pascal), correspondeu ao concreto de referência de traço rico (CR_{3,5}). Os resultados do módulo de deformação dos concretos, aos 28 dias, podem ser visualizados na Figura 6.28. Dentre os concretos com AGR, o CAGR25_{3,5} apresentou o maior valor de módulo de deformação: 22,75 GPa.

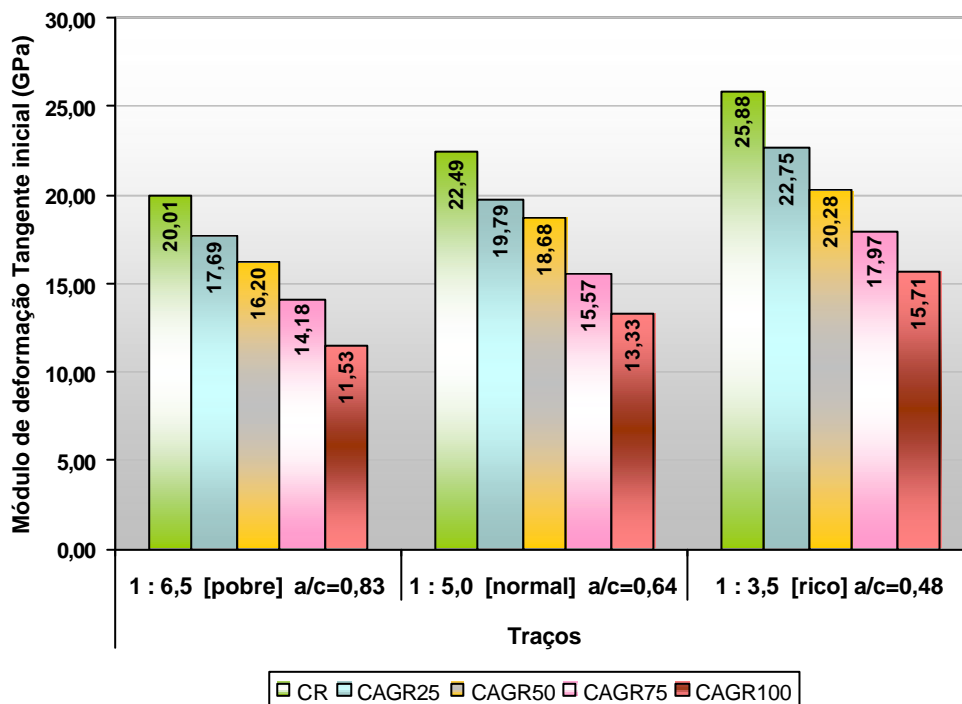


Figura 6.28 – Módulos de deformação tangente inicial

Santos (2006) utilizou AGR de composição semelhante ao utilizado nesta pesquisa, para a produção de concretos. Para os concretos dosados com 100% de AGR, nos traços pobre (1 : 6,5), normal (1 : 5,0) e rico (1 : 3,5), encontrou resultados de módulo de deformação equivalentes a 11,1 GPa, 14,1 GPa e 16,6 GPa, respectivamente. Os resultados encontrados no presente estudo corroboram os resultados obtidos por Santos (2006).

Os valores percentuais do módulo de deformação tangente inicial, alcançados pelos concretos com AGR, em relação aos concretos de referência, são mostrados na Figura 6.29. De modo geral, na medida em que foram feitas as substituições de AGN por AGR, para os concretos de traço pobre, por exemplo, as variações foram de 11,59% a 42,38%, dos concretos com 25% a 100% de AGR, respectivamente.

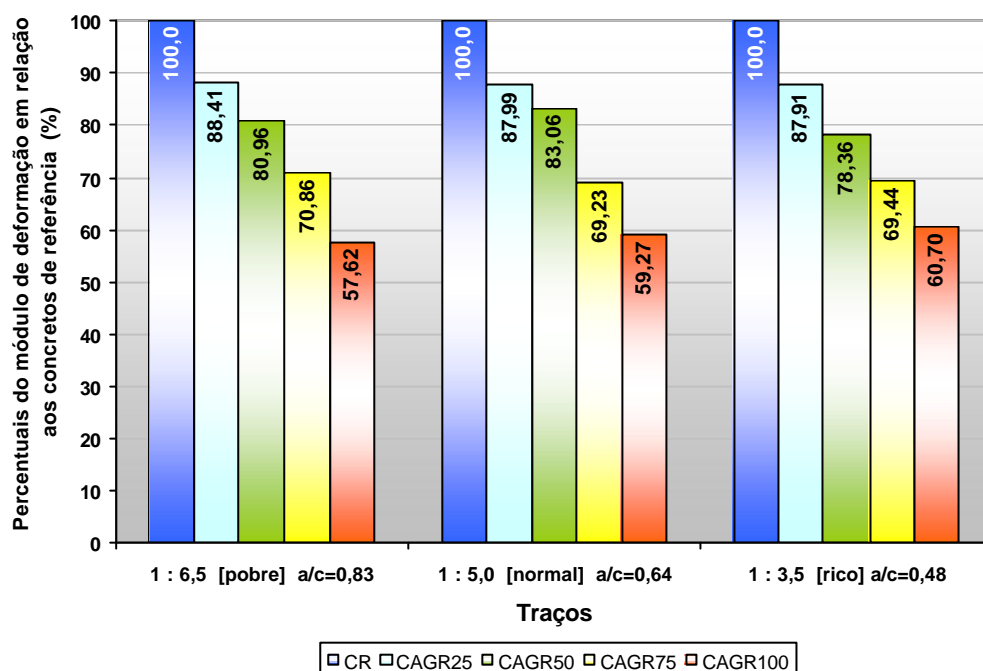


Figura 6.29 – Percentuais de módulos de deformação em relação aos concretos de referência.

6.5 PROPOSTA DE MODELAGEM MATEMÁTICO-ESTATÍSTICA E DIAGRAMAS DE DOSAGEM

Para as propriedades mecânicas dos concretos estudados: resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de deformação tangente inicial, uma modelagem matemática, que se fundamenta na estatística, foi elaborada a partir do método IPT/EPUSP apresentado por Helene e Terzian (1994, p. 225-299). Este modelo teve o propósito de estudar a correlação entre as propriedades mecânicas avaliadas nos concretos e as variáveis que, fundamentalmente, os influenciam. Desta forma, os diagramas de dosagem foram elaborados, para cada uma das 5 famílias de concretos, de forma correspondente a cada uma das 3 propriedades mecânicas avaliadas. Os gráficos ou diagramas de dosagem gerados e suas equações encontram-se nos Itens 6.5.1, 6.5.2 e 6.5.3.

6.5.1. Resistência à compressão (f_{cd})

Os diagramas de dosagem referentes à resistência à compressão para os concretos CR, CAGR25, CAGR50, CAGR75 e CAGR100 são apresentados nas Figuras 6.30, 6.31, 6.32, 6.33 e 6.34.

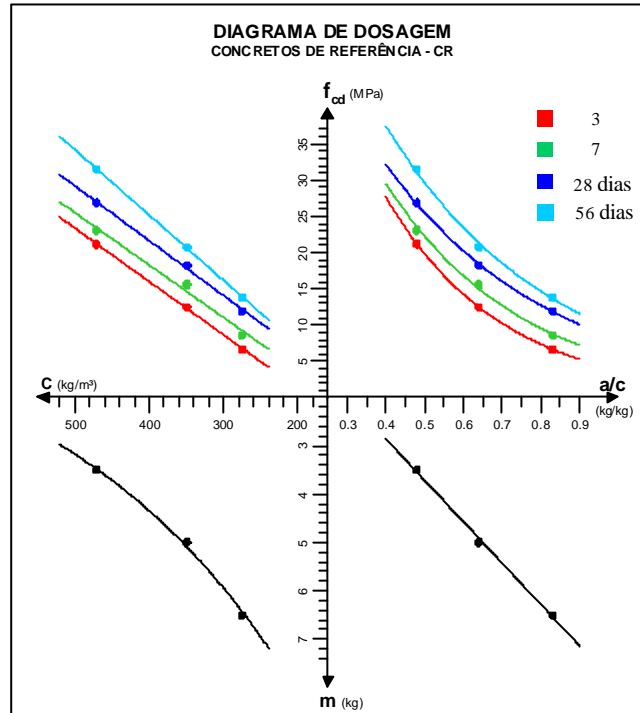


Figura 6.30 – Diagrama de dosagem para o CR relativo à resistência à compressão.

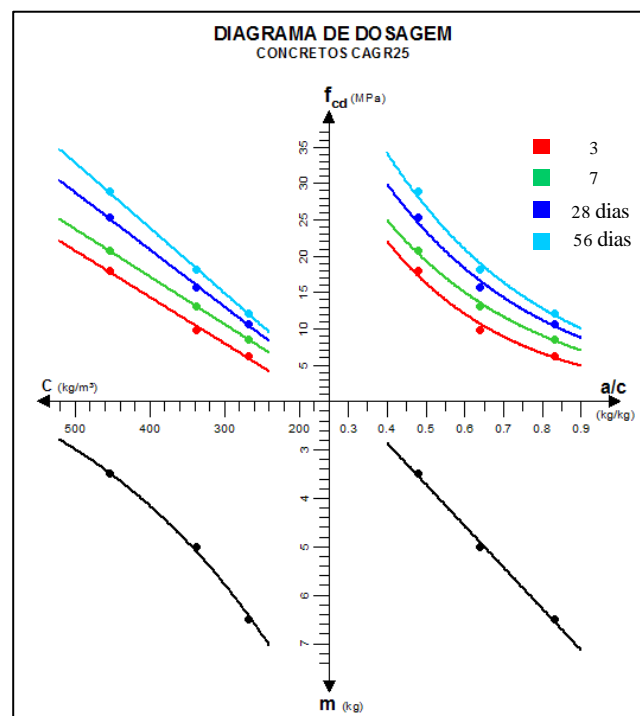


Figura 6.31 – Diagrama de dosagem para o CAGR25 relativo à resistência à compressão.

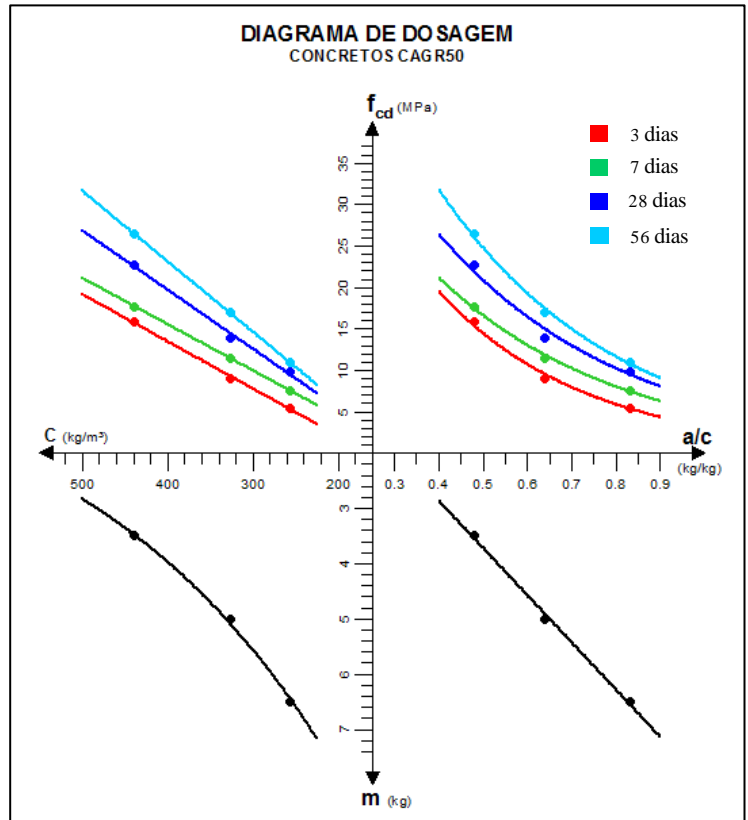


Figura 6.32 – Diagrama de dosagem para o CAGR50 relativo à resistência à compressão.

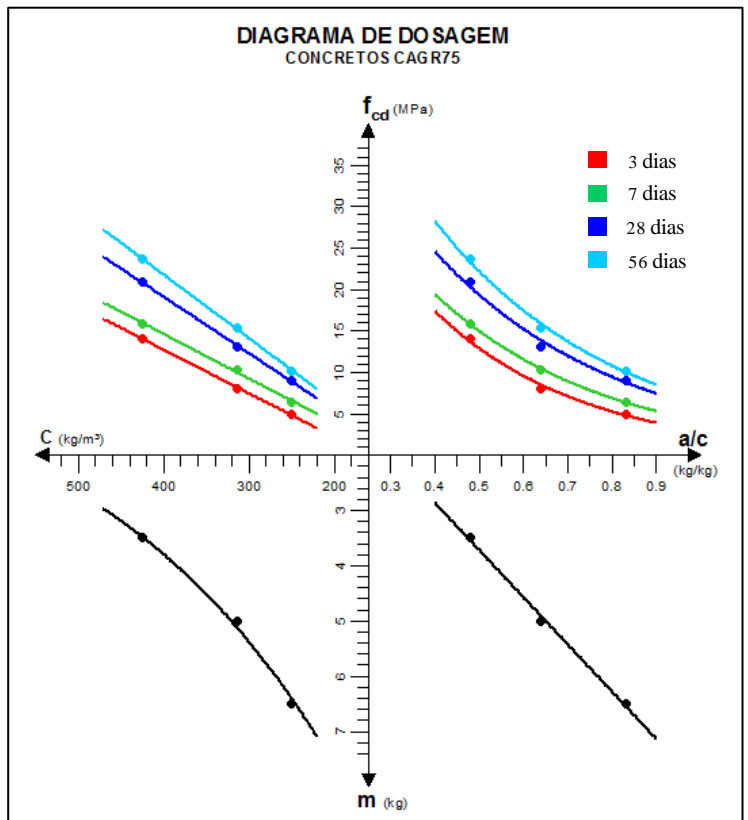


Figura 6.33 – Diagrama de dosagem para o CAGR75 relativo à resistência à compressão.

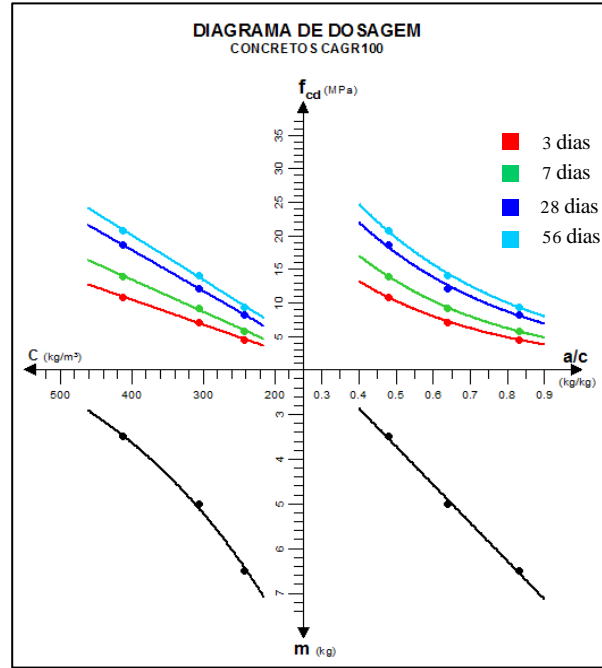


Figura 6.34 – Diagrama de dosagem para o CAGR100 relativo à resistência à compressão.

As equações de dosagem dos concretos relativos às resistências à compressão são apresentadas nas Tabelas 6.14, 6.15 e 6.16.

Tabela 6.14 – Equações de dosagem – resistência à compressão (f_{cd}) em função da relação água/cimento (a/c): $f_{cd} = f(a/c)$ e sua correspondente inversa: $a/c = f(f_{cd})$.

Concretos	Equações - Quadrante de Abrams				
		3 dias	7 dias	28 dias	56 dias
CR	$y = f(x)$	$f_{c3} = \frac{103,450}{27,206^{a/c}}$	$f_{c7} = \frac{90,885}{16,680^{a/c}}$	$f_{c28} = \frac{81,222}{10,147^{a/c}}$	$f_{c56} = \frac{95,815}{10,456^{a/c}}$
	$f_{cd} = f(a/c)$				
	$x = f(y)$	$a/c = \frac{4,639 - \ln(f_{c3})}{3,303}$	$a/c = \frac{4,510 - \ln(f_{c7})}{2,814}$	$a/c = \frac{4,397 - \ln(f_{c28})}{2,317}$	$a/c = \frac{4,562 - \ln(f_{c56})}{2,347}$
	$a/c = f(f_{cd})$				
	$R^2 =$	0.999987	0.995529	0.999433	0.996245
CAGR25	$y = f(x)$	$f_{c3} = \frac{73,606}{20,470^{a/c}}$	$f_{c7} = \frac{68,887}{12,691^{a/c}}$	$f_{c28} = \frac{80,161}{11,743^{a/c}}$	$f_{c56} = \frac{91,513}{11,694^{a/c}}$
	$f_{cd} = f(a/c)$				
	$x = f(y)$	$a/c = \frac{4,299 - \ln(f_{c3})}{3,019}$	$a/c = \frac{4,232 - \ln(f_{c7})}{2,541}$	$a/c = \frac{4,384 - \ln(f_{c28})}{2,463}$	$a/c = \frac{4,516 - \ln(f_{c56})}{2,459}$
	$a/c = f(f_{cd})$				
	$R^2 =$	0.984685	0.99572	0.989721	0.990806
CAGR50	$y = f(x)$	$f_{c3} = \frac{65,114}{20,268^{a/c}}$	$f_{c7} = \frac{56,139}{11,409^{a/c}}$	$f_{c28} = \frac{68,614}{10,811^{a/c}}$	$f_{c56} = \frac{87,492}{12,453^{a/c}}$
	$f_{cd} = f(a/c)$				
	$x = f(y)$	$a/c = \frac{4,176 - \ln(f_{c3})}{3,009}$	$a/c = \frac{4,028 - \ln(f_{c7})}{2,434}$	$a/c = \frac{4,228 - \ln(f_{c28})}{2,381}$	$a/c = \frac{4,472 - \ln(f_{c56})}{2,522}$
	$a/c = f(f_{cd})$				
	$R^2 =$	0.992423	0.996694	0.980797	0.997625
CAGR75	$y = f(x)$	$f_{c3} = \frac{73,606}{20,470^{a/c}}$	$f_{c7} = \frac{68,887}{12,691^{a/c}}$	$f_{c28} = \frac{80,161}{11,743^{a/c}}$	$f_{c56} = \frac{91,513}{11,694^{a/c}}$
	$f_{cd} = f(a/c)$				
	$x = f(y)$	$a/c = \frac{4,299 - \ln(f_{c3})}{3,019}$	$a/c = \frac{4,232 - \ln(f_{c7})}{2,541}$	$a/c = \frac{4,384 - \ln(f_{c28})}{2,463}$	$a/c = \frac{4,516 - \ln(f_{c56})}{2,459}$
	$a/c = f(f_{cd})$				
	$R^2 =$	0.984685	0.99572	0.989721	0.990806
CAGR100	$y = f(x)$	$f_{c3} = \frac{36,239}{12,529^{a/c}}$	$f_{c7} = \frac{47,081}{12,721^{a/c}}$	$f_{c28} = \frac{55,914}{10,295^{a/c}}$	$f_{c56} = \frac{61,427}{9,713^{a/c}}$
	$f_{cd} = f(a/c)$				
	$x = f(y)$	$a/c = \frac{3,590 - \ln(f_{c3})}{2,528}$	$a/c = \frac{3,852 - \ln(f_{c7})}{2,543}$	$a/c = \frac{4,024 - \ln(f_{c28})}{2,332}$	$a/c = \frac{4,118 - \ln(f_{c56})}{2,273}$
	$a/c = f(f_{cd})$				
	$R^2 =$	0.99944	0.99997	0.99476	0.999001

Tabela 6.15 – Equações de dosagem – teor de agregados secos (m) em função da relação água/cimento (a/c): $m = f(a/c)$ e sua correspondente inversa: $a/c = f(m)$; e equações de dosagem - teor de agregados secos (m) em função do consumo (C): $m = f(C)$ e sua correspondente inversa: $C = f(m)$.

Concretos	Equações			
	Quadrante de Lyse		Quadrante de Molinari	
CR	$y = f(x)$ $m = f(a/c)$	$m = 8,6 \cdot a/c - 0,6$	$y = f(x)$ $m = f(C)$	$m = \frac{201613}{C} - 0,73$
	$x = f(y)$ $a/c = f(m)$	$a/c = \frac{m + 0,6}{8,6}$	$x = f(y)$ $C = f(m)$	$C = \frac{1000}{(0,496 \cdot m) + 0,364}$
	$R^2 =$	0,997557	$R^2 =$	0,997149
CAGR25	$y = f(x)$ $m = f(a/c)$	$m = 8,6 \cdot a/c - 0,6$	$y = f(x)$ $m = f(C)$	$m = \frac{1976,28}{C} - 0,84$
	$x = f(y)$ $a/c = f(m)$	$a/c = \frac{m + 0,6}{8,6}$	$x = f(y)$ $C = f(m)$	$C = \frac{1000}{(0,506 \cdot m) + 0,423}$
	$R^2 =$	0,997557	$R^2 =$	0,997141
CAGR50	$y = f(x)$ $m = f(a/c)$	$m = 8,6 \cdot a/c - 0,6$	$y = f(x)$ $m = f(C)$	$m = \frac{1879,70}{C} - 0,76$
	$x = f(y)$ $a/c = f(m)$	$a/c = \frac{m + 0,6}{8,6}$	$x = f(y)$ $C = f(m)$	$C = \frac{1000}{(0,532 \cdot m) + 0,406}$
	$R^2 =$	0,997557	$R^2 =$	0,997646
CAGR75	$y = f(x)$ $m = f(a/c)$	$m = 8,6 \cdot a/c - 0,6$	$y = f(x)$ $m = f(C)$	$m = \frac{1785,71}{C} - 0,69$
	$x = f(y)$ $a/c = f(m)$	$a/c = \frac{m + 0,6}{8,6}$	$x = f(y)$ $C = f(m)$	$C = \frac{1000}{(0,560 \cdot m) + 0,389}$
	$R^2 =$	0,996245	$R^2 =$	0,997141
CAGR100	$y = f(x)$ $m = f(a/c)$	$m = 8,6 \cdot a/c - 0,6$	$y = f(x)$ $m = f(C)$	$m = \frac{1686,34}{C} - 0,53$
	$x = f(y)$ $a/c = f(m)$	$a/c = \frac{m + 0,6}{8,6}$	$x = f(y)$ $C = f(m)$	$C = \frac{1000}{(0,593 \cdot m) + 0,313}$
	$R^2 =$	0,996245	$R^2 =$	0,99649

Tabela 6.16 – Equações de dosagem – resistência à compressão (f_{cd}) em função do consumo (C): $f_{cd} = f(C)$ e sua correspondente inversa: $C = f(f_{cd})$.

Concretos	Equações				
		3 dias	7 dias	28 dias	56 dias
CR	$y = f(x)$ $f_{cd} = f(C)$	$f_{c3} = (0,074 \cdot C) - 13,508$	$f_{c7} = (0,072 \cdot C) - 10,706$	$f_{c28} = (0,075 \cdot C) - 8,864$	$f_{c56} = (0,090 \cdot C) - 10,969$
	$x = f(y)$ $C = f(f_{cd})$	$C = \frac{f_{c3} + 13,508}{0,074}$	$C = \frac{f_{c7} + 10,706}{0,072}$	$C = \frac{f_{c28} + 8,864}{0,076}$	$C = \frac{f_{c56} + 10,969}{0,090}$
	$R^2 =$	0,999045	0,985588	0,997404	0,999829
CAGR25	$y = f(x)$ $f_{cd} = f(C)$	$f_{c3} = (0,064 \cdot C) - 11,152$	$f_{c7} = (0,065 \cdot C) - 9,012$	$f_{c28} = (0,079 \cdot C) - 10,578$	$f_{c56} = (0,090 \cdot C) - 11,981$
	$x = f(y)$ $C = f(f_{cd})$	$C = \frac{f_{c3} + 11,152}{0,064}$	$C = \frac{f_{c7} + 9,012}{0,065}$	$C = \frac{f_{c28} + 10,578}{0,079}$	$C = \frac{f_{c56} + 11,981}{0,090}$
	$R^2 =$	0,994495	1	0,999111	0,999397
CAGR50	$y = f(x)$ $f_{cd} = f(C)$	$f_{c3} = (0,057 \cdot C) - 9,307$	$f_{c7} = (0,056 \cdot C) - 6,752$	$f_{c28} = (0,071 \cdot C) - 8,806$	$f_{c56} = (0,085 \cdot C) - 10,843$
	$x = f(y)$ $C = f(f_{cd})$	$C = \frac{f_{c3} + 9,307}{0,057}$	$C = \frac{f_{c7} + 6,752}{0,056}$	$C = \frac{f_{c28} + 8,806}{0,071}$	$C = \frac{f_{c56} + 10,843}{0,085}$
	$R^2 =$	0,997859	0,999941	0,99581	0,999858
CAGR75	$y = f(x)$ $f_{cd} = f(C)$	$f_{c3} = (0,064 \cdot C) - 11,152$	$f_{c7} = (0,065 \cdot C) - 9,012$	$f_{c28} = (0,079 \cdot C) - 10,578$	$f_{c56} = (0,090 \cdot C) - 11,982$
	$x = f(y)$ $C = f(f_{cd})$	$C = \frac{f_{c3} + 11,152}{0,064}$	$C = \frac{f_{c7} + 9,012}{0,065}$	$C = \frac{f_{c28} + 10,578}{0,079}$	$C = \frac{f_{c56} + 11,982}{0,090}$
	$R^2 =$	0,994495	1	0,999111	0,999397
CAGR100	$y = f(x)$ $f_{cd} = f(C)$	$f_{c3} = (0,037 \cdot C) - 4,442$	$f_{c7} = (0,048 \cdot C) - 5,681$	$f_{c28} = (0,061 \cdot C) - 6,573$	$f_{c56} = (0,067 \cdot C) - 6,578$
	$x = f(y)$ $C = f(f_{cd})$	$C = \frac{f_{c3} + 4,442}{0,037}$	$C = \frac{f_{c7} + 5,681}{0,048}$	$C = \frac{f_{c28} + 6,573}{0,061}$	$C = \frac{f_{c56} + 6,578}{0,067}$
	$R^2 =$	0,99944	0,99997	0,99476	0,999001

6.5.2. Resistência à tração por compressão diametral (f_{td})

Os diagramas de dosagem – resistência à tração por compressão diametral dos concretos CR, CAGR25, CAGR50, CAGR75 e CAGR100 são apresentados nas Figuras 6.35, 6.36, 6.37, 6.38 e 6.39.

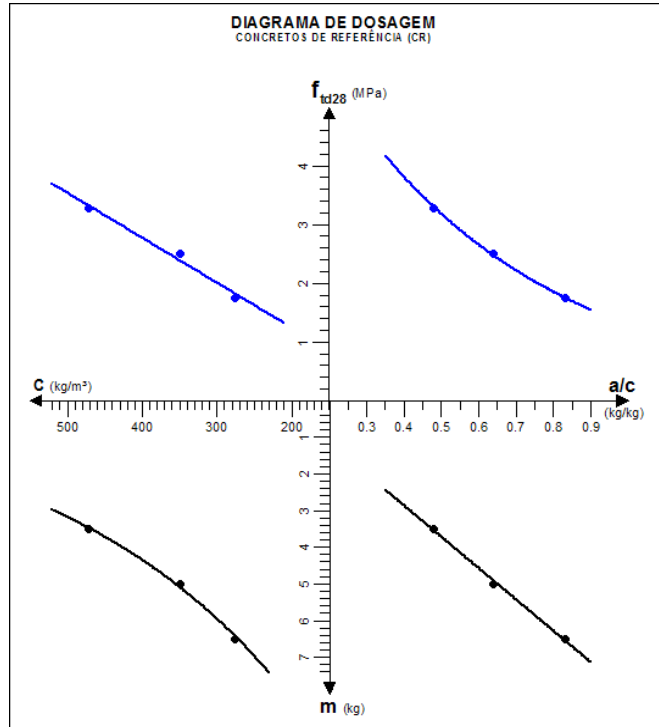


Figura 6.35 – Diagrama de dosagem dos concretos CR - resistência à tração.

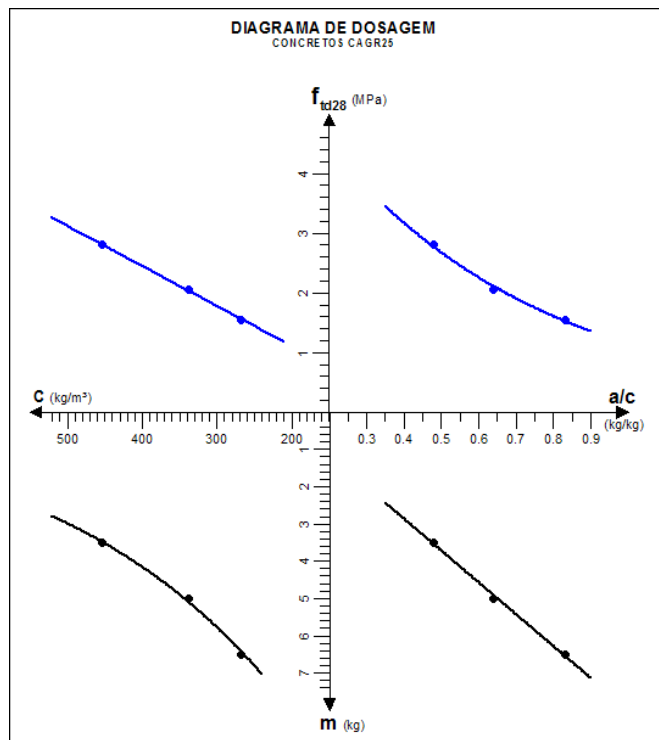


Figura 6.36 – Diagrama de dosagem dos concretos CAGR25 - resistência à tração.

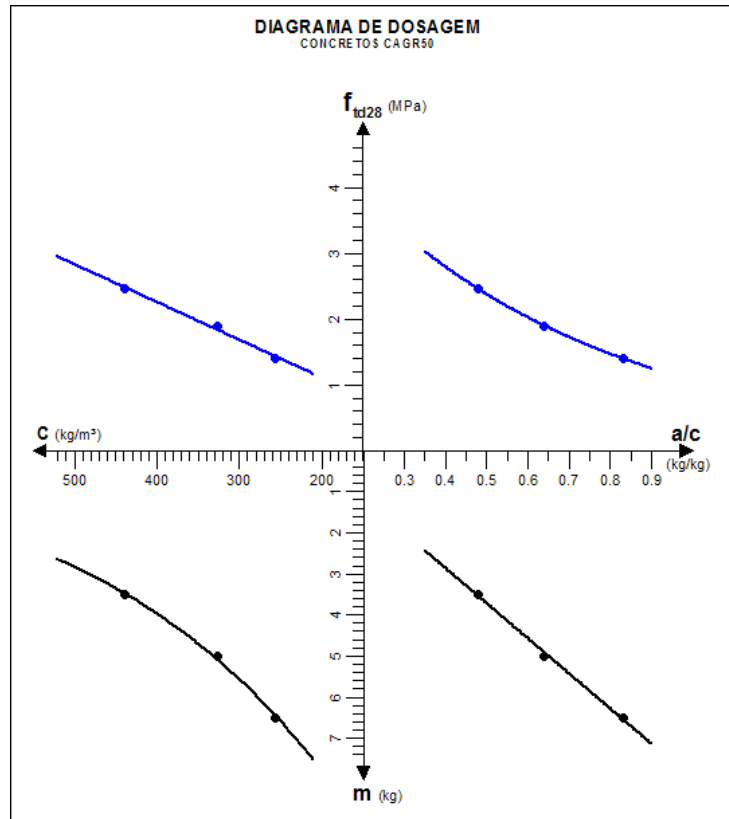


Figura 6.37 – Diagrama de dosagem dos concretos CAGR50 - resistência à tração.

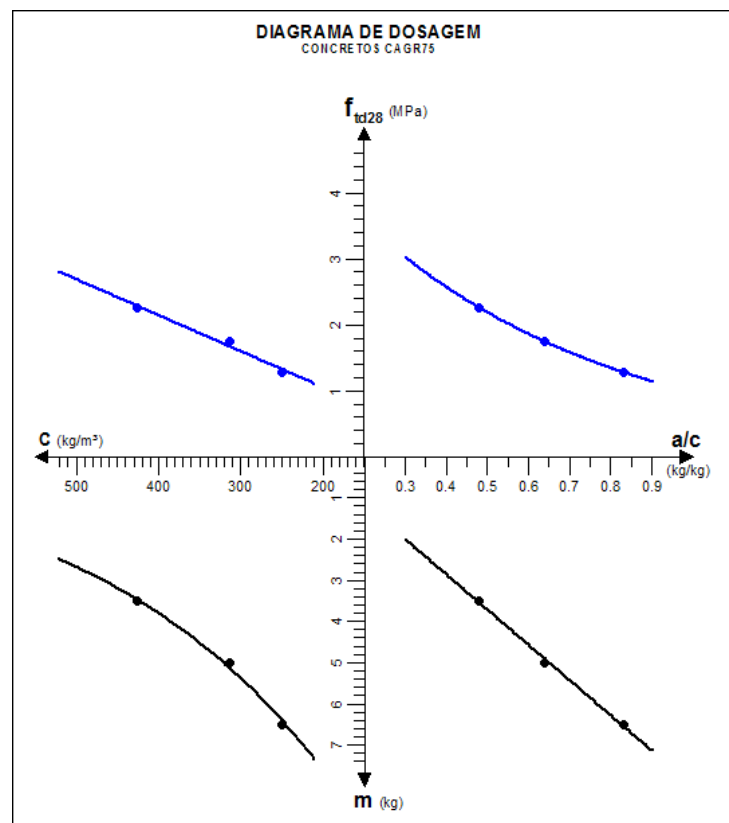


Figura 6.38 – Diagrama de dosagem dos concretos CAGR75 - resistência à tração.

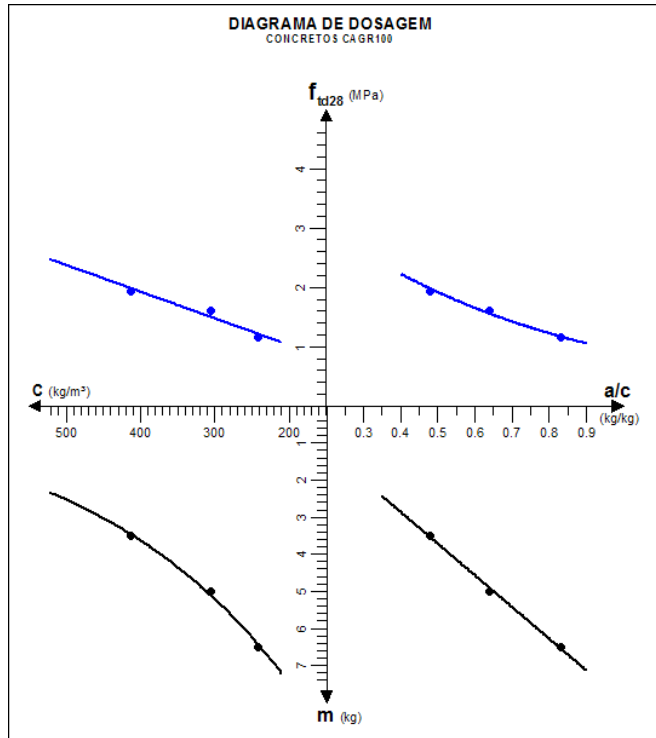


Figura 6.39 – Diagrama de dosagem dos concretos CAGR100 - resistência à tração.

As equações de dosagem dos concretos – resistências à tração por compressão diametral são apresentadas nas Tabelas 6.17, 6.18 e 6.19.

Tabela 6.17 – Equações de dosagem – resistência à tração por compressão diametral (f_{td28}) em função da relação água/cimento (a/c): $f_{td28} = f(a/c)$ e sua correspondente inversa: $a/c = f(f_{td28})$.

Concretos	Equações - Quadrante de Abrams	
CR	$y = f(x)$ $f_{td_{28}} = f(a/c)$	$f_{td_{28}} = \frac{7,850}{6,089 a/c}$
	$x = f(y)$ $a/c = f(f_{td_{28}})$	$a/c = \frac{2,061 - \ln(f_{td_{28}})}{1,806}$
	$R^2 =$	0.998107
CAGR25	$y = f(x)$ $f_{td_{28}} = f(a/c)$	$f_{td_{28}} = \frac{6,263}{5,488 a/c}$
	$x = f(y)$ $a/c = f(f_{td_{28}})$	$a/c = \frac{1,835 - \ln(f_{td_{28}})}{1,703}$
	$R^2 =$	0.995796
CAGR50	$y = f(x)$ $f_{td_{28}} = f(a/c)$	$f_{td_{28}} = \frac{5,316}{5,001 a/c}$
	$x = f(y)$ $a/c = f(f_{td_{28}})$	$a/c = \frac{1,671 - \ln(f_{td_{28}})}{1,610}$
	$R^2 =$	0.999855
CAGR75	$y = f(x)$ $f_{td_{28}} = f(a/c)$	$f_{td_{28}} = \frac{4,925}{5,074 a/c}$
	$x = f(y)$ $a/c = f(f_{td_{28}})$	$a/c = \frac{1,594 - \ln(f_{td_{28}})}{1,624}$
	$R^2 =$	0.99999
CAGR100	$y = f(x)$ $f_{td_{28}} = f(a/c)$	$f_{td_{28}} = \frac{3,943}{4,442 a/c}$
	$x = f(y)$ $a/c = f(f_{td_{28}})$	$a/c = \frac{1,372 - \ln(f_{td_{28}})}{1,491}$
	$R^2 =$	0.998394

Tabela 6.18 – Equações de dosagem – teor de agregados secos (m) em função da relação água/cimento (a/c): $m = f(a/c)$ e sua correspondente inversa: $a/c = f(m)$; e equações de dosagem – teor de agregados secos (m) em função do consumo (C): $m = f(C)$ e sua correspondente inversa: $C = f(m)$.

Concretos	Equações			
	Quadrante de Lyse		Quadrante de Molinari	
CR	$y = f(x)$ $m = f(a/c)$	$m = (8,6 \cdot a/c) - 0,6$	$y = f(x)$ $m = f(C)$	$m = \frac{2016,13}{C} - 0,73$
	$x = f(y)$ $a/c = f(m)$	$a/c = \frac{m + 0,6}{8,6}$	$x = f(y)$ $C = f(m)$	$C = \frac{1000}{(0,496 \cdot m) + 0,364}$
	$R^2 =$	0,997557	$R^2 =$	0,997149
CAGR25	$y = f(x)$ $m = f(a/c)$	$m = (8,6 \cdot a/c) - 0,6$	$y = f(x)$ $m = f(C)$	$m = \frac{2016,13}{C} - 0,73$
	$x = f(y)$ $a/c = f(m)$	$a/c = \frac{m + 0,6}{8,6}$	$x = f(y)$ $C = f(m)$	$C = \frac{1000}{(0,496 \cdot m) + 0,364}$
	$R^2 =$	0,997557	$R^2 =$	0,997141
CAGR50	$y = f(x)$ $m = f(a/c)$	$m = (8,6 \cdot a/c) - 0,6$	$y = f(x)$ $m = f(C)$	$m = \frac{2016,13}{C} - 0,73$
	$x = f(y)$ $a/c = f(m)$	$a/c = \frac{m + 0,6}{8,6}$	$x = f(y)$ $C = f(m)$	$C = \frac{1000}{(0,506 \cdot m) + 0,423}$
	$R^2 =$		$R^2 =$	0,997646
CAGR75	$y = f(x)$ $m = f(a/c)$	$m = (8,6 \cdot a/c) - 0,6$	$y = f(x)$ $m = f(C)$	$m = \frac{2016,13}{C} - 0,73$
	$x = f(y)$ $a/c = f(m)$	$a/c = \frac{m + 0,6}{8,6}$	$x = f(y)$ $C = f(m)$	$C = \frac{1000}{(0,496 \cdot m) + 0,364}$
	$R^2 =$	0,997557	$R^2 =$	0,995448
CAGR100	$y = f(x)$ $m = f(a/c)$	$m = (8,6 \cdot a/c) - 0,6$	$y = f(x)$ $m = f(C)$	$m = \frac{2016,13}{C} - 0,73$
	$x = f(y)$ $a/c = f(m)$	$a/c = \frac{m + 0,6}{8,6}$	$x = f(y)$ $C = f(m)$	$C = \frac{1000}{(0,496 \cdot m) + 0,364}$
	$R^2 =$	0,997557	$R^2 =$	0,996489

Tabela 6.19 – Equações de dosagem – resistência à tração por compressão diametral (f_{td28}) em função do consumo (C): $f_{td28} = f(C)$ e sua correspondente inversa: $C = f(f_{td28})$.

Concretos	Equações	
CR	$y = f(x)$ $ftd_{28} = f(a/c)$	$ftd_{28} = (0,0077 \cdot C) - 0,2920$
	$x = f(y)$ $a/c = f(ftd_{28})$	$C = \frac{ftd_{28} + 0,2920}{0,0077}$
	$R^2 =$	0,979141
CAGR25	$y = f(x)$ $ftd_{28} = f(a/c)$	$ftd_{28} = (0,0067 \cdot C) + 0,2344$
	$x = f(y)$ $a/c = f(ftd_{28})$	$C = \frac{ftd_{28} + 0,2344}{0,0067}$
	$R^2 =$	0,998339
CAGR50	$y = f(x)$ $ftd_{28} = f(a/c)$	$ftd_{28} = (0,0057 \cdot C) - 0,0391$
	$x = f(y)$ $a/c = f(ftd_{28})$	$C = \frac{ftd_{28} + 0,0391}{0,0057}$
	$R^2 =$	0,991427
CAGR75	$y = f(x)$ $ftd_{28} = f(a/c)$	$ftd_{28} = (0,0055 \cdot C) - 0,0404$
	$x = f(y)$ $a/c = f(ftd_{28})$	$C = \frac{ftd_{28} + 0,0404}{0,0055}$
	$R^2 =$	0,985688
CAGR100	$y = f(x)$ $ftd_{28} = f(a/c)$	$ftd_{28} = (0,0046 \cdot C) + 0,0602$
	$x = f(y)$ $a/c = f(ftd_{28})$	$C = \frac{ftd_{28} - 0,0602}{0,0046}$
	$R^2 =$	0,0034

6.5.3. Módulo de deformação – tangente inicial (E_{ci})

Os diagramas de dosagem – módulo de deformação (tangente inicial) dos concretos CR, CAGR25, CAGR50, CAGR75 e CAGR100 são apresentados nas Figuras 6.40, 6.41, 6.42, 6.43 e 6.44.

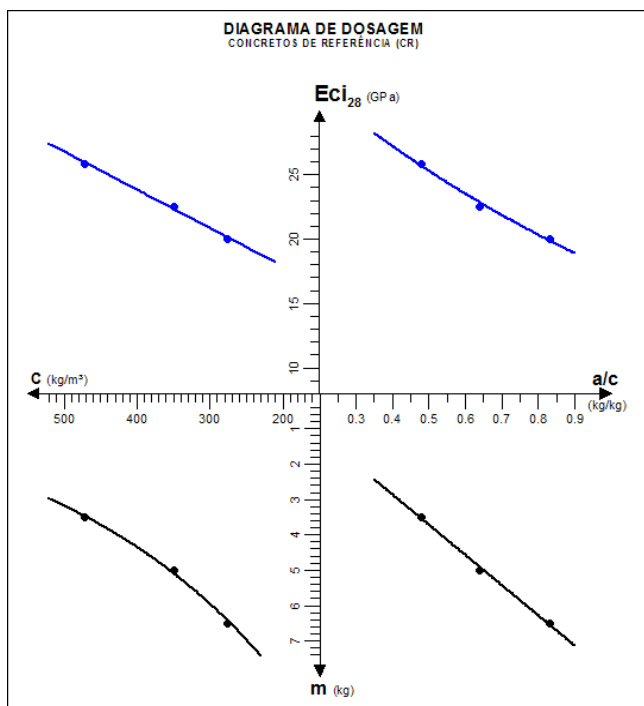


Figura 6.40 – Diagrama de dosagem para os CR – módulo de deformação.

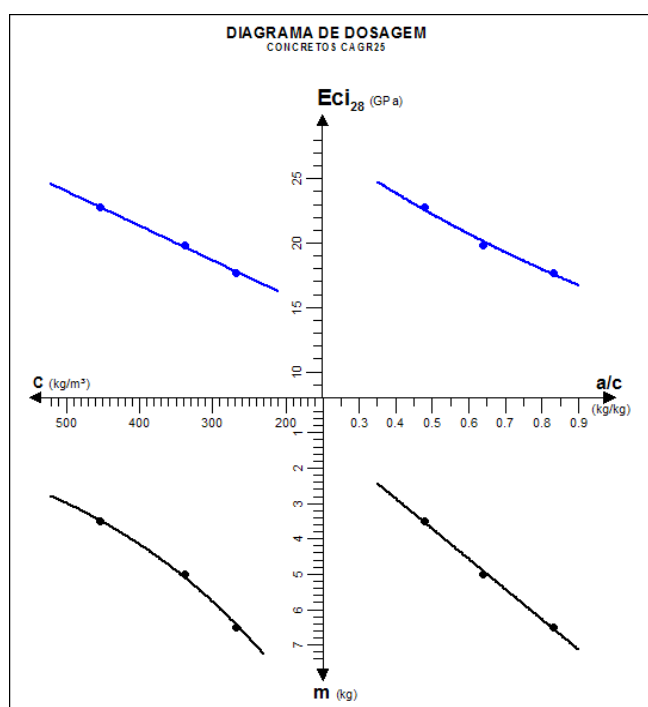


Figura 6.41 – Diagrama de dosagem para os CAGR25 – módulo de deformação.

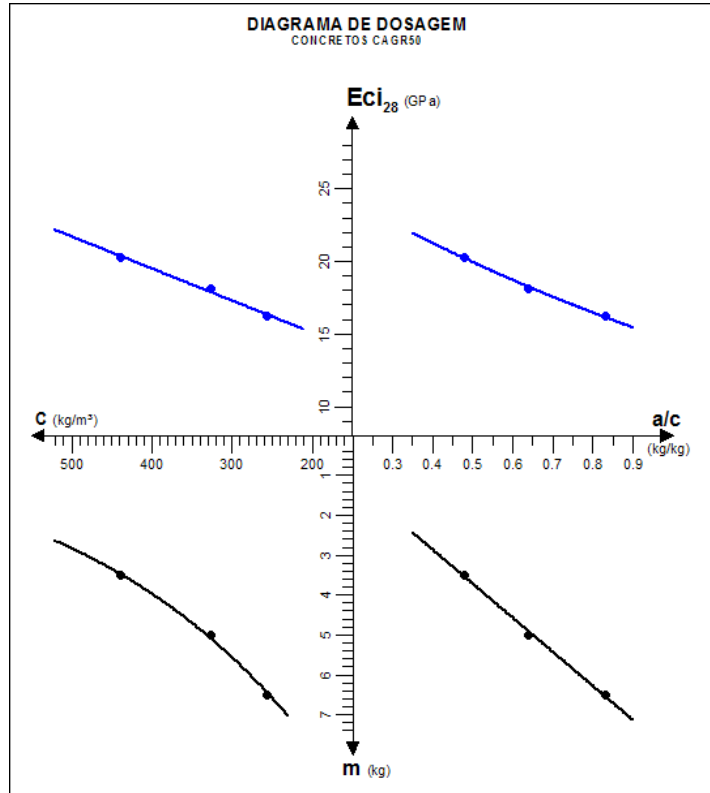


Figura 6.42 – Diagrama de dosagem para os CAGR50 – módulo de deformação.

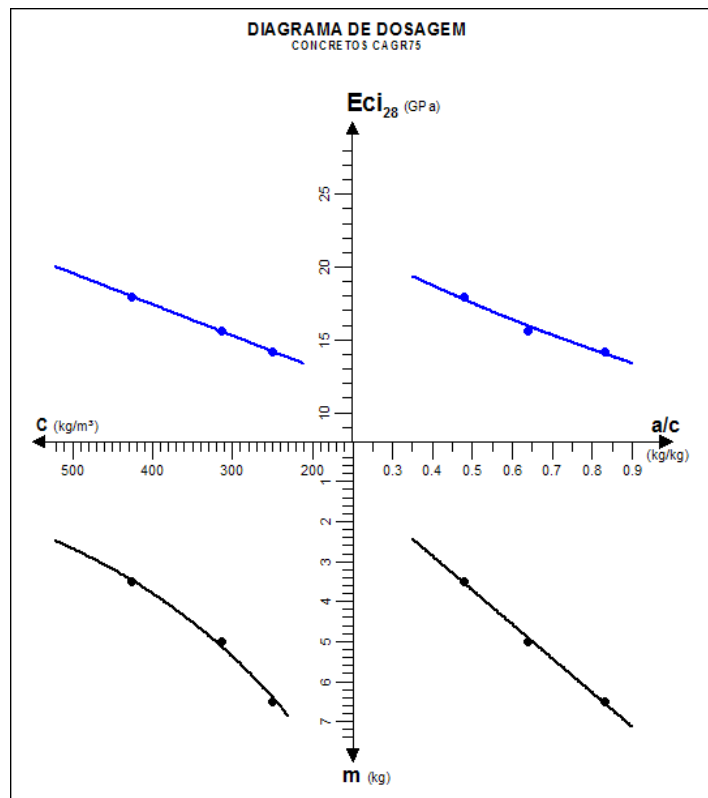


Figura 6.43 – Diagrama de dosagem para os CAGR75 – módulo de deformação.

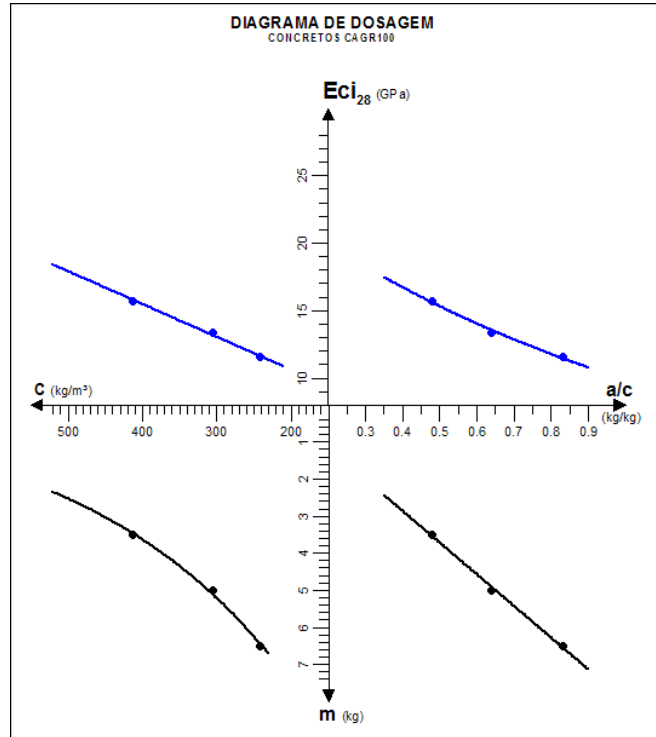


Figura 6.44 – Diagrama de dosagem para os CAGR100 – módulo de deformação

As equações de dosagem para o CAGR100 – módulo de deformação – são apresentadas nas Tabelas 6.20, 6.21 e 6.22.

Tabela 6.20 – Equações de dosagem – módulo de deformação tangente inicial (E_{ci28}) em função da relação água/cimento (a/c): $E_{ci28} = f(a/c)$ e sua correspondente inversa: $a/c = f(E_{ci28})$.

Concretos	Equações	
CR	$y = f(x)$ $E_{ci28} = f(a/c)$	$E_{ci28} = \frac{36,461}{2,078^{a/c}}$
	$x = f(y)$ $a/c = f(E_{ci28})$	$a/c = \frac{3,596 - \ln(E_{ci28})}{0,731}$
	$R^2 =$	0.989576
CAGR25	$y = f(x)$ $E_{ci28} = f(a/c)$	$E_{ci28} = \frac{31,781}{2,044^{a/c}}$
	$x = f(y)$ $a/c = f(E_{ci28})$	$a/c = \frac{3,459 - \ln(E_{ci28})}{0,715}$
	$R^2 =$	0.987549
CAGR50	$y = f(x)$ $E_{ci28} = f(a/c)$	$E_{ci28} = \frac{27,846}{1,906^{a/c}}$
	$x = f(y)$ $a/c = f(E_{ci28})$	$a/c = \frac{3,327 - \ln(E_{ci28})}{0,645}$
	$R^2 =$	0.989178
CAGR75	$y = f(x)$ $E_{ci28} = f(a/c)$	$E_{ci28} = \frac{24,487}{1,956^{a/c}}$
	$x = f(y)$ $a/c = f(E_{ci28})$	$a/c = \frac{3,198 - \ln(E_{ci28})}{0,671}$
	$R^2 =$	0.971262
CAGR100	$y = f(x)$ $E_{ci28} = f(a/c)$	$E_{ci28} = \frac{23,772}{2,411^{a/c}}$
	$x = f(y)$ $a/c = f(E_{ci28})$	$a/c = \frac{3,168 - \ln(E_{ci28})}{0,880}$
	$R^2 =$	0.992742

Tabela 6.21 – Equações de dosagem – teor de agregados secos (m) em função da relação água/cimento (a/c): $m = f(a/c)$ e suas correspondente inversa $a/c = f(m)$; e equações de dosagem – teor de agregados secos (m) em função do consumo (C): $m = f(C)$ e sua correspondente inversa: $C = f(m)$.

Concretos	Equações			
	Quadrante de Lyse		Quadrante de Molinari	
CR	$y = f(x)$ $m = f(a/c)$	$m = (8,6 \cdot a/c) - 0,6$	$y = f(x)$ $m = f(C)$	$m = \frac{2016,13}{C} - 0,73$
	$x = f(y)$ $a/c = f(m)$	$a/c = \frac{m + 0,6}{8,6}$	$x = f(y)$ $C = f(m)$	$C = \frac{1000}{(0,496 \cdot m) + 0,364}$
	$R^2 =$	0.997557	$R^2 =$	0.997149
CAGR25	$y = f(x)$ $m = f(a/c)$	$m = (8,6 \cdot a/c) - 0,6$	$y = f(x)$ $m = f(C)$	$m = \frac{2016,13}{C} - 0,73$
	$x = f(y)$ $a/c = f(m)$	$a/c = \frac{m + 0,6}{8,6}$	$x = f(y)$ $C = f(m)$	$C = \frac{1000}{(0,496 \cdot m) + 0,364}$
	$R^2 =$	0.997557	$R^2 =$	0.997141
CAGR50	$y = f(x)$ $m = f(a/c)$	$m = (8,6 \cdot a/c) - 0,6$	$y = f(x)$ $m = f(C)$	$m = \frac{2016,13}{C} - 0,73$
	$x = f(y)$ $a/c = f(m)$	$a/c = \frac{m + 0,6}{8,6}$	$x = f(y)$ $C = f(m)$	$C = \frac{1000}{(0,506 \cdot m) + 0,423}$
	$R^2 =$		$R^2 =$	0.997646
CAGR75	$y = f(x)$ $m = f(a/c)$	$m = (8,6 \cdot a/c) - 0,6$	$y = f(x)$ $m = f(C)$	$m = \frac{2016,13}{C} - 0,73$
	$x = f(y)$ $a/c = f(m)$	$a/c = \frac{m + 0,6}{8,6}$	$x = f(y)$ $C = f(m)$	$C = \frac{1000}{(0,496 \cdot m) + 0,364}$
	$R^2 =$	0.997557	$R^2 =$	0.995448
CAGR100	$y = f(x)$ $m = f(a/c)$	$m = (8,6 \cdot a/c) - 0,6$	$y = f(x)$ $m = f(C)$	$m = \frac{2016,13}{C} - 0,73$
	$x = f(y)$ $a/c = f(m)$	$a/c = \frac{m + 0,6}{8,6}$	$x = f(y)$ $C = f(m)$	$C = \frac{1000}{(0,496 \cdot m) + 0,364}$
	$R^2 =$	0.997557	$R^2 =$	0.996489

Tabela 6.22 – Equações de dosagem – módulo de deformação tangente inicial (E_{ci28}) em função do consumo (C): $E_{ci28} = f(C)$ e sua correspondente inversa: $C = f(E_{ci28})$.

Concretos	Equações	
CR	$y = f(x)$ $E_{ci28} = f(C)$	$E_{ci28} = (0,030 \cdot C) + 11,913$
	$x = f(y)$ $a/c = f(E_{ci28})$	$C = \frac{E_{ci28} - 11,913}{0,030}$
	$R^2 =$	0.99731
CAGR25	$y = f(x)$ $E_{ci28} = f(C)$	$E_{ci28} = (0,027 \cdot C) + 10,572$
	$x = f(y)$ $C = f(E_{ci28})$	$C = \frac{E_{ci28} - 10,572}{0,027}$
	$R^2 =$	0.998116
CAGR50	$y = f(x)$ $E_{ci28} = f(C)$	$E_{ci28} = (0,022 \cdot C) + 11,031$
	$x = f(y)$ $C = f(E_{ci28})$	$C = \frac{E_{ci28} - 11,031}{0,022}$
	$R^2 =$	0.93383
CAGR75	$y = f(x)$ $E_{ci28} = f(C)$	$E_{ci28} = (0,022 \cdot C) + 8,816$
	$x = f(y)$ $C = f(E_{ci28})$	$C = \frac{E_{ci28} + 8,816}{0,022}$
	$R^2 =$	0.999993
CAGR100	$y = f(x)$ $E_{ci28} = f(C)$	$E_{ci28} = (0,024 \cdot C) + 5,730$
	$x = f(y)$ $C = f(E_{ci28})$	$C = \frac{E_{ci28} - 5,730}{0,024}$
	$R^2 =$	0.995507

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas últimas décadas, aliada às condições de preservação ambiental, a reciclagem de materiais passou a ser condição de ordem mundial, assim como os conceitos de desenvolvimento sustentável passaram a fazer parte de políticas públicas, reorientando o entendimento e conduta das sociedades às novas necessidades ambientais.

Esta pesquisa, além dos objetivos técnico-científicos, visa e espera também contribuir com novos conhecimentos e incentivos aos profissionais ligados à engenharia civil e afins, sobretudo em âmbito regional, sobre as possibilidades eminentes da reciclagem de resíduos da construção predial para utilização como agregados de concreto, sob conjugação do trinômio custo-desempenho-benefício.

Os estudos realizados, sob foco especificamente técnico-científico, buscaram como premissa fundamental avaliar a influência dos agregados graúdos reciclados, beneficiados a partir dos resíduos de obra predial, de sistema construtivo convencional, em fase de execução da estrutura de concreto armado e alvenarias de tijolos cerâmicos, nas propriedades do concreto fresco e endurecido, sem uso de aditivos químicos ou adições minerais, com substituições gradativas do agregado graúdo natural por reciclado. Assim, são apresentadas as considerações a seguir.

QUANTO AO SISTEMA DE COLETA DO RCD

O sistema de coleta seletiva, realizada na obra fornecedora do RCD, mostrou-se eficiente na separação do material residuário (entulho), o que foi comprovado quanto se concluiu o ensaio de composição do AGR, o qual apontou teor de material contaminante significativamente abaixo (0,4%) do valor máximo permitido por Norma (2%).

QUANTO AO SISTEMA DE BENEFICIAMENTO DO RCD – BRITAGEM

O sistema de britagem de FURNAS-GO mostrou-se eficiente quanto ao seu sistema de peneiras, ao beneficiar o RCD para obtenção de AGR, na dimensão máxima característica de partículas igual 19 mm, denominada de pedra ou brita n.º 1. Isto foi confirmado após a realização do ensaio de determinação granulométrica no Laboratório de Materiais de Construção da UFG. Porém, identificou-se pelas curvas granulométricas do AGR, a deficiência quanti-qualitativa na distribuição de suas partículas, que, possivelmente,

pode ter sido fator de influencia negativa nas propriedades mecânicas dos concretos produzidos. Essa deficiência identificada na distribuição granulométrica do AGR adveio, provavelmente, da inadequação do processo de britagem, por conta de falta de regulagem ou calibragem adequada do britador de mandíbulas para processamento de RCD.

QUANTO AO AGREGADO GRAÚDO RECICLADO – AGR

O agregado graúdo reciclado (AGR) foi classificado como “agregado de resíduo misto – ARC”, por ter apresentado a maioria de seus fragmentos pertencentes ao Grupo 1 e Grupo 3, de acordo com a NBR 15116 (ABNT, 2004).

O AGR apresentou taxa média de absorção de água equivalente a 13,09%, após 24 horas de imersão. Verificou-se que 80% da taxa de absorção de água ocorreram logo no primeiro minuto, ou seja, 60 segundos após estado de total imersão do AGR.

Quando comparado com o AGN, o AGR apresentou menores massas específicas, tanto no estado seco quanto no estado saturado com superfície seca (SSS). Este fato pode ser justificado pela origem mineralógica e pela maior porosidade intrínseca às partículas do AGR misto.

O ensaio de desgaste do AGR por abrasão *Los Angeles* correspondeu a 52,7%, enquanto que a Norma pertinente ao agregado graúdo natural (AGN) recomenda 50% para índice máximo de desgaste. Portanto, reitera-se que não existe ainda Norma brasileira específica, referente ao ensaio de abrasão *Los Angeles* para agregados graúdos reciclados.

QUANTO ÀS PROPRIEDADES DOS CONCRETOS NO ESTADO FRESCO

Os concretos com AGR aprisionaram mais ar do que os concretos convencionais de referência (CR). O teor de ar aprisionado aumentou gradativamente, na medida em que se aumentou a taxa de substituição do AGN por AGR. Os concretos de referência, nos traços pobre, normal e rico, apresentaram média de 1,7% de teor de ar aprisionado. Analogamente, para os concretos com 100% de AGR, a média atingiu o valor de 4%.

As massas específicas dos concretos produzidos com AGR totalizaram valores menores do que os correspondentes concretos de referência. Esta condição pode ser explicada pela menor densidade dos agregados graúdos reciclados, em relação aos agregados graúdos naturais, juntamente com a condição de maiores teores de ar incorporado nos concretos com AGR. A média do valor de massa específica para os concretos com 100% de AGR, levando

em consideração os três traços produzidos (rico, normal e pobre), atingiu o equivalente a 2,035 kg/dm³, enquanto que para os concretos de referência, com 100% de AGN, a média correspondeu a 2,341 kg/dm³.

A trabalhabilidade medida pelo abatimento do tronco de cone (*slump test*) foi influenciada na proporção em que se aumentou o teor de substituição do AGN por AGR, contudo não chegou a se apresentar abaixo do limite mínimo pré-fixado/esperado de 50 mm (concreto trabalhável), mesmo para os concretos dosados com 100% de AGR. O maior valor de abatimento foi aferido para o concreto rico de referência (CR_{3,5}), que se abateu 95 mm. Dentre os três concretos com teor de substituição de 100% (100 % de AGR), dois apresentaram as mesmas e menores medidas de abatimento do tronco de cone, as quais atingiram 50 mm.

QUANTO ÀS PROPRIEDADES DOS CONCRETOS NO ESTADO ENDURECIDO

As massas específicas dos concretos decresceram, enquanto que as taxas de absorção de água e índices de vazios aumentaram, na medida em que se aumentou o teor de substituição do AGN por AGR, em todos os três traços executados. De forma geral, estes ensaios, aos 28 dias de idade, mostraram que ocorreu aumento da porosidade dos concretos, em função do acréscimo gradativo da quantidade de AGR nas dosagens, ou seja, o aumento do teor de substituição do AGN por AGR implicou no aumento da porosidade dos concretos.

Os resultados de resistência à compressão axial, em todas as idades e traços, se apresentaram inferiores para os concretos dosados com AGR, quando comparados aos correspondentes concretos de referência. A porcentagem média de ganho de resistência dos concretos de referência, de 7 para 28 dias de idade, atingiu a taxa de 24%. Enquanto que, analogamente, para os concretos dosados com 100% de AGR esta taxa correspondeu a 36%. De 28 para 56 dias de idade, a porcentagem média de ganho de resistências à compressão para os concretos de referência foi de 15,7%, enquanto que para os concretos com 100% de AGR esta taxa de ganho atingiu 14%.

A média dos resultados de resistência à compressão axial dos concretos de referência, considerada para as três proporções de dosagem estudadas, equivaleu a 19 MPa. Enquanto que, analogamente, para os concretos com 100% de AGR esta média atingiu o valor de 13,0 MPa, ou seja, aproximadamente 68% do valor médio relativo aos concretos de referência. Os concretos com 25% de teor de substituição do AGN por AGR atingiram, aproximadamente, 91% do valor médio relativo aos concretos de referência.

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral e o teor de substituição do AGN por AGR nos traços de concreto, apresentaram-se também em condições inversamente proporcionais. Na medida em que a quantidade de AGR foi aumentada, os resultados de resistência à tração diminuíram, em todas as três proporções de dosagem estudadas (traço pobre, normal e rico), aos 28 dias de idade. Os resultados de todos os concretos com AGR foram inferiores aos concretos de referência, quando comparados em grupos pertinentes a cada proporção de dosagem. A média dos resultados de resistência à tração por compressão diametral dos concretos de referência, considerada para as três proporções de dosagem estudadas, equivaleu a 2,51 MPa. Enquanto que, analogamente, para os concretos com 100% de AGR esta média atingiu o valor de 1,53 MPa, ou seja, aproximadamente 61% do valor médio relativo aos concretos de referência. Os concretos com 25% de teor de substituição do AGN por AGR atingiram, aproximadamente, 85% do valor médio relativo aos concretos de referência.

Quanto ao módulo de deformação tangente inicial, os concretos de referência apresentaram média de resultados equivalente a 22,8 GPa. Os concretos com 100% de AGR atingiram média de 13,5 GPa. Os concretos com 25% de teor de substituição do AGN por AGR apresentaram média de resultados que atingiu 20,08 GPa, o que correspondeu a, aproximadamente, 88% do valor médio encontrado para o módulo de deformação dos concretos de referência.

Em função das quedas de resultados relacionados às propriedades mecânicas dos concretos, na proporção em que se aumentou o teor de substituição do AGN por AGR, passou a ser recomendável um limite máximo de 25% de AGR nos traços, em consideração ao desempenho global do concreto, sobretudo em garantia às características relacionadas à durabilidade, as quais não foram alvos da presente pesquisa. Portanto, para teores de substituição acima de 20% do AGN por AGR nos traços, as especificações de utilização destes concretos e suas dosagens devem estar, impreterivelmente, sob responsabilidade e controle de profissionais reconhecidamente habilitados, especializados e competentes.

QUANTO A INFLUÊNCIA DA FASE CONSTRUTIVA DA OBRA CEDENTE DOS RCD, NAS CARACTERÍSTICAS DO AGR E NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

Comparando-se os resultados desta pesquisa com os estudos de Santos (2006), o qual também estudou os concretos produzidos com AGR de RCD misto, provenientes de obra com as mesmas características construtivas, porém em fase das estruturas de concreto armado

já concluída e, ainda, tendo executado os mesmos teores de substituição do AGN por AGR, pode-se afirmar que:

- a) o agregado graúdo reciclado (AGR) sofreu influência significativa em sua composição, em função da fase construtiva da obra, quando comparados os resultados desta pesquisa com os estudos de Santos (2006);
- b) as propriedades físicas e mecânicas dos concretos com AGR sofreram influências pouco significativas em função etapa construtiva da obra, quando comparados os resultados pertinentes a presente pesquisa com os correlatos resultados dos estudos de Santos (2006).

QUANTO A PROPOSTA DE MODELAGEM MATEMÁTICO-ESTATÍSTICA REALIZADA PARA ELABORAÇÃO DOS DIAGRAMAS DE DOSAGEM

As curvas e respectivas equações geradas, a partir de três proporções diferentes de dosagem e dos resultados obtidos das propriedades mecânicas avaliadas (variáveis dependentes), permitiram resultados gráficos e analíticos representativo-tendências do comportamento dos concretos, em função dos parâmetros de dosagem (variáveis independentes). A magnitude dos coeficientes de determinação (r^2), aferidos para as correlações entre as variáveis dependentes e independentes envolvidas nos estudos, apontou excelente significância das curvas de tendência representadas nos gráficos de dosagem e suas correspondentes equações, a partir das regressões matemáticas ajustadas aos dados (resultados dos ensaios) obtidos.

7.1 CONCLUSÃO

Os concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de resíduo misto, quando comparados aos concretos convencionais de referência, apresentaram resultados que apontaram reduções proporcionais nos valores correlativos que aferiram as propriedades físicas e mecânicas fundamentais do concreto, na medida em que o teor de substituição do AGN por AGR foi aumentado. Todavia, os níveis de redução encontrados para as resistências à compressão, à tração e para o módulo de deformação dos concretos com AGR, em teores de substituição de até 50%, inclusive, apontaram a eminente viabilidade de utilização dos concretos dosados com AGR, para diversos propósitos de utilização requeridos em obras de

construção civil. Todavia, para que a utilização dos concretos com agregados reciclados possa atingir elementos estruturais, estudos aprofundados sobre as condições de durabilidade necessitam ser mais consolidados no Brasil. Os concretos com teores de substituição, do AGN por AGR, acima de 50%, poderiam encontrar condições favoráveis às suas utilizações, por exemplo, em locais sem trânsito de veículos ou cargas expressivas, tais como pisos de concreto rústico, contrapisos definitivos ou provisórios, enchimentos etc.. Em suma, reitera-se que os concretos produzidos com AGR de RCD poderiam ser utilizados na construção civil, sem riscos, desde que as dosagens das misturas e o controle de qualidade destes concretos sejam realizados sob supervisão de profissionais da engenharia, comprovadamente, especializados no tema.

7.2 PROPOSTAS PARA FUTURAS PESQUISAS

- Estudos do desempenho de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de resíduos mistos (AMR), quanto à durabilidade: profundidade de carbonatação, resistência aos ataques de agentes agressivos, mecanismos de transporte interno da água etc., visando à utilização em concretos estruturais;
- Influência de materiais pulverulentos, pertinentes aos agregados graúdos reciclados de resíduos mistos, sobre as propriedades físicas e mecânicas dos concretos;
- Estudos sobre a interface da matriz da pasta de cimento e agregados (zona de transição), em concretos com agregados reciclados;
- Estudo da influência da composição granulométrica dos agregados graúdos reciclados mistos, nas propriedades físicas e mecânicas dos concretos;
- Avaliar de forma comparativa as propriedades dos concretos produzidos com agregados reciclados, a partir da utilização de várias classes e tipos de cimento disponíveis no Brasil; e
- Avaliar concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de resíduo misto, com a utilização de aditivos químicos polifuncionais (comuns).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, L. B.; ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. **Estudo da influência de agregados reciclados de concreto em substituição ao agregado graúdo natural na produção de novos concretos**. In: I CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL X ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. São Paulo, SP. 2004. 11 p. Disponível em: <<http://www.infohab.org.br>>. Acesso em: 20 ago. 2005.

ANGULO, Sérgio Cirelli et al. Aperfeiçoamento da reciclagem da fração mineral dos resíduos de construção e demolição – uso em concretos. In: **Anais**. II SUFFIB - SEMINÁRIO: O Uso da Fração Fina da Britagem. São Paulo, 2005.

ANGULO, Sérgio Cirelli et al. Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados separados por líquidos densos. In: **Anais** I Conferência Latino-americana de construção sustentável - X Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído. São Paulo, 18 a 21 jul. 2004.

ANGULO, Sérgio Cirelli; JOHN, Vanderley Moacyr. Normalização dos agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados para concretos e a variabilidade. In: **Anais**. IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Foz do Iguaçu, 2002. p. 1613-1624.

ANGULO, Sérgio Cirelli; ULSEN, Carina; KAHN, Henrique; JOHN, Vanderley M. Desenvolvimento de novos mercados para a reciclagem massiva de RCD. In: **Anais**. V Seminário de Desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil IBRACON. São Paulo, 2002.

ÂNGULO, Sérgio Cirelli. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2000. 155 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro, 2005a.

_____. **NBR NM 47**: Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003a.

_____. **NBR NM 27**: Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001a.

_____. **NBR NM 51**: Agregado graúdo – Ensaio de abrasão *Los Angeles*. Rio de Janeiro, 2001b.

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003b.

_____. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003c.

_____. **NBR 5738**: Concreto procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003d.

_____. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

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

_____. **NBR 8522**: Concreto – Determinação dos módulos de elasticidade e deformação e da curva tensão deformação. Rio de Janeiro, 2003e.

_____. **NBR 9778**: Argamassas e concretos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005b.

_____. **NBR 7222**: Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 7251**: Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

_____. **NBR 9833**: Concreto fresco - Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 10342**: Concreto – Perda de abatimento. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 15116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

BAIRAGI, N. K. et al. Behaviour of Concrete with Different Proportions of Natural and Recycled Aggregates. **Resources, Conservation and Recycling**, n.º 9, 1993. p. 109-126.

BAZUCO, R.S. **Utilização de agregados reciclados de concreto para produção de novos concretos**. Florianópolis/SC, 1999. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. p. 109.

BRITO FILHO, Jerson A. Cidades versus entulho. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2., 1999, São Paulo. **Anais**. São Paulo: Comitê Técnico do IBRACON; CT 206 – Meio Ambiente, 1999. p.56-67.

BROSSINK, B. A.; BROUWERS, H. J. H. Construction waste: quantification and source evaluation. **Journal of Construction Engineering Management**, p. 55-60. 1996.

BROWN, B. V. Alternative and Marginal Aggregate Sources. In: **Concrete For Environment Enhancement and Protection**. London, 1996, p. 471-484.

BUILDING CONTRACTORS SOCIETY OF JAPAN. Committee on Disposal and Reuse of Concrete Construction Waste. Study on recycled aggregate and recycled aggregate concrete. **Summary in Concrete Journal**, nº 7, Japan, 1978.

BUTTLER, A. M.; MACHADO JR E. F. Concretos com agregados reciclados – caracterização das propriedades mecânicas. In: **I JORNADA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL X ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO**. São Paulo, SP. 2004. 15 p. Disponível em: <<http://www.infohab.org.br>>. Acesso em: 20 ago. 2005.

BUTTLER, A. M. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto** – influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados. Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 2003. 220 p.

CARNEIRO, A. P. et al. **Reciclagem do entulho para produção de materiais de construção**. Salvador: EDUFBA, 2001. 312 p.

CARRIJO, P. M. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. São Paulo, 2005. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 129 p.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução 307 (2002)**. Gestão dos resíduos da construção civil. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res02/res30702.html>>. Acesso em: 29 abr. 2005.

COSTA, Nébel A. A. da, et al. A reciclagem de resíduo de construção e demolição: uma aplicação da análise multivariada. In: **Anais**. I Conferência Latino-americana de construção sustentável - X Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído. São Paulo, 18 a 21 jul. 2004.

COUTINHO A. S. **Fabrico e propriedades do betão**. 3.ed. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1997. 3v. v.1. 401p.

CURWELL, S.; COOPER, I. The implications of urban sustainability. **Building Research and Information**. v. 26, nº1, 1998. p. 17-28.

DBO ENGENHARIA LTDA. **Reurbanização dos Vales do Macambira e Anicuns: estudo de impacto ambiental**. Goiânia: DBO Engenharia Ltda., 2004

DIAS, João Fernando; AGOPYAN, Vahan. Determinação da absorção de agregados minerais reciclados porosos. In: **Anais**. I Conferência Latino-americana de construção sustentável - X Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído. São Paulo, 18 a 21 jul. 2004.

DOLARA, E. et al. RAC Prestressed Beams. In: DHIR, R. K. et al. **Proceedings of the International Symposium - Sustainable Constructions: Use of Recycled Concrete Aggregate**. London: Thomas Telford, 1998. p. 255-262.

GUNTHER, W.M.R. Minimização de resíduos e educação ambiental. In: **Anais**. Seminário Nacional de resíduos sólidos e limpeza pública, 7. Curitiba, 2000.

HAMASSAKI, L. T. et al. Uso do Entulho como Agregado para argamassas de Alvenaria. In: **Workshop - Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção Civil**. São Paulo, 1996. p. 107-115.

HANSEN, T. C.; NARUD, H. Strength of Recycled Concrete Made from Crushed Concrete Coarse Aggregate. **Concrete International – Design and Construction**, v. 5, n° 1. p. 79-83, 1983.

HANSEN, T.C. Recycling of demolished concrete and masonry. **RILEM Report**. 6ed. London: Chapman & Hall, 1992. 316 p.

HELENE, Paulo R. L.; TERZIAN, Paulo (1992); **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: PINI; Brasília: SENAI, 1992.

HENDRIKS, C. F. **The building cycle**. Holanda: Ed. Aeneas, 2000. 231 p.

HENDRIKS, C. H.; PIETERSEN, H. S.; FRAAY, A. F. A. Recycling of building and demolition waste – an integrated approach. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). **Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate**. London: Thomas Telford Pub., 1998b. p. 419-431.

JOHN, Vanderley M.; ANGULO, Sérgio Cirelli. Metodologia para o desenvolvimento de reciclagem de resíduos. In: ROCHA, Janaíde Cavalcante; JOHN, Vanderley Moacyr. Coletânea **Habitare ANTAC - Utilização de Resíduos na Construção Habitacional**. v. 4. Porto Alegre: Habitare, 2003. p. 9-71.

JOHN, Vanderley M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. Tese (Doutorado). São Paulo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2000. p. 102.

JOHN, Vanderley M. Panorama sobre a reciclagem de resíduos na construção civil. In: **II Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil**. v. 1. São Paulo: IBRACOM, 1999. p. 44-55.

JOHN, Vanderley M.; AGOPYAN, Vahan. Reciclagem de resíduos da construção. In: **Anais do Seminário reciclagem de resíduos sólidos domiciliares**. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente; CETESB, 2001. Disponível em:
< http://www.ambiente.sp.gov.br/residuo/ressolid_domic/docs/P20.doc> Acesso em: 20 ago. 2006.

JOHN, Vanderley M.; SILVA, Vanessa Gomes da; AGOPYAN, Vahan. Agenda 21: uma proposta de discussão para o construbusiness brasileiro. In: **Encontro Nacional e I Encontro Latino Americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis**. Canela/RS: ANTAC, 24 a 27 abr. 2001.

LATTERZA, L. M.; MACHADO JR., E. F. Concreto com agregado graúdo reciclado: propriedades no estado fresco e endurecido e aplicações em pré-moldados leves. In: **Cadernos de Engenharia de Estruturas**. n. 21. São Carlos, 2003, p. 27-58. Disponível em:
<http://www.set.eesc.usp.br/cadernos/pdf/cee21_2.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2005.

LATTERZA, L. M. **Concreto com agregado graúdo proveniente da reciclagem de resíduos de construção e demolição. Um novo material para fabricação de painéis leves de vedação.** São Carlos, 1997. Dissertação (Mestrado). Departamento de Estruturas, Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

LAURITZEN, E. K. The global challenge of recycled concrete. In: DHIR; HENDERSON; LIMBACHIYA. **Use of recycled concrete aggregate.** Londres: Ed. Tomas Telford, 1998, p. 506-519.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** Porto Alegre/RS. Tese (doutorado). Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2001. 290 p. Disponível em: <<http://www.infohab.org.br>>. Acesso em 29 abr. 2005.

LEVY, Salomon M.; HELENE, Paulo R. L. **Evolução histórica da utilização do concreto como material de construção.** São Paulo: EPUSP, 2002. (Boletim técnico da Escola politécnica da USP, BT/PCC/318).

LEVY, Salomon M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria.** São Paulo, 2001. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

LEVY, Salomon M. **Reciclagem do entulho da construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concreto.** São Paulo. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 1997.

LIMA, José Antonio Ribeiro de. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos.** São Carlos, 1999. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. p. 222.

MANSUR, M. A.; et al. Crushed bricks as coarse aggregate for concrete. **ACI Materials Journal**, v. 96, n. 04, p. 478-489, 1999.

MAULTZSCH, M.; MELLMANN, G. Properties of large scale processed building rubble with respect to the reuse as aggregate in concrete. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). **Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate.** London: Thomas Telford Pub., 1998. p. 99-107.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: Pini, 1994.

MÜELLER, A.; WINKLER, A. Characteristics of processed concrete rubble. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). **Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate.** London: Thomas Telford Pub., 1998. p. 109-119.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** Tradução Eng. Salvador E. Giammusso. 2 ed. São Paulo: Pini, 1997.

PINTO, T. P. Gestão dos resíduos de construção e demolição em áreas urbanas – da ineficácia a um modelo de gestão sustentável. In: CASSA, José Clodoaldo Silva; CARNEIRO, Alex Pires; BRUM, Irineu Antônio Schadach de. (org.). **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção**. Salvador: EDUFBA; CAIXA, 2001. p. 76-113.

PINTO, T. P., Reciclagem no canteiro de obras - responsabilidade ambiental e redução de custos. Artigo técnico - Revista de Tecnologia da Construção. **Téchne**. n. 49. São Paulo: PINI nov./dez., 2000.

PINTO, T.P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. São Paulo, 1999. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 189p.

PINTO, Tarcísio de Paula. Resultados da gestão diferenciada. **Téchne**, São Paulo, n.31, p.1-34, nov./dez., 1997.

PREFEITURA DE GOIÂNIA; UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA (coord.). **Plano integrado de gerenciamento de resíduos sólidos da indústria da construção de Goiânia: diagnóstico preliminar e planejamento**. Brasília, 2004. Relatório. Mimeografado.

QUEBAUD, M. **Caracterisation des granulats recycles etude de la composition et du comportement de betons incluant ces granulats**. França, 1996. 247p. Tese (Doutorado) – Universidade d’Artois.

SANTOS, Deusair Rodrigues dos. Propriedades do concreto produzido com agregado graúdo reciclado de resíduos da etapa de produção de alvenarias. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2006.

VAN DER ZWAN. J. T. H. Application of waste materials a success now, a success in the future. In: GOUMANS, van der; SLOOT, Aalbers. **Waste Materials in Construction** London: Ed. Elsevier, 1991. p. 869-888.

ZORDAN, S. E. **Entulho da indústria da construção civil**. São Paulo, 2000. Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/entulho_ind_ccil.htm>. Acesso em: 31 mar. 2005.

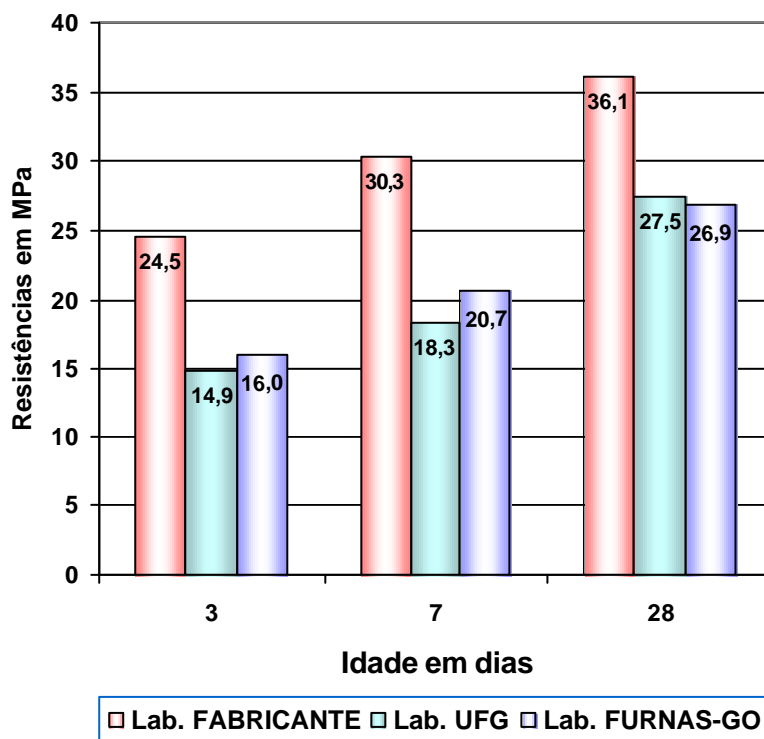
ZORDAN, S. E. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto**. Campinas/SP. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual de Campinas. 1997. 156 p. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/dissertação%20szordan.pdf>>. Acesso em: 31 mar. 2005.

ANEXO A

ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CIMENTO PORTLAND CP II F-32

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CIMENTO PORTLAND (CP II F – 32)

Foram realizados 3 (três) ensaios de determinação da resistência à compressão do cimento Portland (CP II F – 32) utilizado para a produção dos concretos da presente pesquisa. Um dos ensaios foi realizado pelo Laboratório de Materiais da Universidade Federal de Goiás. Um outro, pelo Laboratório de Concreto de FURNAS-GO. Os resultados do terceiro ensaio foram fornecidos pelo fabricante, por solicitação desta pesquisa. Segundo a empresa fabricante do cimento, os resultados fornecidos ao pesquisador, referentes ao referido lote de cimento, originaram do ensaio realizado em Laboratório da própria empresa (fábrica de cimento). Todo o cimento utilizado nesta pesquisa foi proveniente de um mesmo lote de fabricação, adquirido dois dias após sua data de fabricação, conforme constava em suas embalagens (sacos de 50 kg). Utilizou-se para os ensaios da UFG e de FURNAS-GO, a NBR 7215 (ABNT, 1996) e demais prescrições normativas complementares. O histograma mostra os resultados das resistências à compressão do cimento Portland, utilizado nesta pesquisa, aos 3, 7 e 28 dias de idade, relativos aos dois ensaios executados e comparados aos resultados fornecidos pelo fabricante do cimento.



Resistências à compressão do cimento Portland CP II F – 32 , aos 3, 7 e 28 dias.

**Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão
NBR 7215 (ABNT, 1996) e demais prescrições normativas pertinentes**

Ensaio Nº 01 - Universidade Federal de Goiás - Laboratório de Materiais

Interessado: Mestrado - CMEC - Aluno: Wesley C. Nunes

Tipo de cimento: CP II F-32

Data do início do ensaio: 09 de janeiro de 2007

Idade		3 dias
Corpo-de-prova cilíndrico (50 mm X 100 mm)	Carga (kgf)	Resistência à compressão (MPa)
CP 1	3000	15,0
CP 2	2950	14,7
CP 3	3100	15,5
CP 4	2900	14,5
Média	2988	14,9
Idade		7 dias
Corpo-de-prova cilíndrico (50 mm X 100 mm)	Carga (kgf)	Resistência à compressão (MPa)
CP 1	3650	18,2
CP 2	3550	17,7
CP 3	3750	18,7
CP 4	3700	18,5
Média	3663	18,3
Idade		28 dias
Corpo-de-prova cilíndrico (50 mm X 100 mm)	Carga (kgf)	Resistência à compressão (MPa)
CP 1	5500	27,5
CP 2	5650	28,2
CP 3	5400	27,0
CP 4	5550	27,7
Média	5525	27,6

Ensaio Nº 02 - FURNAS-GO - Laboratório de Concreto

Nº da amostra: 1.0217.2007

Nº programa: 2173

Tipo de cimento: CP II F-32

Data do início do ensaio: 05 de fevereiro de 2007

Idade		3 dias
Corpo-de-prova cilíndrico (50 mm X 100 mm)	Carga (kgf)	Resistência à compressão (MPa)
CP 1	3104	15,5
CP 2	3314	16,6
CP 3	3219	16,1
CP 4	3209	16,0
Média	3212	16,0
Idade		7 dias
Corpo-de-prova cilíndrico (50 mm X 100 mm)	Carga (kgf)	Resistência à compressão (MPa)
CP 1	4192	20,9
CP 2	4102	20,5
CP 3	4147	20,7
CP 4	4118	20,6
Média	4140	20,7
Idade		28 dias
Corpo-de-prova cilíndrico (50 mm X 100 mm)	Carga (kgf)	Resistência à compressão (MPa)
CP 1	5259	26,3
CP 2	5513	27,5
CP 3	5464	27,3
CP 4	5268	26,3
Média	5376	26,9



FURNAS
CENTRAIS ELÉTRICAS S.A.

Sumário dos ensaios realizados pelo Laboratório Físico

Nº amostra: 1.0217.2007		Nº programa: 2173	
Material: CIMENTO		Tipo: CP II F-32	
PROPRIEDADES DETERMINADAS		Valores encontrados	Limites
Análise Física			
Resistência à Compressão (MPa)	3 dias	16,1	≥ 10
	7 dias	20,7	≥ 20
	28 dias	26,9	≥ 32 e ≤ 49
Observações:			

ANEXO B

DEMAIS RESULTADOS LABORATORIAIS DA PARTE EXPERIMENTAL



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
 ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
 LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÕES



PESQUISA: Mestrado - CMEC - Wesley Carlos Nunes

MATERIAL: Agregado graúdo de origem residuária de construção (AGR de RCD)

PROCEDÊNCIA: Resíduo Sólido de Construção (RCD)

PROPÓSITO: Produção de concretos

ENSAIO: Determinação da Abrasão "Los Angeles" - NBR NM 51 : 2001

Local/Data: Goiânia / 05 de novembro de 2006.

- 1) Formação da amostra inicial: material passante na peneira de 19,0 mm;
 retido na peneira de 12,7 mm = 2.500,0 g; passante na peneira de 12,5 mm;
 retido na peneira de 9,5 mm = 2.500,0 g; total da massa = 5.000,0 g

Massa em gramas (g) retida nas peneiras, após ensaio						
# 12,5 mm	# 9,5 mm	# 6,3 mm	# 4,75 mm	# 2,36 mm	# 1,7 mm	Total acum.
464,0	381,3	420,6	251,3	634,3	235,1	2.386,6

CÁLCULOS / RESULTADO

$$A_n = \frac{m_n - m'_n}{m_n} \times 100$$

Onde:

A_n = abrasão "Los Angeles" da graduação n, com aproximação de 1%;

n = graduação (A, B, C, D, E, F ou G) escolhida para o ensaio;

m_n = massa total da amostra seca, colocada na máquina;

m'_n = massa retida acumulada da amostra até a peneira 1,7 mm

Graduação adotada: B

Carga Abrasiva: 11 esferas (massa total: 4.584,0 ± 25 g)

$$m_n = 5.000,0 \text{ g}$$

$$m'_n = 2.386,6 \text{ g}$$

$$A_B = \frac{5.000,0 - 2.386,6}{5.000,0} \times 100$$

$A_B = 52,27\%$



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
 ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
 LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÕES



PESQUISA: Mestrado - CMEC - Wesley Carlos Nunes

MATERIAL: Brita nº 1 de micaxisto (AGN)

PROCEDÊNCIA: Pedreira Araguaia (Goiânia-GO)

PROPÓSITO: Utilização em concretos

ENSAIO: Determinação da Abrasão "Los Angeles" - NBR NM 51 : 2001

Local / data: Goiânia / 05 de novembro de 2006.

- 1) Formação da amostra inicial: material passante na peneira de 19,0 mm;
 retido na peneira de 12,5 mm = 2.500,0 g; passante na peneira de 12,5 mm;
 retido na peneira de 9,5 mm = 2.500,0 g; total da massa = 5.000,0 g

Massa em gramas (g) retida nas peneiras, após ensaio						
# 12,5 mm	# 9,5 mm	# 6,3 mm	# 4,75 mm	# 2,36 mm	# 1,7 mm	Total acum.
370,4	593,8	459,2	915,8	812,7	288,3	3.440,2

CÁLCULOS / RESULTADO

$$A_n = \frac{m_n - m'_n}{m_n} \times 100$$

Onde:

A_n = abrasão "Los Angeles" da graduação n, com aproximação de 1%;

n = graduação (A, B, C, D, E, F ou G) escolhida para o ensaio;

m_n = massa total da amostra seca, colocada na máquina;

m'_n = massa retida acumulada da amostra até a peneira 1,7 mm

Graduação adotada: B

Carga Abrasiva: 11 esferas (massa total: 4.584,0 ± 25 g)

$$m_n = 5.000,0 \text{ g}$$

$$m'_n = 3.440,2 \text{ g}$$

$$A_B = \frac{5.000,0 - 3.440,2}{5.000,0} \times 100$$

$A_B = 31,20\%$



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
 ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
 LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÕES



PESQUISA: Mestrado - CMEC - Wesley Carlos Nunes

MATERIAL: Concretos convencionais (agregados naturais) e concretos com agregados graúdos reciclados (AGR), em estado endurecido

CORPO DE PROVA: Cilíndrico 20 cm X 10 cm (diâmetro)

IDADE: 28 dias

ENSAIO: Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica - NBR 9778 (ABNT, 2005)

Local / período: Goiânia / dezembro de 2006.

1- Cálculo da absorção de água (A), em porcentagem:

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

m_{sat} = massa da amostra saturada em água após imersão e fervura

m_s = massa da amostra seca em estufa

2- Cálculo do índice de vazios (Iv), em porcentagem:

$$Iv = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100$$

3- Cálculo da massa específica da amostra seca (ρ_s):

$$r_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i}$$

4- Cálculo da massa específica da amostra saturada (ρ_{sat}):

$$r_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i}$$

5- Cálculo da massa específica real (ρ_R)

$$r_R = \frac{m_s}{m_s - m_i}$$

NBR 9778 (ABNT, 2005) - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica de concretos no estado endurecido

Concreto Rico (1 : 3,5)	Ident. do CP	"m" sat. $m_{sat}(g)$	"m" seca $m_s(g)$	"m" imersa $m_i(g)$	Absorção A (%)	Absorção média (%)	I. Vazios $I_v(%)$	I. Vazios médios (%)	Massa específica real (kg/dm ³)	Massa especif. real média (kg/dm ³)
CR _{3,5}	CP1	3.754,20	3.505,20	2.181,40	7,10	7,32	15,83	16,24	2,65	2,649
	CP2	3.722,00	3.461,30	2.155,50	7,53		16,64		2,65	
CAGR25 _{3,5}	CP1	3.606,20	3.300,20	2.033,50	9,27	9,25	19,46	19,41	2,61	2,605
	CP2	3.587,90	3.284,90	2.023,40	9,22		19,37		2,60	
CAGR50 _{3,5}	CP1	3.485,50	3.141,00	1.915,40	10,97	11,10	21,94	22,16	2,56	2,564
	CP2	3.480,90	3.129,40	1.909,80	11,23		22,37		2,57	
CAGR75 _{3,5}	CP1	3.401,20	3.009,20	1.817,20	13,03	12,99	24,75	24,60	2,52	2,512
	CP2	3.353,50	2.969,00	1.781,00	12,95		24,45		2,50	
CAGR100 _{3,5}	CP1	3.252,10	2.822,80	1.686,60	15,21	15,02	27,42	27,10	2,48	2,475
	CP2	3.275,20	2.852,20	1.695,20	14,83		26,77		2,47	

NBR 9778 (ABNT, 2005) - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica de concretos no estado endurecido

Concreto Normal (1 : 5,0)	Ident. do CP	"m" sat. $m_{sat}(g)$	"m" seca $m_s(g)$	"m" imersa $m_i(g)$	Absorção A (%)	Absorção média (%)	I. Vazios $I_v(%)$	I. Vazios médios (%)	Massa específica real (kg/dm ³)	Massa especif. real média (kg/dm ³)
CR _{5,0}	CP1	3.711,2	3.441,8	2.148,4	7,83	7,82	17,24	17,22	2,66	2,659
	CP2	3.704,9	3.436,2	2.142,9	7,82		17,20		2,66	
CAGR25 _{5,0}	CP1	3.541,0	3.230,2	1.985,6	9,62	9,62	19,98	20,05	2,60	2,605
	CP2	3.540,5	3.229,6	1.994,6	9,63		20,11		2,62	
CAGR50 _{5,0}	CP1	3.455,2	3.101,1	1.894,7	11,42	11,44	22,69	22,74	2,57	2,572
	CP2	3.449,1	3.094,3	1.891,6	11,47		22,78		2,57	
CAGR75 _{5,0}	CP1	3.301,3	2.913,9	1.760,8	13,29	13,42	25,15	25,24	2,53	2,515
	CP2	3.313,7	2.918,2	1.752,6	13,55		25,33		2,50	
CAGR100 _{5,0}	CP1	3.265,4	2.831,2	1.680,4	15,34	15,36	27,39	27,46	2,46	2,465
	CP2	3.270,3	2.834,5	1.687,0	15,37		27,52		2,47	

NBR 9778 (ABNT, 2005) - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica de concretos no estado endurecido

Concreto Pobre (1 : 6,5)	Ident. do CP	"m" sat. $m_{sat}(g)$	"m" seca $m_s(g)$	"m" imersa $m_i(g)$	Absorção A (%)	Absorção média (%)	I. Vazios $I_v(%)$	I. Vazios médios (%)	Massa específica real (kg/dm ³)	Massa especif. real média (kg/dm ³)
CR _{6,5}	CP1	3.666,9	3.392,9	2.112,9	8,08	8,22	17,63	17,97	2,65	2,665
	CP2	3.690,0	3.405,2	2.134,1	8,36		18,30		2,68	
CAGR25 _{6,5}	CP1	3.525,1	3.203,2	1.974,5	10,05	9,80	20,76	20,37	2,61	2,610
	CP2	3.577,2	3.265,3	2.015,9	9,55		19,98		2,61	
CAGR50 _{6,5}	CP1	3.435,4	3.068,7	1.879,7	11,95	11,87	23,57	23,46	2,58	2,582
	CP2	3.430,4	3.068,6	1.880,2	11,79		23,34		2,58	
CAGR75 _{6,5}	CP1	3.321,1	2.902,6	1.760,8	14,42	14,29	26,82	26,66	2,54	2,545
	CP2	3.328,8	2.916,1	1.771,4	14,15		26,50		2,55	
CAGR100 _{6,5}	CP1	3.233,3	2.795,1	1.672,8	15,68	15,69	28,08	28,03	2,49	2,482
	CP2	3.228,3	2.790,3	1.662,6	15,70		27,97		2,47	



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO



Local e data Goiânia, dezembro de 2006

ENSAIO: Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação
(tangente inicial)
NBR 8522 (ABNT, 2003)

PESQUISA: Mestrado - CMEC - Wesley Carlos Nunes

Concreto: CR_{6,5} (pobre)

Idade: 28 dias

Corpo-de-prova (CP): Cilíndrico (20 cm X 10 cm)

RESULTADOS DE RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO

C. P. Nº	Carga de Ruptura (kgf) Pré-verificada	Diâmetro da seção transversal do corpo-de-prova (mm)	Seção (mm ²)	Resistência (MPa)
001	9.100	100	7853,98	11,59
002	9.300	100	7853,98	11,84
Média	9200	100	7853,98	11,71

C.P. Nº 01	Carga (kgf)	400	2.800
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	3,57
	L1	0,000050	0,000220
	L2	0,000030	0,000180
	Def. médias CP 01	0,000040	0,000200
C.P. Nº 02	Carga (kgf)	400	2.800
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	3,57
	L1	0,000060	0,000270
	L2	0,000080	0,000170
	Def. médias CP 02	0,000070	0,000220
C.P. Nº 03	Carga (kgf)	400	2.800
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	3,57
	L1	0,000100	0,000300
	L2	0,000020	0,000120
	Def. médias CP 03	0,000060	0,000210

C. P. (Nº)	Carga de Ruptura (kgf)	Diâmetro (mm)	Seção (mm ²)	Resistência (MPa)
01	9000	100	7854,0	11,46
02	9200	100	7854,0	11,71
03	9100	100	7854,0	11,59

Módulo de Elasticidade (GPa)	C.P. 01	C.P. 02	C. P. 03
		19,16	20,43

Módulo de Elasticidade Médio (GPa):	20,01
--	--------------

Observações:

1 - Tensão maior igual a 0,3 x fc (MPa); tensão básica igual a 0,5 MPa;



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO



Local e data Goiânia, dezembro de 2006

ENSAIO: Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação
(tangente inicial)
NBR 8522 (ABNT, 2003)

PESQUISA: Mestrado - CMEC - Wesley Carlos Nunes

Concreto: CAGR25_{6,5} (pobre)

Idade: 28 dias

Corpo-de-prova (CP): Cilíndrico (20 cm X 10 cm)

RESULTADOS DE RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO

C. P. Nº	Carga de Ruptura (kgf)	Diâmetro da seção transversal do corpo-de-prova (mm)	Seção (mm ²)	Resistência (MPa)
001	8200	100	7853,98	10,44
002	8400	100	7853,98	10,70
Média	8300	100	7853,98	10,57

C.P. Nº 01	Carga (kgf)	400	2.500
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	3,18
	L1	0,000130	0,000290
	L2	0,000160	0,000300
	Def. médias CP 01	0,000145	0,000295
C.P. Nº 02	Carga (kgf)	400	2.500
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	3,18
	L1	0,000040	0,000200
	L2	0,000030	0,000170
	Def. médias CP 02	0,000035	0,000185
C.P. Nº 03	Carga (kgf)	400	2.500
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	3,18
	L1	0,000050	0,000180
	L2	0,000020	0,000200
	Def. médias CP 03	0,000035	0,000190

C. P. (Nº)	Carga de Ruptura (kgf)	Diâmetro (mm)	Seção (mm ²)	Resistência (MPa)
01	8100	100	7854,0	10,31
02	8200	100	7854,0	10,44
03	8100	100	7854,0	10,31

Módulo de Elasticidade (GPa)	C.P. 01	C.P. 02	C. P. 03
	17,89	17,89	17,31

Módulo de Elasticidade Médio (GPa):	17,69
--	--------------

Observações:

1 - Tensão maior igual a 0,3 x fc (MPa); tensão básica igual a 0,5 MPa;



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO



Local e data Goiânia, dezembro de 2006

ENSAIO: Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação
(tangente inicial)
NBR 8522 (ABNT, 2003)

PESQUISA: Mestrado - CMEC - Wesley Carlos Nunes

Concreto: CAGR50_{6,5} (pobre)

Idade: 28 dias

Corpo-de-prova (CP): Cilíndrico (20 cm X 10 cm)

RESULTADOS DE RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO

C. P. Nº	Carga de Ruptura (kgf)	Diâmetro da seção transversal do corpo-de-prova (mm)	Seção (mm ²)	Resistência (MPa)
001	7900	100	7853,98	10,06
002	7700	100	7853,98	9,80
Média	7800	100	7853,98	9,93

C.P. Nº 01	Carga (kgf)	400	2.300
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	2,93
	L1	0,000080	0,000280
	L2	0,000050	0,000150
	Def. médias CP 01	0,000065	0,000215
C.P. Nº 02	Carga (kgf)	400	2.300
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	2,93
	L1	0,000060	0,000220
	L2	0,000040	0,000170
	Def. médias CP 02	0,000050	0,000195
C.P. Nº 03	Carga (kgf)	400	2300
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	2,93
	L1	0,000050	0,000170
	L2	0,000080	0,000270
	Def. médias CP 03	0,000065	0,000220

C. P. (Nº)	Carga de Ruptura (kgf)	Diâmetro (mm)	Seção (mm ²)	Resistência (MPa)
01	7500	100	7854,0	9,55
02	7400	100	7854,0	9,42
03	7700	100	7854,0	9,80

Módulo de Elasticidade (GPa)	C.P. 01	C.P. 02	C. P. 03
		16,19	16,75

Módulo de Elasticidade Médio (GPa):	16,20
--	--------------

Observações:

1 - Tensão maior igual a 0,3 x fc (MPa); tensão básica igual a 0,5 MPa;



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO



Local e data Goiânia, dezembro de 2006

ENSAIO: Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação
(tangente inicial)
NBR 8522 (ABNT, 2003)

PESQUISA: Mestrado - CMEC - Wesley Carlos Nunes

Concreto: CAGR75_{6,5} (pobre)

Idade: 28 dias

Corpo-de-prova (CP): Cilíndrico (20 cm X 10 cm)

RESULTADOS DE RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO

C. P. Nº	Carga de Ruptura (kgf)	Diâmetro da seção transversal do corpo-de-prova (mm)	Seção (mm ²)	Resistência (MPa)
001	7000	100	7853,98	8,91
002	7300	100	7853,98	9,29
Média	7150	100	7853,98	9,10

C.P. Nº 01	Carga (kgf)	400	2.100
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	2,67
	L1	0,000030	0,000170
	L2	0,000080	0,000240
	Def. médias CP 01	0,000055	0,000205
C.P. Nº 02	Carga (kgf)	400	2.100
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	2,67
	L1	0,000050	0,000200
	L2	0,000040	0,000200
	Def. médias CP 02	0,000045	0,000200
C.P. Nº 03	Carga (kgf)	400	2100
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	2,67
	L1	0,000100	0,000260
	L2	0,000040	0,000190
	Def. médias CP 03	0,000070	0,000225

C. P. (Nº)	Carga de Ruptura (kgf)	Diâmetro (mm)	Seção (mm ²)	Resistência (MPa)
01	6900	100	7854,0	8,79
02	6500	100	7854,0	8,28
03	6700	100	7854,0	8,53

Módulo de Elasticidade (GPa)	C.P. 01	C.P. 02	C. P. 03
		14,49	14,02

Módulo de Elasticidade Médio (GPa):	14,18
--	--------------

Observações:

1 - Tensão maior igual a 0,3 x fc (MPa); tensão básica igual a 0,5 MPa;



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO



Local e data Goiânia, dezembro de 2006

ENSAIO: Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação
(tangente inicial)
NBR 8522 (ABNT, 2003)

PESQUISA: Mestrado - CMEC - Wesley Carlos Nunes

Concreto: CAGR100_{6,5} (pobre)

Idade: 28 dias

Corpo-de-prova (CP): Cilíndrico (20 cm X 10 cm)

RESULTADOS DE RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO

C. P. Nº	Carga de Ruptura (kgf)	Diâmetro da seção transversal do corpo-de-prova (mm)	Seção (mm ²)	Resistência (MPa)
001	6600	100	7853,98	8,40
002	6500	100	7853,98	8,28
Média	6550	100	7853,98	8,34

C.P. Nº 01	Carga (kgf)	400	2000,0
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	2,55
	L1	0,000080	0,000350
	L2	0,000040	0,000160
	Def. médias CP 01	0,000060	0,000255
C.P. Nº 02	Carga (kgf)	400	2000
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	2,55
	L1	0,000080	0,000270
	L2	0,000040	0,000200
	Def. médias CP 02	0,000060	0,000235
C.P. Nº 03	Carga (kgf)	400	2000,0
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	2,55
	L1	0,000020	0,000230
	L2	0,000090	0,000210
	Def. médias CP 03	0,000055	0,000220

C. P. (Nº)	Carga de Ruptura (kgf)	Diâmetro (mm)	Seção (mm ²)	Resistência (MPa)
01	6500	100	7854,0	8,28
02	6700	100	7854,0	8,53
03	6400	100	7854,0	8,15

Módulo de Elasticidade (GPa)	C.P. 01	C.P. 02	C. P. 03
	10,49	11,69	12,40

Módulo de Elasticidade Médio (GPa):	11,53
--	--------------

Observações:

1 - Tensão maior igual a 0,3 x fc (MPa); tensão básica igual a 0,5 MPa;



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO



Local e data: Goiânia, 20 de dezembro de 2006

ENSAIO: Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação (tangente inicial)
NBR 8522 (ABNT, 2003)

PESQUISA: Mestrado - CMEC - Wesley Carlos Nunes

Concreto: CR_{5,0} (normal)

Idade: 28 dias

Corpo-de-prova (CP): Cilíndrico (20 cm X 10 cm)

RESULTADOS DE RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO

C. P. Nº	Carga de Ruptura (kgf)	Diâmetro da seção transversal do corpo-de-prova (mm)	Seção (mm ²)	Resistência (MPa)
001	14400	100	7853,98	18,33
002	14100	100	7853,98	17,95
Média	14250	100	7853,98	18,14

C.P. Nº 01	Carga (kgf)	400	4.300
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	5,47
	L1	0,000050	0,000250
	L2	0,000060	0,000280
	Def. médias CP 01	0,000055	0,000265
C.P. Nº 02	Carga (kgf)	400	4.300
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	5,47
	L1	0,000080	0,000320
	L2	0,000060	0,000290
	Def. médias CP 02	0,000070	0,000305
C.P. Nº 03	Carga (kgf)	400	4300
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	5,47
	L1	0,000070	0,000300
	L2	0,000080	0,000290
	Def. médias CP 03	0,000075	0,000295

C. P. (Nº)	Carga de Ruptura (kgf)	Diâmetro (mm)	Seção (mm ²)	Resistência (MPa)
01	13800	100	7854,0	17,57
02	13900	100	7854,0	17,70
03	13500	100	7854,0	17,19

Módulo de Elasticidade (GPa)	C.P. 01	C.P. 02	C. P. 03
	23,69	21,17	22,61

Módulo de Elasticidade Médio (GPa):	22,49
--	--------------

Observações:

1 - Tensão maior igual a 0,3 x fc (MPa); tensão básica igual a 0,5 MPa;



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO



Local e data: Goiânia, 20 de dezembro de 2006

ENSAIO: Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação (tangente inicial)
NBR 8522 (ABNT, 2003)

PESQUISA: Mestrado - CMEC - Wesley Carlos Nunes

Concreto: CAGR25_{5,0} (normal)

Idade: 28 dias

Corpo-de-prova (CP): Cilíndrico (20 cm X 10 cm)

RESULTADOS DE RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO

C. P. Nº	Carga de Ruptura (kgf)	Diâmetro da seção transversal do corpo-de-prova (mm)	Seção (mm ²)	Resistência (MPa)
001	11700	100	7853,98	14,90
002	11900	100	7853,98	15,15
Média	11800	100	7853,98	15,02

C.P. Nº 01	Carga (kgf)	400	3.500
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	4,46
	L1	0,000130	0,000330
	L2	0,000090	0,000300
	Def. médias CP 01	0,000110	0,000315
C.P. Nº 02	Carga (kgf)	400	3.500
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	4,46
	L1	0,000110	0,000400
	L2	0,000020	0,000130
	Def. médias CP 02	0,000065	0,000265
C.P. Nº 03	Carga (kgf)	400	3500
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	4,46
	L1	0,000050	0,000200
	L2	0,000060	0,000300
	Def. médias CP 03	0,000055	0,000250

C. P. (Nº)	Carga de Ruptura (kgf)	Diâmetro (mm)	Seção (mm ²)	Resistência (MPa)
01	11500	100	7854,0	14,64
02	11700	100	7854,0	14,90
03	11200	100	7854,0	14,26

Módulo de Elasticidade (GPa)	C.P. 01	C.P. 02	C. P. 03
	19,30	19,78	20,29

Módulo de Elasticidade Médio (GPa):	19,79
--	--------------

Observações:

1 - Tensão maior igual a 0,3 x fc (MPa); tensão básica igual a 0,5 MPa;



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO



Local e data Goiânia, 20 de dezembro de 2006

ENSAIO: Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação
(tangente inicial)
NBR 8522 (ABNT, 2003)

PESQUISA: Mestrado - CMEC - Wesley Carlos Nunes

Concreto: CAGR50_{5,0} (normal)

Idade: 28 dias

Corpo-de-prova (CP): Cilíndrico (20 cm X 10 cm)

RESULTADOS DE RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO

C. P. Nº	Carga de Ruptura (kgf)	Diâmetro da seção transversal do corpo-de-prova (mm)	Seção (mm ²)	Resistência (MPa)
001	10800	100	7853,98	13,75
002	11000	100	7853,98	14,01
Média	10900	100	7853,98	13,88

C.P. Nº 01	Carga (kgf)	400	3.300
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	4,20
	L1	0,000040	0,000240
	L2	0,000070	0,000250
	Def. médias CP 01	0,000055	0,000245
C.P. Nº 02	Carga (kgf)	400	3.300
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	4,20
	L1	0,000070	0,000310
	L2	0,000100	0,000270
	Def. médias CP 02	0,000085	0,000290
C.P. Nº 03	Carga (kgf)	400	3300
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	4,20
	L1	0,000040	0,000220
	L2	0,000080	0,000300
	Def. médias CP 03	0,000060	0,000260

C. P. (Nº)	Carga de Ruptura (kgf)	Diâmetro (mm)	Seção (mm ²)	Resistência (MPa)
01	10600	100	7854,0	13,50
02	10500	100	7854,0	13,37
03	10800	100	7854,0	13,75

Módulo de Elasticidade (GPa)	C.P. 01	C.P. 02	C. P. 03
	19,48	18,06	18,51

Módulo de Elasticidade Médio (GPa):	18,68
--	--------------

Observações:

1 - Tensão maior igual a 0,3 x fc (MPa); tensão básica igual a 0,5 MPa;



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO



Local e data: Goiânia, 20 de dezembro de 2006

ENSAIO: Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação (tangente inicial)
NBR 8522 (ABNT, 2003)

PESQUISA: Mestrado - CMEC - Wesley Carlos Nunes

Concreto: CAGR75,0 (normal)

Idade: 28 dias

Corpo-de-prova (CP): Cilíndrico (20 cm X 10 cm)

RESULTADOS DE RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO

C. P. Nº	Carga de Ruptura (kgf)	Diâmetro da seção transversal do corpo-de-prova (mm)	Seção (mm ²)	Resistência (MPa)
001	10100	100	7853,98	12,86
002	10400	100	7853,98	13,24
Média	10250	100	7853,98	13,05

C.P. Nº 01	Carga (kgf)	400	3.100
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	3,95
	L1	0,000060	0,000270
	L2	0,000080	0,000320
	Def. médias CP 01	0,000070	0,000295
C.P. Nº 02	Carga (kgf)	400	3.100
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	3,95
	L1	0,000090	0,000310
	L2	0,000040	0,000240
	Def. médias CP 02	0,000065	0,000275
C.P. Nº 03	Carga (kgf)	400	3100
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	3,95
	L1	0,000070	0,000320
	L2	0,000040	0,000250
	Def. médias CP 03	0,000055	0,000285

C. P. (Nº)	Carga de Ruptura (kgf)	Diâmetro (mm)	Seção (mm ²)	Resistência (MPa)
01	10000	100	7854,0	12,73
02	10200	100	7854,0	12,99
03	9900	100	7854,0	12,61

Módulo de Elasticidade (GPa)	C.P. 01	C.P. 02	C. P. 03
	15,32	16,41	14,99

Módulo de Elasticidade Médio (GPa):	15,57
--	--------------

Observações:

1 - Tensão maior igual a 0,3 x fc (MPa); tensão básica igual a 0,5 MPa;



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO



Local e data: Goiânia, 20 de dezembro de 2006

ENSAIO: Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação (tangente inicial)
NBR 8522 (ABNT, 2003)

PESQUISA: Mestrado - CMEC - Wesley Carlos Nunes
Concreto: CAGR100_{5,0} (normal)
Idade: 28 dias
Corpo-de-prova (CP): Cilíndrico (20 cm X 10 cm)

RESULTADOS DE RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO

C. P. Nº	Carga de Ruptura (kgf)	Diâmetro da seção transversal do corpo-de-prova (mm)	Seção (mm ²)	Resistência (MPa)
001	9400	100	7853,98	11,97
002	9600	100	7853,98	12,22
Média	9500	100	7853,98	12,10

C.P. Nº 01	Carga (kgf)	400	2.800
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	3,57
	L1	0,000050	0,000300
	L2	0,000080	0,000280
	Def. médias CP 01	0,000065	0,000290
C.P. Nº 02	Carga (kgf)	400	2.800
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	3,57
	L1	0,000090	0,000320
	L2	0,000080	0,000320
	Def. médias CP 02	0,000085	0,000320
C.P. Nº 03	Carga (kgf)	400	2800
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	3,57
	L1	0,000390	0,000690
	L2	0,000170	0,000330
	Def. médias CP 03	0,000280	0,000510

C. P. (Nº)	Carga de Ruptura (kgf)	Diâmetro (mm)	Seção (mm ²)	Resistência (MPa)
01	9300	100	7854,0	11,84
02	9400	100	7854,0	11,97
03	9100	100	7854,0	11,59

Módulo de Elasticidade (GPa)	C.P. 01	C.P. 02	C. P. 03
	13,62	13,04	13,33

Módulo de Elasticidade Médio (GPa):	13,33
--	--------------

Observações:

1 - Tensão maior igual a 0,3 x fc (MPa); tensão básica igual a 0,5 MPa;



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO



Local e data Goiânia, dezembro de 2006

ENSAIO: Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação
(tangente inicial)
NBR 8522 (ABNT, 2003)

PESQUISA Mestrado - CMEC - Wesley Carlos Nunes

Concreto: CR_{3,5} (rico)

Idade: 28 dias

Corpo-de-prova (CP): Cilíndrico (20 cm X 10 cm)

RESULTADOS DE RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO

C. P. Nº	Carga de Ruptura (kgf)	Diâmetro da seção transversal do corpo-de-prova (mm)	Seção (mm ²)	Resistência (MPa)
001	21500	100	7853,98	27,37
002	21800	100	7853,98	27,76
Média	21650	100	7853,98	27,57

C.P. Nº 01	Carga (kgf)	400	6.500
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	8,28
	L1	0,000070	0,000380
	L2	0,000090	0,000500
	Def. médias CP 01	0,000080	0,000440
C.P. Nº 02	Carga (kgf)	400	6.500
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	8,28
	L1	0,000020	0,000300
	L2	0,000040	0,000250
	Def. médias CP 02	0,000030	0,000275
C.P. Nº 03	Carga (kgf)	400	6500
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	8,28
	L1	0,000100	0,000450
	L2	0,000080	0,000370
	Def. médias CP 03	0,000090	0,000410

C. P. (Nº)	Carga de Ruptura (kgf)	Diâmetro (mm)	Seção (mm ²)	Resistência (MPa)
01	19600	100	7854,0	24,96
02	19300	100	7854,0	24,57
03	19000	100	7854,0	24,19

Módulo de Elasticidade (GPa)	C.P. 01	C.P. 02	C. P. 03
	21,60	31,74	24,30

Módulo de Elasticidade Médio (GPa):	25,88
--	--------------

Observações:

1 - Tensão maior igual a 0,3 x fc (MPa); tensão básica igual a 0,5 MPa;



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO



Local e data: Goiânia, dezembro de 2006

ENSAIO: Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação (tangente inicial)
NBR 8522 (ABNT, 2003)

PESQUISA: Mestrado - CMEC - Wesley Carlos Nunes
Concreto: CAGR25_{3,5} (rico)
Idade: 28 dias
Corpo-de-prova (CP): Cilíndrico (20 cm X 10 cm)

RESULTADOS DE RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO

C. P. Nº	Carga de Ruptura (kgf)	Diâmetro da seção transversal do corpo-de-prova (mm)	Seção (mm ²)	Resistência (MPa)
001	19700	100	7853,98	25,08
002	19900	100	7853,98	25,34
Média	19800	100	7853,98	25,21

C.P. Nº 01	Carga (kgf)	400	5.900
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	7,51
	L1	0,000060	0,000450
	L2	0,000050	0,000280
	Def. médias CP 01	0,000055	0,000365
C.P. Nº 02	Carga (kgf)	400	5.900
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	7,51
	L1	0,000140	0,000610
	L2	0,000110	0,000240
	Def. médias CP 02	0,000125	0,000425
C.P. Nº 03	Carga (kgf)	400	5900
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	7,51
	L1	0,000100	0,000470
	L2	0,000040	0,000300
	Def. médias CP 03	0,000070	0,000385

C. P. (Nº)	Carga de Ruptura (kgf)	Diâmetro (mm)	Seção (mm ²)	Resistência (MPa)
01	19700	100	7854,0	25,08
02	19500	100	7854,0	24,83
03	19900	100	7854,0	25,34

Módulo de Elasticidade (GPa)	C.P. 01	C.P. 02	C. P. 03
	22,62	23,37	22,26

Módulo de Elasticidade Médio (GPa):	22,75
--	--------------

Observações:

1 - Tensão maior igual a 0,3 x fc (MPa); tensão básica igual a 0,5 MPa;



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO



Local e data: Goiânia, dezembro de 2006

ENSAIO: Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação (tangente inicial)
NBR 8522 (ABNT, 2003)

PESQUISA: Mestrado - CMEC - Wesley Carlos Nunes
Concreto: CAGR50_{3,5} (rico)
Idade: 28 dias
Corpo-de-prova (CP): Cilíndrico (20 cm X 10 cm)

RESULTADOS DE RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO

C. P. Nº	Carga de Ruptura (kgf)	Diâmetro da seção transversal do corpo-de-prova (mm)	Seção (mm ²)	Resistência (MPa)
001	18000	100	7853,98	22,92
002	17700	100	7853,98	22,54
Média	17850	100	7853,98	22,73

C.P. Nº 01	Carga (kgf)	400	5.400
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	6,88
	L1	0,000120	0,000520
	L2	0,000010	0,000200
	Def. médias CP 01	0,000065	0,000360
C.P. Nº 02	Carga (kgf)	400	5.400
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	6,88
	L1	0,000130	0,000520
	L2	0,000020	0,000270
	Def. médias CP 02	0,000075	0,000395
C.P. Nº 03	Carga (kgf)	400	5.400
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	6,88
	L1	0,000020	0,000410
	L2	0,000040	0,000310
	Def. médias CP 03	0,000030	0,000360

C. P. (Nº)	Carga de Ruptura (kgf)	Diâmetro (mm)	Seção (mm ²)	Resistência (MPa)
01	17800	100	7854,0	22,66
02	17600	100	7854,0	22,41
03	17400	100	7854,0	22,15

Módulo de Elasticidade (GPa)	C.P. 01	C.P. 02	C. P. 03
	21,61	19,92	19,32

Módulo de Elasticidade Médio (GPa):	20,28
--	--------------

Observações:

1 - Tensão maior igual a 0,3 x fc (MPa); tensão básica igual a 0,5 MPa;



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO



Local e data: Goiânia, dezembro de 2006

ENSAIO: Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação (tangente inicial)
NBR 8522 (ABNT, 2003)

PESQUISA: Mestrado - CMEC - Wesley Carlos Nunes
Concreto: CAGR75_{3,5} (rico)
Idade: 28 dias
Corpo-de-prova (CP): Cilíndrico (20 cm X 10 cm)

RESULTADOS DE RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO

C. P. Nº	Carga de Ruptura (kgf)	Diâmetro da seção transversal do corpo-de-prova (mm)	Seção (mm ²)	Resistência (MPa)
001	16600	100	7853,98	21,14
002	16400	100	7853,98	20,88
Média	16500	100	7853,98	21,01

C.P. Nº 01	Carga (kgf)	400	5.000
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	6,37
	L1	0,000040	0,000360
	L2	0,000060	0,000360
	Def. médias CP 01	0,000050	0,000360
C.P. Nº 02	Carga (kgf)	400	5.000
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	6,37
	L1	0,000020	0,000520
	L2	0,000020	0,000250
	Def. médias CP 02	0,000020	0,000385
C.P. Nº 03	Carga (kgf)	400	5000
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	6,37
	L1	0,000100	0,000520
	L2	0,000020	0,000220
	Def. médias CP 03	0,000060	0,000370

C. P. (Nº)	Carga de Ruptura (kgf)	Diâmetro (mm)	Seção (mm ²)	Resistência (MPa)
01	16400	100	7854,0	20,88
02	16000	100	7854,0	20,37
03	16100	100	7854,0	20,50

Módulo de Elasticidade (GPa)	C.P. 01	C.P. 02	C. P. 03
	18,92	16,07	18,92

Módulo de Elasticidade Médio (GPa):	17,97
--	--------------

Observações:

1 - Tensão maior igual a 0,3 x fc (MPa); tensão básica igual a 0,5 MPa;



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
LABORATÓRIO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO



Local e data: Goiânia, dezembro de 2006

ENSAIO: Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação (tangente inicial)
NBR 8522 (ABNT, 2003)

PESQUISA: Mestrado - CMEC - Wesley Carlos Nunes
Concreto: CAGR100_{3,5} (rico)
Idade: 28 dias
Corpo-de-prova (CP): Cilíndrico (20 cm X 10 cm)

RESULTADOS DE RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO

C. P. Nº	Carga de Ruptura (kgf)	Diâmetro da seção transversal do corpo-de-prova (mm)	Seção (mm ²)	Resistência (MPa)
001	14700	100	7853,98	18,72
002	14500	100	7853,98	18,46
Média	14600	100	7853,98	18,59

C.P. Nº 01	Carga (kgf)	400	4.400
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	5,60
	L1	0,000050	0,000450
	L2	0,000080	0,000340
	Def. médias CP 01	0,000065	0,000395
C.P. Nº 02	Carga (kgf)	400	4.400
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	5,60
	L1	0,000070	0,000490
	L2	0,000010	0,000250
	Def. médias CP 02	0,000040	0,000370
C.P. Nº 03	Carga (kgf)	400	4400
	Def. esp. x fc (MPa)	0,50	5,60
	L1	0,000070	0,000380
	L2	0,000060	0,000380
	Def. médias CP 03	0,000065	0,000380

C. P. (Nº)	Carga de Ruptura (kgf)	Diâmetro (mm)	Seção (mm ²)	Resistência (MPa)
01	14500	100	7854,0	18,46
02	14500	100	7854,0	18,46
03	14200	100	7854,0	18,08

Módulo de Elasticidade (GPa)	C.P. 01	C.P. 02	C. P. 03
	15,46	15,46	16,20

Módulo de Elasticidade Médio (GPa):	15,71
--	--------------

Observações:

1 - Tensão maior igual a 0,3 x fc (MPa); tensão básica igual a 0,5 MPa;

Ensaio / idade dos concretos	RESULTADOS E DATAS DOS ENSAIOS														
	Concretos pobres (1 : 6,5)					Concretos intermediários ou normais (1 : 5,0)					Concretos Ricos (1 : 3,5)				
	CR _{6,5}	CAGR ₂₅ _{6,5}	CAGR ₅₀ _{6,5}	CAGR ₇₅ _{6,5}	CAGR ₁₀₀ _{6,5}	CR _{5,0}	CAGR ₂₅ _{5,0}	CAGR ₅₀ _{5,0}	CAGR ₇₅ _{5,0}	CAGR ₁₀₀ _{5,0}	CR _{3,5}	CAGR ₂₅ _{3,5}	CAGR ₅₀ _{3,5}	CAGR ₇₅ _{3,5}	CAGR ₁₀₀ _{3,5}
Data da moldagem	22/11/06	23/11/06	23/11/06	23/11/06	22/11/06	24/11/06	29/11/06	29/11/06	29/11/06	24/11/06	30/11/06	01/12/06	01/12/06	01/12/06	30/11/06
Resistência à compressão aos 3 dias	25/11/06	26/11/06	26/11/06	26/11/06	25/11/06	27/11/06	02/12/06	02/12/06	02/12/06	27/11/06	03/12/06	04/12/06	04/12/06	04/12/06	03/12/06
Resultados do ensaio (2 CP's) Tensão máxima (MPa)	6,66	6,22	5,49	4,91	4,47	12,52	9,88	9,00	7,98	7,10	21,16	18,01	15,81	14,13	10,84
Resistência à compressão aos 7 dias	29/11/06	30/11/06	30/11/06	30/11/06	29/11/06	01/12/06	06/12/06	06/12/06	06/12/06	01/12/06	07/12/06	08/12/06	08/12/06	08/12/06	07/12/06
Resultados do ensaio (2 CP's) Tensão máxima (MPa)	8,64	8,49	7,54	6,37	5,71	15,59	13,10	11,49	10,25	9,22	23,06	20,72	17,72	15,89	13,91
Resistência à compressão aos 28 dias	20/12/06	21/12/06	21/12/06	21/12/06	20/12/06	22/12/06	27/12/06	27/12/06	27/12/06	22/12/06	28/12/06	29/12/06	29/12/06	29/12/06	28/12/06
Resultados do ensaio (2 CP's) Tensão máxima (MPa)	11,93	10,62	9,81	9,00	8,20	18,23	15,75	13,98	13,03	12,15	26,87	25,26	22,70	20,94	18,60
Resistência à compressão aos 56 dias	17/01/07	18/01/07	18/01/07	18/01/07	17/01/07	19/01/07	24/01/07	24/01/07	24/01/07	19/01/07	25/01/07	26/01/07	26/01/07	26/01/07	25/01/07
Resultados do ensaio (2 CP's) Tensão máxima (MPa)	13,84	12,15	10,91	10,18	9,37	20,72	18,08	16,99	15,30	14,13	31,55	28,85	26,43	23,72	20,79
Tração por compressão diametral aos 28 dias	20/12/06	21/12/06	21/12/06	21/12/06	20/12/03	22/12/06	27/12/06	27/12/06	27/12/06	22/12/06	28/12/06	29/12/06	29/12/06	29/12/06	28/12/06
Resultados do ensaio (2 CP's) Tensão máxima (MPa)	1,74	1,54	1,40	1,28	1,15	2,51	2,06	1,89	1,74	1,50	3,27	2,80	2,46	2,26	1,94
Módulo de deformação aos 28 dias	20/12/06	21/12/06	21/12/06	21/12/06	20/12/06	22/12/06	27/12/06	27/12/06	27/12/06	22/12/06	28/12/06	29/12/06	29/12/06	29/12/06	28/12/06
Densidade e absorção de água aos 28 dias	20/12/06	21/12/06	21/12/06	21/12/06	20/12/06	22/12/06	27/12/06	27/12/06	27/12/06	22/12/06	28/12/06	29/12/06	29/12/06	29/12/06	28/12/06

RESULTADOS DE DOSAGEM DO CONCRETO DE REFERÊNCIA E DOS CONCRETOS COM AGR DE RCD (1 : 6,5 - Traço POBRE)						
CONCRETOS POBRES Traço em massa	Ident. do concreto	CR _{6,5}	CAGR25 _{6,5}	CAGR50 _{6,5}	CAGR75 _{6,5}	CAGR100 _{6,5}
	1 : m	1 : 6,5	1 : 6,5	1 : 6,5	1 : 6,5	1 : 6,5
	1 : a : b _n : b _r	1 : 2,975 : 3,525 : 0	1 : 2,975 : 2,644 : 0,881	1 : 2,975 : 1,763 : 1,763	1 : 2,975 : 0,881 : 2,644	1 : 2,975 : 0 : 3,525
Teor de argamassa (%)		53	53	53	53	53
Cimento (kg)		11,573	11,233	10,788	10,486	10,178
Massa do agregado miúdo (areia) (kg)		34,430	33,418	32,094	31,196	30,279
Massa do agregado graúdo natural = b _n (kg)		40,795	29,697	19,014	9,241	0,000
Massa do agregado graúdo reciclado = b _r (kg)		0,000	9,899	19,014	27,722	35,877
Água (kg)		9,606	9,323	8,954	8,703	8,448
Água compensada (absorção média: 10,5%)		0,000	1,039	1,996	2,911	3,767
Relação água/cimento (a/c) (kg/kg)		0,83	0,83	0,83	0,83	0,83
Abatimento do tronco de cone (slump) (mm)		90	90	75	70	50
Massa específica do concreto (kg/m ³)		2,320	2,240	2,153	2,068	1,990
Teor de ar incorporado (%)		1,9	2,5	3,4	4,2	4,3
Consumos por m ³ de concreto	Cimento (kg)	275,552	266,361	256,830	248,109	241,573
	Água (kg ou litro)	228,710	221,985	213,192	207,222	201,135
Quantidade de corpos-de-prova (CP's) moldados		21	21	21	21	21
Temperatura da sala de dosagem (°C)		27,6	27,5	27,5	28,8	27,6
Umidade relativa do ar (U. R. ar) (%)		35	39	39	36	35
Data da dosagem e moldagens dos CP's		22/11/2006	23/11/2006	23/11/2006	23/11/2006	22/11/2006

RESULTADOS DE DOSAGEM DO CONCRETO DE REFERÊNCIA E DOS CONCRETOS COM AGR DE RCD (1 : 5,0 - Traço NORMAL ou INTERMEDIÁRIO)						
CONCRETOS NORMAIS Traço em massa	Ident. dos concretos	CR _{5,0}	CAGR25 _{5,0}	CAGR50 _{5,0}	CAGR75 _{5,0}	CAGR100 _{5,0}
	1 : m	1 : 5,0	1 : 5,0	1 : 5,0	1 : 5,0	1 : 5,0
	1 : a : b _n : b _r	1 : 2,180 : 2,820 : 0	1 : 2,180 : 2,115 : 0,705	1 : 2,180 : 1,410 : 1,410	1 : 2,180 : 0,705 : 2,115	1 : 2,180 : 0 : 2,820
Teor de argamassa (%)		53	53	53	53	53
Cimento (kg)		14,671	14,191	13,709	13,183	12,832
Massa do agregado miúdo (areia) (kg)		31,983	30,936	29,885	28,739	27,973
Massa do agregado graúdo natural = b _n (kg)		41,372	30,014	19,329	9,294	0
Massa do agregado graúdo reciclado = b _r (kg)		0	10,005	19,329	27,882	36,186
Água (kg)		9,389	9,082	8,774	8,437	8,212
Água compensada (absorção média: 10,5%)		0	1,051	2,030	2,928	3,799
Relação água/cimento (a/c) (kg/kg)		0,64	0,64	0,64	0,64	0,64
Abatimento do tronco de cone (slump) (mm)		90	90	75	75	50
Massa específica do concreto (kg/m ³)		2.333	2.258	2.178	2.085	2.045
Teor de ar incorporado (%)		1,8	2,3	3,0	4,0	4,1
Consumos por m ³ de concreto	Cimento (kg)	349,309	337,882	326,399	314,538	306,157
	Água (kg ou litro)	223,558	216,245	208,896	200,885	195,53
Quantidade de corpos-de-prova (CP's) moldados		21	21	21	21	21
Temperatura da sala de dosagem (°C)		27,6	27,3	27,4	27,9	27,8
Umidade relativa do ar (U. R. ar) (%)		44	44	45	41	43
Data da dosagem e moldagens dos CP's		24/11/2006	29/11/2006	29/11/2006	29/11/2006	24/11/2006

RESULTADOS DE DOSAGEM DO CONCRETO DE REFERÊNCIA E DOS CONCRETOS COM AGR DE RCD (1 : 3,5 - Traço RICO)						
CONCRETOS RICOS Traço em massa	Ident. dos concretos	CR _{3,5}	CAGR25 _{3,5}	CAGR50 _{3,5}	CAGR75 _{3,5}	CAGR100 _{3,5}
	1 : m	1 : 3,5	1 : 3,5	1 : 3,5	1 : 3,5	1 : 3,5
	1 : a : b _n : b _r	1 : 1,385 : 2,115 : 0	1 : 1,385 : 1,586 : 0,529	1 : 1,385 : 1,058 : 1,058	1 : 1,385 : 0,529 : 1,586	1 : 1,385 : 0 : 2,115
Teor de argamassa (%)		53	53	53	53	53
Cimento (kg)		19,792	19,082	18,449	17,886	17,317
Massa do agregado miúdo (areia) (kg)		27,412	26,429	25,552	24,773	23,984
Massa do agregado graúdo natural = b _n (kg)		41,859	30,260	19,510	9,457	0
Massa do agregado graúdo reciclado = b _r (kg)		0	10,090	19,510	28,372	36,625
Água (kg)		9,500	9,159	8,855	8,585	8,312
Água compensada (absorção média: 10,5%)		0	1,059	2,049	2,979	3,846
Relação água/cimento (a/c) (kg/kg)		0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
Abatimento do tronco de cone (slump) (mm)		95	90	80	80	55
Massa específica do concreto (kg/m ³)		2.370	2.263	2.190	2.120	2.070
Teor de ar incorporado (%)		1,4	2,2	2,8	3,2	3,7
Consumos por m ³ de concreto	Cimento (kg)	471,231	454,334	439,180	425,865	412,730
	Água (kg ou litro)	226,191	218,080	210,845	204,415	197,906
Quantidade de corpos-de-prova (CP's) moldados		21	21	21	21	21
Temperatura da sala de dosagem (°C)		25,9	25,6	26,5	27,5	26
Umidade relativa do ar (U. R. ar) (%)		54	50	48	44	48
Data da dosagem e moldagens dos CP's		30/11/2006	1/12/2006	1/12/2006	1/12/2006	30/11/2006



Termo de Ciência e de Autorização para Disponibilizar as Teses e Dissertações Eletrônicas (TEDE) na Biblioteca Digital da UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás-UFG a disponibilizar gratuitamente através da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações - BDTD/UFG, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: Dissertação Tese

2. Identificação da Tese ou Dissertação

Autor(a): Wesley Carlos Nunes	
CPF: 33109311-00	E-mail: wesleycnunes@yahoo.com.br
Seu e-mail pode ser disponibilizado na página? <input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não	
Vínculo Empregatício do autor	
Agência de fomento:	Sigla:
País:	UF:
CNPJ:	
Título: Influência do agregado graúdo reciclado de resíduos da construção predial nas propriedades do concreto fresco e endurecido	
Palavras-chave: Gerenciamento de resíduos da construção; Desenvolvimento sustentável; Resíduos de construção e demolição; RCD; Agregados Reciclados; Concreto.	
Título em outra língua:	
Palavras-chave em outra língua: Construction wastes management; Sustainable development; Construction & demolition wastes; C&D wastes; Recycled aggregates; Concrete.	
Área de concentração:	
Data de defesa: (dd/mm/aaaa)	04/10/2007
Programa de Pós-Graduação:	
Orientador(a): Prof. Dr. Enio José Pazini Figueiredo	
CPF: 632428770-04	E-mail: epazini@eec.ufg.br
Co-orientador(a):	
CPF:	E-mail:

3. Informações de acesso ao documento:

Liberação para disponibilização?: total parcial

Em caso de disponibilização parcial, assinalar as permissões:

Capítulos. Especifique: _____

Outras restrições: _____

_____ Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s)

arquivo(s) em formato digital (PDF ou DOC da tese ou dissertação).

O Sistema da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações garante aos autores, que os arquivos contendo eletronicamente as teses e ou dissertações, antes de sua disponibilização, receberão procedimentos de segurança, criptografia (para não permitir cópia e extração de conteúdo, permitindo apenas impressão fraca) usando o padrão do Acrobat.

Assinatura do(a) autor(a)

Data: 04 / 10 / 2007

² Em caso de restrição, esta poderá ser mantida por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo solicita justificativa junto à coordenação do curso. Todo resumo e metadados ficarão sempre disponibilizados.

N972i Nunes, Wesley Carlos.
Influência do agregado graúdo reciclado de resíduos da construção predial nas propriedades do concreto fresco e endurecido / Wesley Carlos Nunes. – Goiânia, 2007. 200 p. il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2007.

Orientador: Prof. Dr. Enio José Pazini Figueiredo.

1. Engenharia civil – resíduos de construção – reciclagem. 2. Entulho de construção – reciclagem – aproveitamento. I. Título.

CDU: 628.4.03 (043)
69.059.6 (043)