

JONATHAS JUDÁ LIMA TENÓRIO

**AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES DO
CONCRETO PRODUZIDO COM
AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS
DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO VISANDO
APLICAÇÕES ESTRUTURAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

MACEIÓ

2007

JONATHAS JUDÁ LIMA TENÓRIO

**AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES DO
CONCRETO PRODUZIDO COM
AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS
DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO VISANDO
APLICAÇÕES ESTRUTURAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Área de concentração: *Estruturas*

Orientador: Prof. Dr. Paulo César Correia Gomes

Co-orientador: Prof. Dr. Christiano C. Rodrigues

MACEIÓ

2007

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária Responsável: Renata Barros Domingos

- | | |
|-------|---|
| T312a | <p>Tenório, Jonathas Judá Lima.
Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção demolição visando aplicações estruturais / Jonathas Judá Lima Tenório. – Maceió, 2007.
xix, 138f. : il.</p> <p>Orientador: Paulo César Correia Gomes.
Co-Orientador: Christiano C. Rodrigues.
Dissertação (mestrado em Engenharia Civil : Estruturas) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2007.</p> <p>Bibliografia: f. 130-138.</p> <p>1. Resíduos - Reaproveitamento. 2. Concreto. 3. Estruturas. 4. Reciclagem.
I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 691.32</p> |
|-------|---|

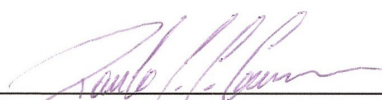


Universidade Federal de Alagoas – UFAL
Centro de Tecnologia – CTEC
Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil – PPGEC
Av. Lourival de Melo Mota, S/N
Tabuleiro do Martins – CEP 57072-970 – Maceió – Alagoas
Tel/Fax: (82) 3214-1276
E-mail: ppgec@ctec.ufal.br
Homepage: <http://www.ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgec>



Membros da Banca de Exame da Dissertação de Mestrado do Engenheiro Civil **JONATHAS JUDÁ LIMA TENÓRIO**, intitulada “AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES DE CONCRETO PRODUZIDO COM AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO VISANDO APLICAÇÕES ESTRUTURAIS”, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Alagoas, no dia 08 do mês de novembro do ano de 2007, às 15 horas, na Sala de Aula do PPGEC/CTEC/UFAL.

MEMBROS DA BANCA:



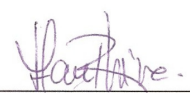
Prof. Dr. Paulo César Correia Gomes
Orientador – CTEC/UFAL
CPF: 468.814.504-78



Prof. Dr. Christiano Cantarelli Rodrigues
Co-orientador – CTEC/UFAL
CPF: 349.028.564-68



Prof. Dr. Vanderley Moacyr John
USP
CPF: 297.480.680-49



Prof. Dr. Flávio Barboza de Lima
Orientador – CTEC/UFAL
CPF: 304.363.624-49

*A todos aqueles que de alguma forma
contribuíram para o início, desenvolvimento e
conclusão deste trabalho.*

Agradecimentos

A Deus, o SENHOR, por Ele existir e por me ter me permitido conhecê-Lo melhor durante o desenvolvimento deste trabalho – fato o qual também contribuiu grandemente para que este trabalho se tornasse realidade.

Aos meus pais, Daniel e Selma, pela educação que me trouxe até aqui.

Ao professor Paulo César Correia Gomes pela orientação, paciência, críticas e conselhos.

Ao professor Christiano Cantarelli Rodrigues pela orientação e grande auxílio na parte do experimento fatorial.

Ao colega e pesquisador Antonio Carlos dos Santos pelo convívio, ajuda na parte experimental, conselhos e dicas.

Aos colegas de graduação Karlisson André, Carlos Henrique e Victor Cantalice pela ajuda na parte experimental deste trabalho.

Aos professores Flávio Barboza de Lima e Sílvia Beatriz Beger Uchoa pelas dicas, conselhos, pelos livros e demais materiais cedidos.

Aos colegas de pós-graduação Márcio André, Luís Eduardo, Octavio, David, Thiago Cordeiro e José Adeildo pelos momentos que passamos juntos neste mestrado, pelo companheirismo e momentos de descontração.

Ao professor Severino Pereira Cavalcanti Marques pelo seu esforço em conseguir (e manter) bolsas de estudo para nosso programa de pós-graduação.

À Pricila Meireles Carrijo e ao Sérgio Cirelli Angulo por terem gentilmente cedido cópias dos gráficos de seus trabalhos.

Aos técnicos do Laboratório de Geotecnia do NPT Marco Wanderley e Antonio Colatino pelo auxílio na realização de ensaios naquele laboratório e pelos equipamentos e materiais gentilmente cedidos.

Aos técnicos do Laboratório de Estruturas e Materiais do NPT Alexandre Lima, Valdemir Farias, João Alberto, Cícero e Fábio José pelas orientações, socorro e auxílio.

Aos demais funcionários do NPT Girley, Flabel e Nominando pela ajuda, quebra-galhos e suporte essencial.

Resumo

O trabalho analisou algumas das propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto produzido com agregados miúdos e graúdos de RCD reciclado no intuito de avaliar a possibilidade de uso do compósito em estruturas. Uma atenção especial foi dada ao nível de porosidade/resistência do agregado graúdo reciclado. Para isso, tomou-se como um dos parâmetros do estudo a sua massa específica. Os resíduos de construção e demolição foram coletados em áreas de deposição ilegal dentro da cidade de Maceió e foram cominuídos em laboratório, sendo o material granular obtido separado em duas frações: agregado miúdo e agregado graúdo. Uma parte do agregado graúdo foi misturada com agregado graúdo de concreto reciclado de forma a produzir um novo agregado reciclado menos poroso/mais resistente – as quantidades dos dois agregados a serem misturadas foram determinadas com o auxílio de uma regra de mistura para a massa específica. Traços foram produzidos em laboratório com três níveis de relação a/c combinando-se cada agregado graúdo reciclado com o agregado miúdo reciclado ou com uma areia natural. Ao mesmo tempo, concretos de referência foram produzidos com agregados naturais. As propriedades dos concretos reciclados foram analisadas também por meio de um experimento fatorial. Em termos gerais, o uso combinado de agregado graúdo reciclado com agregado miúdo reciclado não foi vantajoso, mas as propriedades dos concretos foram tanto melhores quanto menor foi a porosidade (ou, maior a massa específica) dos agregados graúdos reciclados. Alguns concretos reciclados chegaram a apresentar resistências mecânicas maiores que as de seus respectivos concretos de referência. Os resultados encontrados permitem afirmar que concretos reciclados podem ser usados em estruturas, mas com restrições.

Palavras-Chave: Resíduo de construção e demolição, Reciclagem, Concreto, Estruturas

Abstract

This work analysed some mechanical and durability properties of the concrete produced with fine and coarse aggregates obtained from the recycling of construction and demolition wastes (CDW) in order to evaluate the possibility to use this composite in structures. A special attention was given to the degree of porosity/strength of the coarse recycled aggregate assuming its specific gravity as one of the parameters of the study. Construction and demolition wastes were gathered from illegal deposition areas inside Maceió and were comminuted in laboratory; the grains obtained were divided into fine aggregate and coarse aggregate. One part of the coarse aggregate was mixed in with recycled concrete aggregate in order to produce a new aggregate which was less porous/stronger than the first one – the amount of aggregates to be mixed were determined through a rule of mixture for the specific gravity. Concretes were produced in laboratory combining three water-cement ratio with each coarse recycled aggregate and fine recycled aggregate or river sand; reference concretes were produced with natural aggregates too. The properties of the recycled concretes were also investigated by means of a factorial design. In general, the use of coarse recycled aggregate combined with fine coarse aggregate was not good, but the less porous the coarse recycled aggregate (or the higher the specific gravity), the better the concrete properties were. Some recycled aggregate concretes reached strength values bigger than the reference concrete. Results showed that recycled concretes can be used in structures, but with some restrictions.

Keywords: *Construction and demolition waste, Recycling, Concrete, Structures*

Lista de Figuras

Figura 2.1: Britador de mandíbula de pequeno porte (a) (http://rses.anu.edu.au/facilities) e detalhe de seu mecanismo (b) (www.chmprojects.com).	8
Figura 2.2: Detalhe de funcionamento do britador de mandíbula tipo eixo único (<i>single-toggle</i>) (a) e eixo duplo (<i>double-toggle</i>) (b) (THYSSENKRUPP, 2006).	9
Figura 2.3: Detalhe do funcionamento de um britador de impacto (PENNSYLVANIA CRUSHER, 2003).	10
Figura 2.4: Detalhe do funcionamento do britador cônico (www.aggdesigns.com , 2006).	11
Figura 2.5: Detalhe do funcionamento do moinho de martelos (PENNSYLVANIA CRUSHER, 2003).	12
Figura 2.6: Moinho-argamassadeira da marca ANVI (MIRANDA; SELMO, 2006). ...	12
Figura 2.7: Peneiras (a) vibratória de uso industrial (www.mining-technology.com , 2006) e (b) trommel da usina de Gentil (SP) (LEVY, 2005).	14
Figura 2.8: Esquema de funcionamento de um classificador a ar vertical (KOHLE; KURKOWSKI, 1998, modificado).	15
Figura 2.9: Esquema de funcionamento de um classificador do tipo ciclone a ar (www.dustcollectorexports.com , 2006, modificado).	15
Figura 2.10: Classificador espiral (www.nawaengineers.com , 2006).	16
Figura 2.11: Área destinada à catação manual e separação magnética dos agregados reciclados na usina de Campinas (SP). As operações acontecem após a fragmentação do RCD (LEVY, 2005).	19
Figura 2.12: Esquema de funcionamento do jigge modelo alljig (www.allmineral.com , 2006).	21
Figura 2.13: Esquema do leito de um jigge ideal processando carvão (DIEUDONNÉ et al., 2001, modificado).	21
Figura 3.1: Absorção de água por imersão, após 24 horas, de fases do agregado graúdo de RCD reciclado da usina de Santo André (SP) (ANGULO, 2000).	29
Figura 3.2: Correlação entre massa específica aparente e absorção de água de fases do agregado graúdo reciclado da usina de Santo André (SP) (ANGULO, 2000 apud ANGULO, 2005).	32
Figura 3.3: Curvas granulométricas de alguns agregados miúdos reciclados de Maceió estudados por Gomes et al. (2005).	37
Figura 3.4: Curvas granulométricas de alguns agregados graúdos reciclados de Maceió estudados por Gomes et al. (2005).	37
Figura 4.1: Abatimento de concretos confeccionados com agregados graúdos de RCD reciclado separados em faixas de densidade (CARRIJO, 2005).	45

Figura 4.2: Efeito do teor de substituição de agregados miúdos sobre o abatimento do concreto (KHATIB, 2005).....	46
Figura 4.3: Efeito do agregado miúdo de concreto reciclado sobre a resistência à compressão de concretos estudados por Khatib (2005).....	47
Figura 4.4: Efeito do agregado miúdo de tijolo reciclado sobre a resistência à compressão de concretos estudados por Khatib (2005).....	48
Figura 4.5: Resistência à compressão de concretos reciclados em função da relação a/c e do teor de substituição dos agregados (AMR = agregado miúdo reciclado e AGR = agregado graúdo reciclado) (LEITE, 2001).....	49
Figura 4.6: Resistência à compressão dos concretos em função da massa específica dos agregados reciclados e da relação a/c (CARRIJO, 2005).....	50
Figura 4.7: Módulo de elasticidade de concretos em função da massa específica dos agregados reciclados e da relação a/c (CARRIJO, 2005).....	52
Figura 4.8: Absorção de água do concreto em função da massa específica dos agregados graúdos reciclados (CARRIJO, 2005).	55
Figura 4.9: Índice de vazios do concreto em função da massa específica dos agregados graúdos reciclados (CARRIJO, 2005).	55
Figura 5.1: Etapas da parte experimental do trabalho.	61
Figura 5.2: (a) Moinho de martelos usado na cominuição dos resíduos. (b) Peneirador mecânico usado na separação dos agregados.	62
Figura 5.3: Aspecto visual do agregado miúdo de RCD reciclado.....	64
Figura 5.4: Aspecto visual dos agregados graúdos de RCD reciclado. G1 (a) e G2 (b). 66	
Figura 5.5: Esquema do ensaio de determinação do tempo de permeabilidade ao ar pelo método de Figg.	77
Figura 6.1: Curvas granulométricas dos agregados miúdos e limites (NBR 248:2003). 82	
Figura 6.2: Curvas granulométricas dos agregados graúdos e limites da NBR 248 (2003).....	83
Figura 6.3: Composição dos agregados graúdos reciclados segundo a NBR 15116 (2004).....	85
Figura 6.4: Curvas de absorção de água em função do tempo para os agregados graúdos reciclados.	86
Figura 6.5: Abatimento dos concretos na 1ª moldagem e na réplica do experimento....	88
Figura 6.6: Teores de aditivo superplastificante usados nos concretos.	90
Figura 6.7: Resistência à compressão dos concretos (média das duas moldagens).....	92
Figura 6.8: Comportamento da resistência à compressão média dos concretos reciclados (a) em função da relação a/c e da massa específica do agregado graúdo (b) em função da relação a/c e do tipo de agregado miúdo.....	93
Figura 6.9: Detalhes de alguns corpos-de-prova rompidos no ensaio de resistência à compressão. As faces dos corpos-de-prova foram umedecidas.....	95

Figura 6.10: Módulo de elasticidade tangente inicial (E_{ci}) dos concretos.	96
Figura 6.11: Comportamento médio do módulo de elasticidade dos concretos reciclados (a) em função da relação a/c e da massa específica do agregado graúdo (b) em função da relação a/c e do tipo de agregado miúdo.	97
Figura 6.12: Módulo de elasticidade tangente inicial - valores medidos em função dos valores previstos.	98
Figura 6.13: Absorção de água e Índice de vazios dos concretos.	100
Figura 6.14: Tempo de permeabilidade ao ar (Figg) dos concretos.	100
Figura 6.15: Absorção de água em função da relação a/c para cada tipo de concreto.	101
Figura 6.16: Índice de vazios em função da relação a/c para cada tipo de concreto. ...	102
Figura 6.17: Tempo de permeabilidade ao ar (Figg) em função da relação a/c para cada tipo de concreto.	102
Figura 6.18: Comportamento da absorção de água média, do índice de vazios médio e do tempo de permeabilidade médio dos concretos reciclados (a), (c) e (e) em função da relação a/c e da massa específica do agregado graúdo (b), (d) e (f) em função da relação a/c e do tipo de agregado miúdo.	104
Figura 6.19: Absorção de água em função da resistência à compressão para cada tipo de concreto. Cada ponto corresponde a uma relação a/c. A relação a/c diminui da esquerda para a direita.	105
Figura 6.20: Índice de vazios em função da resistência à compressão para cada tipo de concreto. Cada ponto corresponde a uma relação a/c. A relação a/c diminui da esquerda para a direita.	106
Figura 6.21: Tempo de permeabilidade ao ar (Figg) em função da resistência à compressão para cada tipo de concreto. Cada ponto corresponde a uma relação a/c. A relação a/c diminui da esquerda para a direita.	106
Figura 6.22: Superfície de resposta da resistência à compressão em função da massa específica do agregado graúdo e do consumo de cimento ($T_{am} = -1$).	108
Figura 6.23: Superfície de resposta da resistência à compressão em função da massa específica do agregado graúdo e do consumo de cimento.	109
Figura 6.24: Resistência à compressão prevista em função da resistência à compressão medida.	110
Figura 6.25: Resíduos deixados pelo modelo para a resistência à compressão.	110
Figura 6.26: Efeito isolado do consumo de cimento sobre a resistência à compressão.	111
Figura 6.27: Efeito isolado do tipo de agregado miúdo sobre a resistência à compressão (-1 = reciclado e +1 = areia).	112
Figura 6.28: Efeito isolado da massa específica do agregado graúdo sobre a resistência à compressão.	112
Figura 6.29: Efeito da interação $C_c \times \gamma_{ag}$ sobre a resistência à compressão (a) f_c em função de C_c (b) f_c em função de γ_{ag}	113

Figura 6.30: Superfície de resposta da absorção de água em função do tipo de agregado miúdo e da massa específica do agregado graúdo ($C_c = 0$).	116
Figura 6.31: Absorção de água medida versus absorção de água predita.....	117
Figura 6.32: Resíduos deixados pelo modelo para a absorção de água.	117
Figura 6.33: Efeito isolado do tipo de agregado miúdo sobre a absorção de água (-1 = reciclado e +1 = areia).	118
Figura 6.34: Efeito isolado da massa específica do agregado graúdo sobre a absorção de água.	118
Figura 6.35: Efeito da interação $C_c \times \gamma_{ag}$ sobre a absorção de água (a) f_c em função de C_c (b) f_c em função de γ_{ag}	119
Figura 6.36: Superfície de resposta do índice de vazios em função do tipo de agregado miúdo e da massa específica do agregado graúdo ($C_c = 0$).	121
Figura 6.37: Superfície de resposta do índice de vazios em função do tipo de agregado miúdo e do consumo de cimento ($\gamma_{ag} = 0$).	122
Figura 6.38: Índice de vazios previsto em função do índice de vazios medido.	123
Figura 6.39: Resíduos deixados pelo modelo para índice de vazios.	123
Figura 6.40: Efeito isolado do tipo de agregado miúdo sobre o índice de vazios (-1 = reciclado e +1 = areia).	124

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Sistema de classificação do RCD proposto por Lima (1999).....	18
Tabela 3.1: Exemplos de composição percentual de RCDs do Brasil e da Holanda.....	25
Tabela 3.2: Composição percentual, segundo a Resolução Conama 307 (2002), de RCDs coletados no Lixão de Maceió e em pontos de deposição ilegal dentro da malha urbana da cidade.	25
Tabela 3.3: Composição percentual, em massa, de vários agregados graúdos reciclados.	26
Tabela 3.4: Composição percentual, em massa, de agregados graúdos reciclados da cidade de Maceió, de acordo com a NBR 15116 (2004).....	27
Tabela 3.5: Propriedades de agregados de concreto reciclado.	30
Tabela 3.6: Absorção de água de agregados de alvenaria de tijolos cerâmicos reciclada.	30
Tabela 3.7: Massa específica e absorção de água de agregados graúdos reciclados separados por faixas de densidade.	33
Tabela 3.8: Composição percentual em massa dos agregados graúdos reciclados separados por faixas de densidade do estudo de Carrijo (2005).....	33
Tabela 3.9: Outras características relacionadas à granulometria dos agregados reciclados de Maceió.....	38
Tabela 3.10: Índice de forma de agregados graúdos reciclados de Maceió estudados por Gomes et al. (2005).....	39
Tabela 3.11: Índice de forma de agregados graúdos reciclados de Taiwan.	39
Tabela 5.1: Traços gerados da combinação dos fatores do experimento junto com os traços de referência.	60
Tabela 5.2: Codificação dos níveis dos fatores no experimento fatorial.....	60
Tabela 5.3: Propriedades granulométricas do agregado miúdo reciclado determinadas segundo a NBR NM 248 (2003).	65
Tabela 5.4: Outras propriedades do agregado miúdo reciclado.....	65
Tabela 5.5: Propriedades granulométricas dos agregados graúdos reciclados G1 e G2 segundo a NBR NM 248 (2003).	67
Tabela 5.6: Composição dos agregados graúdos reciclados G1 e G2 de acordo com a NBR 15116 (2004).....	67
Tabela 5.7: Outras propriedades dos agregados graúdos reciclados.	68
Tabela 5.8: Absorção dos agregados graúdos G1 e G2 em função do tempo.	68

Tabela 5.9: Propriedades granulométricas da areia determinadas segundo a NBR NM 248 (2003).	69
Tabela 5.10: Outras propriedades da areia.	69
Tabela 5.11: Propriedades granulométricas da brita 1 segundo a NBR NM 248 (2003).	70
Tabela 5.12: Outras propriedades da brita 1.	70
Tabela 5.13: Características físico-mecânicas do cimento utilizado.	71
Tabela 5.14: Características químicas do cimento utilizado.	71
Tabela 5.15: Características do superplastificante (dados fornecidos pelo fabricante).	72
Tabela 5.16: Cálculo do volume de agregado graúdo para o traço com teor de argamassa igual a 50%.	74
Tabela 5.17: Composição dos concretos produzidos (traços em massa e em volume).	75
Tabela 6.1: Principais propriedades dos agregados miúdos.	80
Tabela 6.2: Propriedades granulométricas dos agregados miúdos (NBR 248:2003).	82
Tabela 6.3: Propriedades granulométricas dos agregados graúdos (NBR 248:2003).	84
Tabela 6.4: Outras propriedades dos agregados graúdos.	85
Tabela 6.5: Quantidade de aditivo usada em cada concreto e seus respectivos abatimentos.	88
Tabela 6.6: Resistência à compressão dos concretos nas duas moldagens.	91
Tabela 6.7: Observações quanto à ruptura dos agregados reciclados nos corpos-de-prova do ensaio de resistência à compressão da réplica.	94
Tabela 6.8: Módulo de elasticidade tangente inicial (E_{ci}) e resistência à compressão dos concretos.	95
Tabela 6.9: Valores dos módulos de elasticidade tangentes iniciais (E_{ci}) medidos experimentalmente e previstos por fórmula.	98
Tabela 6.10: Absorção de água, índice de vazios e tempo de permeabilidade ao ar (Figg) dos concretos.	99
Tabela 6.11: Resistência à compressão dos concretos reciclados (1ª moldagem e réplica)	107
Tabela 6.12: Absorção de água dos concretos reciclados.	114
Tabela 6.13: Índice de vazios dos concretos reciclados.	120

Lista de Abreviaturas

ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CTEC	<i>Centro de Tecnologia</i>
Lema	<i>Laboratório de Estruturas e Materiais</i>
NBR	<i>Norma Brasileira</i>
NPT	<i>Núcleo de Pesquisas Tecnológicas</i>
RCD	<i>Resíduo de Construção e Demolição</i>
RILEM	<i>International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures</i>

Lista de Símbolos

Abs	Absorção de água do concreto
a/c	Água/cimento
C_c	Fator <i>Consumo de cimento</i> no experimento fatorial
E_{ci}	Módulo de elasticidade tangente inicial do concreto
f_{ck}	Resistência à compressão do concreto, aos 28 dias de idade
γ	Massa específica da mistura de dois agregados
γ_1 / γ_2	Massas específicas dos agregados e serem misturados
γ_{ACR}	Massa específica do agregado de concreto reciclado
γ_{ag}	Fator <i>Massa específica do agregado graúdo reciclado</i> no experimento fatorial
γ_{G1}	Massa específica do agregado graúdo reciclado G1
γ_{G2}	Massa específica do agregado graúdo reciclado G2
I_v	Índice de vazios do concreto
$\%M_{ACR}$	Porcentagem de agregado graúdo de concreto reciclado, em massa
$\%M_{G1}$	Porcentagem de agregado graúdo reciclado G1, em massa
T_{am}	Fator <i>Tipo de agregado miúdo</i> no experimento fatorial

Sumário

Agradecimentos	vi
Resumo	vii
Abstract	viii
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Abreviaturas	xv
Lista de Símbolos	xvi
Capítulo 1	1
1. Introdução	1
1.1 OBJETIVOS	4
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	4
Capítulo 2	6
2. Tecnologia empregada na transformação do RCD em agregado	6
2.1 COMINUIÇÃO	7
2.1.1 <i>Britador de mandíbulas</i>	8
2.1.2 <i>Britador de impacto</i>	9
2.1.3 <i>Britador de cone ou britador cônico</i>	10
2.1.4 <i>Moinho de martelos</i>	11
2.1.5 <i>Moinho-argamassadeira</i>	12
2.2 PENEIRAMENTO E CLASSIFICAÇÃO	13
2.2.1 <i>Peneiramento</i>	13
2.2.2 <i>Classificação</i>	14
2.3 CONCENTRAÇÃO	16
2.3.1 <i>Classificação/separação quanto à composição</i>	17
2.3.2 <i>Catação</i>	19
2.3.3 <i>Separação magnética</i>	20
2.3.4 <i>Concentração gravítica</i>	20
2.3.5 <i>Separação em meio denso</i>	22
2.3.6 <i>Flotação</i>	23

Capítulo 3	24
3. Propriedades dos agregados reciclados	24
3.1 COMPOSIÇÃO	24
3.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA	28
3.3 MASSA ESPECÍFICA	31
3.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, MÓDULO DE ELASTICIDADE E RESISTÊNCIA À ABRASÃO	34
3.5 OUTRAS PROPRIEDADES	36
3.5.1 <i>Granulometria, teor de finos e de materiais pulverulentos</i>	36
3.5.2 <i>Forma, textura superficial dos grãos e aderência</i>	38
3.5.3 <i>Atividade pozzolânica</i>	40
Capítulo 4	42
4. Propriedades dos concretos confeccionados com agregados reciclados	42
4.1 CONSISTÊNCIA	42
4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	47
4.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE	51
4.4 DURABILIDADE	53
Capítulo 5	57
5. Materiais e métodos	57
5.1 PLANEJAMENTO DA PARTE EXPERIMENTAL	57
5.2 MATERIAIS COMPONENTES	61
5.2.1 <i>Agregados reciclados</i>	61
5.2.2 <i>Agregados naturais</i>	69
5.2.3 <i>Aglomerante</i>	70
5.2.4 <i>Água</i>	71
5.2.5 <i>Aditivo</i>	71
5.3 ENSAIOS REALIZADOS NOS AGREGADOS	72
5.4 MATERIAL CONCRETO	73
5.4.1 <i>Composição</i>	73
5.4.2 <i>Preparo, moldagem e cura dos concretos</i>	75
5.5 ENSAIOS REALIZADOS NOS CONCRETOS	76
5.5.1 <i>Consistência, resistência à compressão e módulo de elasticidade</i>	76
5.5.2 <i>Absorção de água, índice de vazios e tempo de permeabilidade ao ar</i>	77
Capítulo 6	80

6.	Resultados e discussão	80
6.1	COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS AGREGADOS	80
6.1.1	<i>Agregados miúdos</i>	80
6.1.2	<i>Agregados graúdos</i>	83
6.2	PROPRIEDADES DOS CONCRETOS (1ª ANÁLISE)	87
6.2.1	<i>Consistência</i>	87
6.2.2	<i>Resistência à compressão</i>	90
6.2.3	<i>Módulo de elasticidade</i>	95
6.2.4	<i>Absorção de água, índice de vazios e tempo de permeabilidade ao ar</i>	99
6.3	PROPRIEDADES DOS CONCRETOS (2ª ANÁLISE)	107
6.3.1	<i>Resistência à compressão</i>	107
6.3.2	<i>Absorção de água</i>	114
6.3.3	<i>Índice de vazios</i>	120
Capítulo 7		125
7.	Conclusões	125
7.1	CONCLUSÕES	125
7.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	129
Referências		130
Obras consultadas		138

Capítulo 1

Introdução

As diferenças entre as propriedades dos agregados reciclados e naturais representam empecilhos não só à sua utilização como também à confiabilidade dos mesmos em aplicações de maior valor agregado, como é o caso de concretos e argamassas, e aplicações de maior responsabilidade, como é o caso dos concretos estruturais. São exemplos dessas diferenças a heterogeneidade da composição (diversidade de fases constituintes) e a menor resistência mecânica.

Outro aspecto que dificulta o uso dos agregados reciclados em concretos é a sua variabilidade, consequência da variabilidade da composição e também do próprio processo de beneficiamento do RCD (equipamentos, a ausência ou presença de uma ou outra operação unitária, o tipo de unidade recicladora etc.).

A variabilidade dos agregados reciclados ocorre em várias de suas propriedades e é claramente percebida na literatura. Ao estudar o beneficiamento de RCDs na usina de Santo André (SP), Angulo (2000) constatou variabilidade da proporção entre agregados miúdos e graúdos gerados, da composição dos agregados graúdos, da granulometria, do teor de materiais pulverulentos (material passante na peneira #0,075 mm), da massa específica e da absorção de água das fases que compunham a fração mineral graúda, além do índice de forma. Por causa dessa variabilidade e demais particularidades dos agregados reciclados, os mesmos normalmente não atendem às especificações das normas usualmente destinadas aos agregados naturais (QUEBAUD et al., 1999). Também os métodos de ensaio são estabelecidos por essas normas, e seu uso com agregados reciclados pode incorrer em imprecisões na caracterização destes, o que decerto contribui mais ainda para que os mesmos sejam rotulados como “fora de especificação”.

A consequência das peculiaridades dos agregados reciclados no concreto é que este, além de estar propenso a apresentar variabilidade em suas propriedades, tende a ser menos trabalhável, menos resistente, mais deformável (menor módulo de elasticidade), mais poroso e mais permeável.

Por falta de um parâmetro que sirva de índice de qualidade para os agregados reciclados, estudos têm abordado diferentes formas de utilizá-los. Uma delas é a sua utilização apenas como substituto de parte do agregado natural (miúdo e/ou graúdo), de forma a não afetar tanto as propriedades do concreto. Outra forma vem a ser a investigação do efeito de várias composições do agregado sobre as propriedades do concreto, como que buscando uma composição ideal, ótima.

É provavelmente baseado nesta segunda vertente que outros estudos, normas ou recomendações têm proposto ou estabelecido formas de classificar os agregados reciclados ou o RCD de origem segundo a presença percentual de cada fase (concreto, argamassas, cerâmica vermelha etc.). Essa classificação é feita de forma visual e a definição das melhores categorias parte do princípio de que agregados contendo materiais tidos como mais resistentes, como o concreto, por exemplo, são também mais resistentes e, assim, podem ser usados em aplicações de maior importância. Uma das razões pelas quais concretos são vistos como fase mais resistente é que em sua composição estão presentes rochas.

A classificação baseada em critérios visuais é falha em razão de cada fase do RCD ter sua própria variabilidade. É possível encontrar, por exemplo, concretos de diferentes resistências, produzidos com diferentes relações a/c, diferentes teores de agregado graúdo, o qual, por sua vez, é oriundo de rochas de diferentes resistências. No intuito de assegurar uma menor variação das categorias no que se refere à resistência, normas e recomendações têm definido critérios adicionais a serem cumpridos pelos agregados; valores de absorção de água, por exemplo.

Por trás dos critérios adicionais relacionados comumente à absorção de água, massa específica ou valores de abrasão *Los Angeles* está um importante princípio dado pela Ciência dos Materiais que é a relação inversamente proporcional existente entre a porosidade e a resistência mecânica de um material. Essa relação é válida para vários materiais, inclusive o concreto e cerâmicas (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

No concreto, sua resistência, durabilidade, retração e permeabilidade sofrem influência direta do número, tipo, tamanho e distribuição dos poros presentes nos agregados, na pasta de cimento e na zona de transição (BASHEER et al., 2001).

No caso dos agregados, características físicas, como volume, tamanho e distribuição de poros são comumente mais importantes que a composição mineralógica e a composição química. A porosidade do agregado afeta outras de suas propriedades, que, por sua vez, influenciam várias propriedades do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994; SBRIGHI NETO, 2005). Duas dessas propriedades refletem bem o nível de porosidade do agregado e são de relativamente fácil determinação: a absorção de água e a massa específica; e, por isso, as mesmas têm sido usadas como parâmetros adicionais no controle da qualidade dos agregados reciclados em normas e recomendações como as citadas em Angulo (2005), Grübl e Rühl (1998) e Lima (1999).

Diante do exposto, vê-se que a porosidade é uma propriedade com grande potencial para servir como parâmetro de controle do agregado reciclado, podendo ser monitorada por meio de sua massa específica e/ou absorção de água. O estudo de Carrijo (2005), complementado pelo de Angulo (2005), vem comprovar essa tendência. Nessa pesquisa realizada em escala de laboratório, as propriedades de concretos contendo agregados graúdos de RCD reciclado separados por faixas de massa específica apresentaram uma maior relação com esta propriedade do que com o rótulo de “agregado cinza” ou “agregado vermelho”, demonstrando, assim, a falibilidade do sistema de classificação visual. Os concretos apresentaram melhoria de suas propriedades (maior resistência à compressão, maior módulo de elasticidade etc.) à medida que a massa específica dos agregados reciclados cresceu.

A tecnologia para se efetuar em grande escala a separação dos agregados reciclados em faixas de massa específica já está disponível e vem sendo aplicada em usinas de reciclagem na Europa e nos EUA por meio do uso de equipamentos denominados jigsawes. Não há, no entanto, um método ou tecnologia mais simples que possa ser empregado em situações onde não se dispõe da jigsawagem ou de outras formas de separação densitária para os agregados reciclados. Com o intuito de suprir essa deficiência, este estudo tem como um dos objetivos propor um método que pode vir a ser empregado em obras na avaliação da porosidade (resistência) de agregados graúdos reciclados.

O presente estudo também vem dar continuidade à pesquisa com RCDs na Ufal, que tem como trabalhos recentes o estudo de um protótipo de habitação popular construída com blocos produzidos com agregado de RCD reciclado¹ e o Projeto Desentulho para a cidade de Maceió (Gomes et al., 2005), ambos tendo a participação do curso de engenharia civil da Ufal. Foi durante a realização deste último que o RCD usado neste trabalho foi coletado.

1.1 Objetivos

O objetivo principal do presente trabalho é analisar algumas das propriedades do concreto produzido com agregados de RCD reciclado que permitam caracterizá-lo quanto à possibilidade de aplicação como material estrutural.

Em relação aos objetivos específicos, são eles:

- a) propor um método de manipular a resistência de agregados graúdos reciclados através de sua massa específica;
- b) estudar a influência do consumo de cimento–relação a/c sobre as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto produzido com agregados de RCD reciclado;
- c) estudar a influência da massa específica do agregado graúdo de RCD reciclado sobre as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto;
- d) estudar a influência do tipo de agregado miúdo (natural ou reciclado a partir de RCD) sobre as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto;
- e) determinar, através de experimento fatorial, quais parâmetros da composição dos concretos exercem efeito significativo sobre suas propriedades mecânicas e de durabilidade;

1.2 Estrutura da dissertação

A dissertação encontra-se dividida em 7 capítulos:

- 1) Capítulo 1: introdução do trabalho, onde é apresentado um breve estado da arte sobre o estudo das propriedades dos agregados reciclados. Constan

¹ FARIAS, Rômulo Silva; LIMA, Flávio Barboza de. Avaliação de desempenho de um protótipo de habitação popular executado com blocos de concreto obtido da reciclagem de resíduos de construção e demolição. Maceió: Fapeal, 2005. Relatório de Pesquisa.

também deste capítulo a relevância do tema, o objetivo principal e os objetivos específicos do trabalho;

- 2) Capítulo 2: revisão bibliográfica sobre a tecnologia empregada no beneficiamento do RCD, tratando dos equipamentos e das operações unitárias comumente usadas no processo;
- 3) Capítulo 3: revisão bibliográfica sobre as principais propriedades dos agregados reciclados, ressaltando a variabilidade das mesmas e sua relação com a porosidade;
- 4) Capítulo 4: revisão bibliográfica sobre algumas das propriedades dos concretos produzidos com agregados reciclados. São abordadas as mesmas propriedades analisadas no programa experimental, que são as principais propriedades do compósito cuja mensuração permite avaliá-lo quanto ao possível uso em estruturas;
- 5) Capítulo 5: apresenta os métodos usados na execução da parte experimental, desde os métodos de ensaio dos agregados e dos concretos até os métodos de análise dos resultados das propriedades dos concretos. Também se encontram lá descritos os materiais empregados nos experimentos;
- 6) Capítulo 6: comparação entre as propriedades dos agregados reciclados e naturais, bem como análise dos resultados dos experimentos realizados nos concretos;
- 7) Capítulo 7: conclusões do trabalho e sugestões para a continuação das pesquisas.

Capítulo 2

TECNOLOGIA EMPREGADA NA TRANSFORMAÇÃO DO RCD EM AGREGADO

O processo de beneficiamento do RCD nas usinas recicladoras e nas obras é semelhante em termos de etapas e tipos de equipamento usados. Porém, usinas apresentam vários portes e complexidades, a depender do volume e da variabilidade do RCD recebido, demanda pelos agregados reciclados e características desejadas para o produto (LIMA, 1999; ALTHEMAN, 2002).

A transformação do RCD em agregado nas usinas não é muito diferente do processo de obtenção de agregados naturais e, portanto, os equipamentos utilizados na produção destes podem ser diretamente usados, ou adaptados, se necessário, à reciclagem do resíduo de construção e demolição (LIMA, 1999). Dessa forma, a linha de produção de agregados reciclados consiste em nada mais que operações unitárias empregadas pela engenharia de minas no tratamento de minérios: cominuição (fragmentação), separação de tamanho e concentração.

John et al. (2006) relacionam operações e alguns dos equipamentos usados em onze usinas fixas brasileiras. Na maioria delas, a operação de cominuição faz uso de um britador de impacto; a separação de tamanho é feita através de peneiramento em grande parte delas; a concentração é feita através de catação manual em todas as usinas, em conjunto com uma separação magnética em seis delas. Aparecem como operações auxiliares o transporte através de correia em quase todas as usinas, e o abatimento de poeira em três delas.

As operações unitárias e os equipamentos exercem influência sobre a classificação e composição, teor de impurezas, granulometria, forma e resistência dos grãos dos agregados reciclados (LIMA, 1999). Não só esta última característica mas também a classificação e a composição guardam relação com a massa específica, conforme se verá nas seções e capítulos seguintes.

Apesar da grande importância da resistência, as outras propriedades dos agregados também merecem atenção, pois são igualmente capazes de influenciar as propriedades dos concretos. Assim, a seguir são apresentadas operações unitárias e exemplos de equipamentos usados no beneficiamento do RCD, bem como suas influências sobre as propriedades do agregado reciclado.

2.1 Cominuição

A cominuição, ou fragmentação, é conseguida por meio de mecanismos físicos de compressão (esmagamento), impacto, atrito, cisalhamento ou combinação entre eles (PENNSYLVANIA CRUSHER, 2003; FIGUEIRA et al., 2004). Alguns autores consideram ainda a abrasão, mas importante somente em alguns casos especiais de moagem (FIGUEIRA et al., 2004).

Esta operação unitária pode ser feita por britagem ou moagem. Na reciclagem do RCD, a britagem é usada em geral quando se pretende obter majoritariamente grãos de maior dimensão (agregados graúdos). Já a moagem parece ser mais usada em obras, quando se visa obter principalmente grãos mais finos (agregados miúdos) para a produção de argamassas².

É comum haver a necessidade de submeter o RCD à fragmentação uma segunda vez utilizando-se o mesmo equipamento de cominuição ou um outro, o qual pode usar o mesmo mecanismo físico ou não. Isso irá depender da granulometria que se deseja para o agregado e também do tipo de equipamento usado. Surge então, no caso do uso de britadores, termos como britador/britagem primário(a) ou secundário(a).

Os equipamentos de cominuição comumente usados em usinas são o britador de impacto e o de mandíbulas; em obras são os britadores de mandíbula de pequeno porte e os moinhos-argamassadeiras. Além destes existem outros tipos não tão comuns. São exemplos o britador giratório – semelhante ao britador cônico, mas com a carcaça externa invertida, usado em algumas plantas de reciclagem na Dinamarca (COELHO, 2001 apud BUTTLER, 2003), e os moinhos usados em obra somente para fragmentação e que não permitem preparo de argamassa no mesmo equipamento (LEITE, 2001; ALTHEMAN, 2002).

² A usina de Londrina (PR) usa, além de um britador de impacto, um moinho de martelos (JOHN et al., 2006).

Como se verá, o processo de cominuição influi na granulometria, na forma e na resistência dos grãos dos agregados obtidos.

2.1.1 Britador de mandíbulas

O britador de mandíbulas fragmenta o material através da força de compressão (esmagamento) aplicada por uma ou duas superfícies (mandíbulas) (Figura 2.1b). É muito usado na britagem primária.

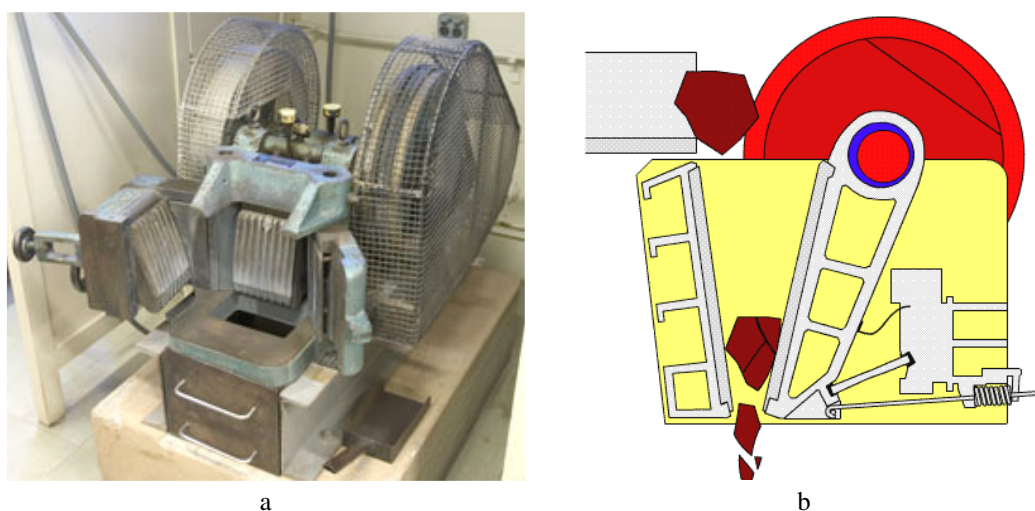


Figura 2.1: Britador de mandíbula de pequeno porte (a) (<http://rses.anu.edu.au/facilities>) e detalhe de seu mecanismo (b) (www.chmprojects.com).

Algumas das características do britador de mandíbulas:

- permite a obtenção de melhores curvas granulométrica para agregado a ser usado em concreto, quando o resíduo processado é de concreto estrutural (HANSEN, 1992 apud LIMA, 1999);
- fragmenta apenas uma pequena quantidade do agregado original do concreto britado (HANSEN, 1992 apud LEITE, 2001);
- produz grande porcentagem de grãos – apenas cerca de 20% de finos ficam abaixo de 4,8 mm (HANSEN, 1992 apud LEITE, 2001; LIMA, 1999).

Segundo Leite (2001), não há consenso quanto à forma dos grãos dos agregados obtidos, pois cita que Hansen (1992) e Hendriks et al. (1998) apontam vantagem em relação à forma, enquanto Lima (1999) afirma que eles se mostram lamelares com tendência à baixa qualidade em virtude de apresentarem linhas de fratura muito pronunciadas. Contudo, Figueira et al. (2004) afirmam que o britador de mandíbulas é pouco adequado para materiais com tendência a produzir partículas lamelares, e Levy

(2001), ao usar este equipamento em seu estudo, constatou a presença de grãos lamelares tanto nos agregados de concreto quanto nos agregados de alvenaria de tijolos cerâmicos – mas em maior quantidade nestes últimos.

A ThyssenKrupp produz dois britadores de mandíbula em que o movimento desta difere de um para o outro (Figura 2.2). É possível que tal funcionamento influa na forma dos grãos obtidos, pois no britador de eixo duplo (Figura 2.2b) a mandíbula apenas executa uma ação de esmagamento do material enquanto que no britador de eixo único (Figura 2.2a) a mandíbula também executa uma ação de fricção no material (PENNSYLVANIA CRUSHER, 2003).

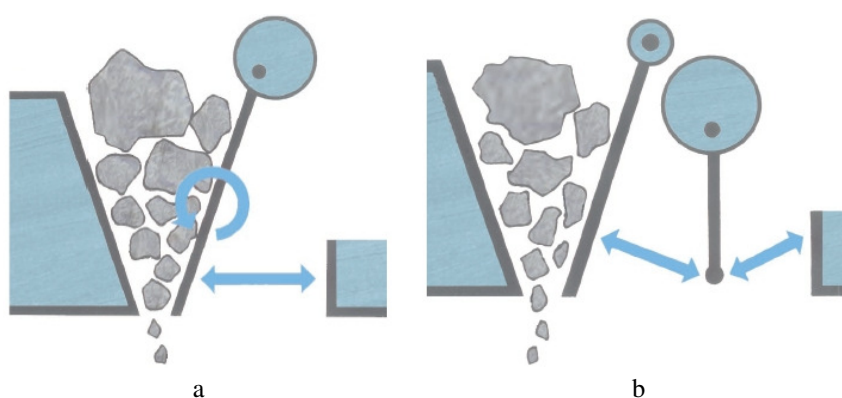


Figura 2.2: Detalhe de funcionamento do britador de mandíbula tipo eixo único (*single-toggle*) (a) e eixo duplo (*double-toggle*) (b) (THYSSENKRUPP, 2006).

2.1.2 Britador de impacto

O britador de impacto fragmenta o material através do impacto de martelos maciços fixos a um rotor e do choque contra placas de impacto fixas (Figura 2.3) (LIMA, 1999). É usado tanto em britagem primária como secundária (ANGULO, 2005; LIMA, 1999). Muitas vezes é o único britador usado.

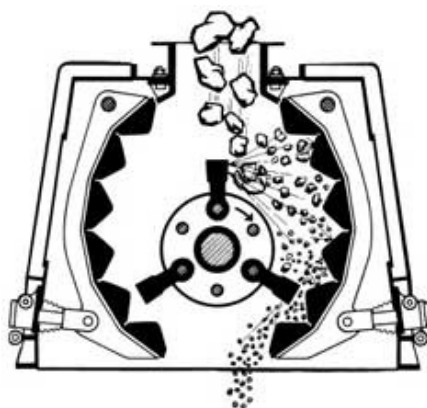


Figura 2.3: Detalhe do funcionamento de um britador de impacto (PENNSYLVANIA CRUSHER, 2003).

Algumas das características do britador de impacto:

- proporciona grande redução das dimensões do material britado, gerando um agregado bem graduado, com grãos de tamanho e forma semelhantes, e boa quantidade de finos, o que muitas vezes dispensa a britagem secundária (FIGUEIRA et al., 2004; PENNSYLVANIA CRUSHER, 2003; LIMA, 1999; SYMONDS, 1999);
- gera grãos de forma cúbica e arestas vivas, com boas características mecânicas, pois neste equipamento as partículas se partem nas linhas naturais de ruptura, gerando grãos mais íntegros (PENNSYLVANIA CRUSHER, 2003; LIMA, 1999; SYMONDS, 1999);

Segundo Hansen (1992 apud LEITE, 2001), devido a sua distribuição granulométrica, os agregados produzidos nesse britador são mais apropriados ao uso em obras de pavimentação.

2.1.3 Britador de cone ou britador cônico

Fragmenta o material através da força de compressão advinda da aproximação e distanciamento do cone central em relação à carcaça externa (Figura 2.4), inclusive em movimentos verticais para cima e para baixo (FIGUEIRA et al., 2004).

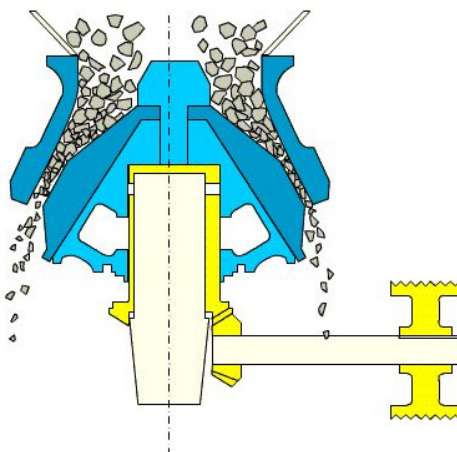


Figura 2.4: Detalhe do funcionamento do britador cônico (www.aggdesigns.com, 2006).

O britador cônico só processa materiais com diâmetro máximo de 20 cm, o que faz com que o equipamento seja mais apropriado à britagem secundária (HANSEN, 1992 apud LEITE, 2001).

De acordo com Brito Filho (1999 apud LEITE, 2001), TRIO (2006) e THYSSENKRUPP (2006), o britador de cone dá origem a agregados com grãos cúbicos, no entanto, gera uma quantidade excessiva de finos. Ainda segundo o fabricante TRIO (2006), o aumento na velocidade de operação de seus britadores é capaz de tornar os grãos ainda mais cúbicos.

2.1.4 Moinho de martelos

O material é fragmentado de uma forma um tanto similar à britagem por impacto: inicialmente, choca-se com os martelos maciços fixos ao rotor e com a superfície interna da câmara (Figura 2.5). Entretanto, no fundo da câmara há uma grade que funciona como uma peneira, só permitindo passar aqueles grãos que já foram reduzidos a um tamanho inferior à sua abertura (FIGUEIRA et al., 2004; LIMA, 1999). Nessa região, a fragmentação dos grãos ocorre por atrito e cisalhamento (PENNSYLVANIA CRUSHER, 2003). Em alguns moinhos, a retirada da grade inferior os transforma num britador de impacto.

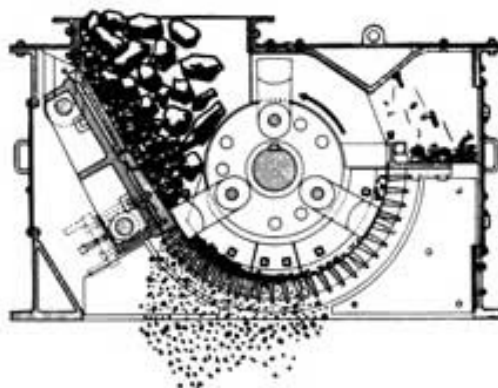


Figura 2.5: Detalhe do funcionamento do moinho de martelos (PENNSYLVANIA CRUSHER, 2003).

Em virtude da abertura da entrada de materiais ser relativamente pequena e de produzir alta porcentagem de miúdos (PENNSYLVANIA CRUSHER, 2003; LIMA, 1999), o equipamento é mais usado na britagem secundária, geralmente em conjunto com britadores de mandíbula (LIMA, 1999). Há moinhos de martelo de pequeno porte que podem ser usados em obra.

De acordo com PENNSYLVANIA CRUSHER (2003), moinhos de martelo produzem grãos cúbicos com um mínimo de planos e lascas.

2.1.5 Moinho-argamassadeira

Faz a fragmentação por meio de compressão (esmagamento) aplicada por rodas metálicas pesadas, que passam sobre o material. No mesmo compartimento (caçamba) onde é feita a moagem, faz-se a preparação de argamassas (Figura 2.6).



Figura 2.6: Moinho-argamassadeira da marca ANVI (MIRANDA; SELMO, 2006).

É também conhecido como moinho de rolo ou moinho de galgas e é usado somente para reciclagem na própria obra. O equipamento permite uma boa cominuição

de materiais menos resistentes, como restos de alvenaria e argamassas (GONÇALVES, 2001; LIMA, 1999; PINTO, 1999).

2.2 Peneiramento e classificação

As duas operações têm a finalidade de separar o material em frações de diferentes tamanhos, sendo que, segundo Carrisso e Correia:

No peneiramento existe uma separação segundo o tamanho geométrico das partículas, enquanto que na classificação a separação é realizada tomando-se como base a velocidade que os grãos atravessam um meio fluido. No processamento mineral o meio fluido mais utilizado é a água. A classificação a úmido é aplicada, habitualmente, para populações de partículas com granulometria muito fina onde o peneiramento não funciona de forma eficiente (2004, p. 197).

2.2.1 Peneiramento

O peneiramento é a operação de separação de tamanho mais usada nas usinas recicladoras e é realizado a seco ou a úmido, sendo o primeiro método o mais comum.

Na maioria dos casos, visa separar os agregados em duas frações principais: agregado miúdo ($D < 4,75$ mm) e agregado graúdo ($D \geq 4,75$ mm). No entanto, é possível encontrar usinas que utilizam diâmetro de corte diferente ou que dividam a fração graúda em subfrações como é o caso da usina de Itaquera (SP), a qual usa peneiras de abertura igual a 40 mm e 20 mm (CARRIJO, 2005).

O peneiramento a úmido utiliza água para facilitar a passagem dos finos do material peneirado através da tela de peneiramento (CARRISSO; CORREIA, 2004). A água também auxilia o desprendimento da fração fina, pulverulenta, que fica aderida aos grãos da fração graúda (KELLY; SPOTTISWOOD, 1982 apud ANGULO, 2005).

O tipo de peneira mais usado nas usinas brasileiras é a peneira vibratória (Figura 2.7a), contudo, as usinas de Londrina (PR) e Gentil (SP) utilizam peneira rotativa (Figura 2.7b), também conhecida como *trommel* (CARRISSO; CORREIA, 2004; LATTERZA, 1998; LEVY, 2005).



Figura 2.7: Peneiras (a) vibratória de uso industrial (www.mining-technology.com, 2006) e (b) trommel da usina de Gentil (SP) (LEVY, 2005).

Além de influenciar a granulometria do agregado obtido, a etapa de peneiramento pode interferir na composição do mesmo, atuando como operação de concentração. É o caso de processos de beneficiamento que através de peneiramento anterior à cominuição eliminam a parte fina do RCD – $D < 8$ ou 10 mm, por exemplo – em virtude da mesma frequentemente conter contaminantes, como partículas friáveis e matéria orgânica (LIMA, 1999).

2.2.2 Classificação

Nota-se a partir de vários trabalhos (ANGULO, 2000; COSPER et al., 1993; HARRIS, 1988; KOHLER; KURKOWSKI, 1998; LIMA, 1999; TRÄNKLER et al., 1996) que a classificação em usinas recicladoras é mais usada como uma etapa de remoção de impurezas do agregado graúdo reciclado do que como uma etapa de separação de tamanhos.

As impurezas seriam materiais que tendem a se concentrar nas frações finas e que não são apropriados à reciclagem como agregados, tais como papéis, plásticos, espumas, madeira e outros, podendo ser também substâncias químicas contaminantes. Além de remover as impurezas, que geralmente são materiais mais leves, a classificação também remove parte da fração mais fina dos agregados, inclusive parte daquela aderida aos grãos maiores.

É realizada após a fragmentação ou após o peneiramento que sucede à fragmentação, e, em muitas usinas de reciclagem, é feita a seco por meio de

classificadores a ar que fazem uso de uma corrente de ar horizontal ou vertical ascendente (Figura 2.8).

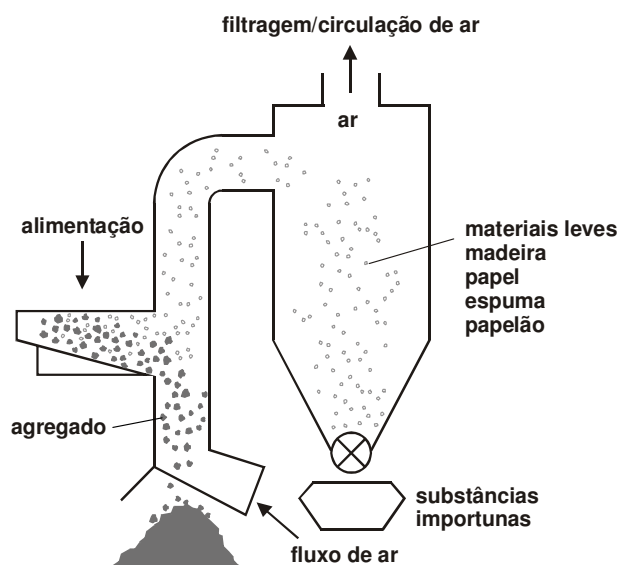


Figura 2.8: Esquema de funcionamento de um classificador a ar vertical (KOHLEK; KURKOWSKI, 1998, modificado).

Outro classificador a seco também usado em usinas para remover materiais mais leves que a fração mineral reciclável do RCD é o ciclone a ar (Figura 2.9) (COSPER et al., 1993; DOLAN et al., 1999; HADJIEVA-ZAHARIEVA et al., 2003; POON, 1997).

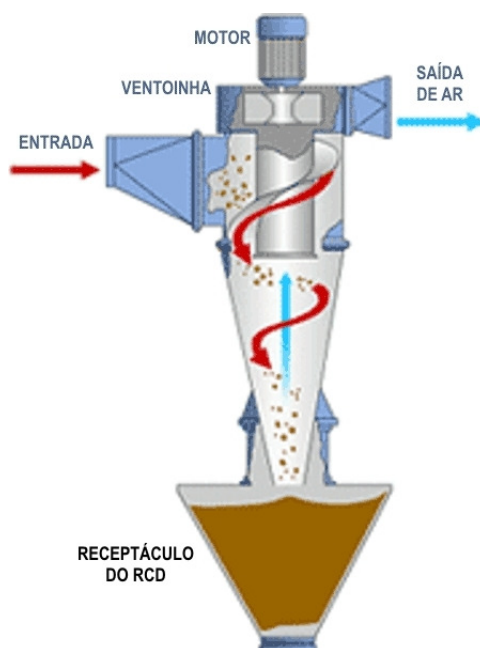


Figura 2.9: Esquema de funcionamento de um classificador do tipo ciclone a ar (www.dustcollectorexports.com, 2006, modificado).

Um classificador usado para remover frações finas do agregado reciclado ($D < 0,15 \text{ mm}$) é o classificador espiral (Figura 2.10), o qual opera com água (HANISCH, 1998 apud ANGULO, 2005). O material mais fino transborda pela parte inferior da calha enquanto que o material mais pesado é transportado pelas hélices, sendo descarregado na parte superior. O nível de inclinação de todo o conjunto é uma das variáveis do processo (CARRISSO; CORREIA, 2004).



Figura 2.10: Classificador espiral (www.nawaengineers.com, 2006).

A classificação a úmido tem uma vantagem sobre a versão a seco: proporciona um efeito de lavagem dos agregados e, com isso, remove substâncias que podem ser prejudiciais, tais como cloretos e sulfatos (TRÄNKLER et al., 1996). Porém, o mesmo autor verificou que, apesar da lavagem proporcionada pela classificação a úmido conseguir retirar substâncias químicas nocivas presentes no agregado, a remoção das frações finas, quer seja através de peneiramento ou de classificação, é a operação mais eficiente em eliminar esses contaminantes.

Vê-se, assim, que a etapa de classificação, assim como o peneiramento, influencia a granulometria e a composição do agregado reciclado, também atuando como operação de concentração.

2.3 CONCENTRAÇÃO

No tratamento de minérios a operação de concentração é usada para tornar o minério mais concentrado, mais rico, na espécie mineral de interesse, removendo a ganga, a qual consiste no mineral ou conjunto de minerais não aproveitados. Essa separação seletiva dos minerais baseia-se nas diferenças entre suas propriedades, das

quais se destacam o peso específico, a suscetibilidade magnética, a condutividade elétrica, as propriedades químicas de superfície, a cor, a radioatividade, a forma e ainda outras (LUZ; LINS, 2004).

De forma semelhante, usa-se a concentração para tornar o RCD ou o agregado de RCD reciclado mais rico na(s) fração(ões) de interesse, que pode ser o conjunto de todos os materiais de origem cerâmica, somente a fase concreto, somente os materiais com massa específica acima de determinado valor etc..

Além das operações originalmente concebidas para esse fim, outras atividades comuns usadas no beneficiamento do RCD podem também funcionar como operações de concentração. Dessa forma, atuam com o intuito de concentrar o RCD ou o agregado não só a separação magnética, a concentração gravítica, a separação em meio denso e a flotação mas também a classificação/separação quanto à composição, o peneiramento e classificação e a catação (ANGULO et al., 2003; ANGULO, 2005; CARRIJO, 2005; HADJIEVA-ZAHARIEVA et. al, 2003; KOHLER; KURKOWSKI, 1998; LUZ; LINS, 2004; POON, 1997). As operações de peneiramento e classificação já foram comentadas anteriormente quanto à capacidade de concentrar; a seguir são comentadas outras operações.

2.3.1 Classificação/separação quanto à composição

Consiste em separar o resíduo em classes que englobem materiais com um mesmo atributo (recicláveis ou não, recicláveis para um mesmo fim, natureza, propriedade etc.). Em geral, é realizada por análise visual.

No Brasil, a resolução 307 (2002) do Conama estabelece quatro categorias, A a D, em que deve ser classificado o RCD, sendo as duas primeiras recicláveis. A classe A é composta de materiais de origem mineral, como argamassas, concretos, restos de pavimentos asfálticos, solos e materiais cerâmicos e, por isso, é frequentemente referida como fração mineral do RCD. Entretanto, a parte da fração mineral reciclável como agregado para uso em novos concretos e argamassas não inclui os restos de pavimentos asfálticos e os solos. Essa classificação, em termos gerais, distingue apenas os materiais quanto ao fato de serem recicláveis ou não e se o são para um mesmo fim ou não.

A classificação proposta por Lima (1999) para o RCD (Tabela 2.1) chega a ser mais detalhada, distinguindo os materiais quanto à natureza/origem e indicando seu campo de aplicação. Pode-se perceber que nessa classificação parece estar embutido o

conceito de resistência potencial atrelada à natureza de cada fase. Dessa forma, os materiais são tidos como mais resistentes na seguinte ordem decrescente: concreto, argamassa e cerâmica (classes 1, 2 e 3, respectivamente).

Tabela 2.1: Sistema de classificação do RCD proposto por Lima (1999).

Classe	Composição	Aplicação
1	resíduo de concreto sem impurezas	concretos estruturais ou fabricação de pré-moldados, entre outros serviços
2	resíduo de alvenaria sem impurezas	concretos e argamassas, entre outros serviços
3	resíduo de alvenaria sem materiais cerâmicos e sem impurezas	produção de concretos e pré-moldados de concreto
4	resíduo de alvenaria com presença de terra e vegetação	pavimentos asfálticos (base e sub-base) ou cobertura simples de vias não pavimentadas
5	resíduo composto por terra e vegetação	cobertura de aterros, regularização de terrenos e outros serviços
6	resíduo com predominância de material asfáltico	serviços de pavimentação

Fonte: Lima (1999)

A resolução do Conama citada anteriormente recomenda que o RCD seja separado, preferencialmente, pelo gerador na origem. Nesse caso, a separação do resíduo em fases específicas da fração mineral – somente cerâmica vermelha ou argamassas, por exemplo – poderia ajudar a obter materiais um pouco mais homogêneos. A separação baseada em critérios visuais, no entanto, não é tão eficiente no sentido de conseguir agregados mais homogêneos quanto à resistência, por exemplo, porque é possível encontrar no RCD argamassas, concretos e cerâmicas de diferentes resistências.

Deixando-se de separar o material na fonte, repassa-se o papel às centrais de triagem ou usinas recicladoras, e então, nesse ponto do caminho, a maior heterogeneidade de fases poderia dificultar ou inviabilizar a triagem dos materiais.

Um exemplo prático da baixa eficiência da classificação por análise visual da composição é a separação adotada nas usinas de Itaquera (SP) e Vinhedo (SP): agregados cinzas, em que há predominância de materiais à base de cimento e; vermelhos, em que há predominância de cerâmica vermelha. Tal separação é apontada

como injustificável por Angulo (2005) em virtude dos teores médios de cerâmica vermelha nos agregados graúdos sequer ultrapassarem o valor de 24,2%.

2.3.2 Catação

A catação é uma operação, geralmente manual, realizada com o intuito de remover os contaminantes do RCD (Figura 2.11). Os contaminantes podem ser materiais não minerais inúteis à reciclagem como agregado, ou podem ser até mesmo um dos componentes da fração mineral do RCD que aparecem junto de uma fase específica a qual se quer reciclar separadamente, como seria o caso de fragmentos de cerâmica contaminando um resíduo de concreto.

A operação pode ser feita antes ou após a fragmentação do resíduo. Quando realizada após a fragmentação, a catação manual apresenta a desvantagem de os contaminantes poderem se apresentar em pequenos pedaços e, portanto, mais difíceis de serem identificados.



Figura 2.11: Área destinada à catação manual e separação magnética dos agregados reciclados na usina de Campinas (SP). As operações acontecem após a fragmentação do RCD (LEVY, 2005).

Nos Estados Unidos e na Alemanha há usinas que combinam a catação manual com uma catação mecanizada (DOLAN et al., 1999).

Nem sempre a catação manual apresenta boa eficiência. As usinas norte-americanas que só fazem uso desse tipo de catação normalmente estão limitadas a só conseguir remover papelão, madeira e metais (DOLAN et al., 1999). Além disso, a

catação manual é um processo desagradável e potencialmente perigoso para as pessoas envolvidas (SYMONDS, 1999).

2.3.3 Separação magnética

A separação magnética tem por objetivo remover os contaminantes de natureza metálica e pode ser realizada antes ou após a fragmentação.

Na Figura 2.11 pode-se ver o separador magnético usado na usina de Campinas (SP).

De acordo com Sampaio e Luz (2004), os materiais metálicos tanto podem ser atraídos quanto repelidos (materiais diamagnéticos) pelo campo magnético. Aqueles fortemente atraídos são chamados ferromagnéticos enquanto que aqueles fracamente atraídos são chamados paramagnéticos. Diante dessa diferença de comportamento, infere-se que a separação magnética não é capaz de remover todo o tipo de contaminante metálico presente no RCD, uma vez que nem todos eles são ferromagnéticos ou paramagnéticos.

2.3.4 Concentração gravítica

No processo de concentração gravítica, as “partículas de diferentes densidades, tamanhos e formas são separadas uma das outras por ação da força da gravidade ou por forças centrífugas” (LINS, 2004, p. 241).

No beneficiamento do RCD o equipamento mais usado para tal finalidade é o jig (Figura 2.12), pelo que se pode notar a partir de Angulo (2005), Carrijo (2005), Jungmann (1997), Kohler e Kurkowski (1998), Leite (2001) e Mesters e Kurkowski (1997). A jigagem é realizada após a cominuição, e certas usinas a realizam em agregados com $0 < D < 32$ mm sem submetê-los a um peneiramento prévio para retirada da fração fina (JUNGSMANN, 1997).

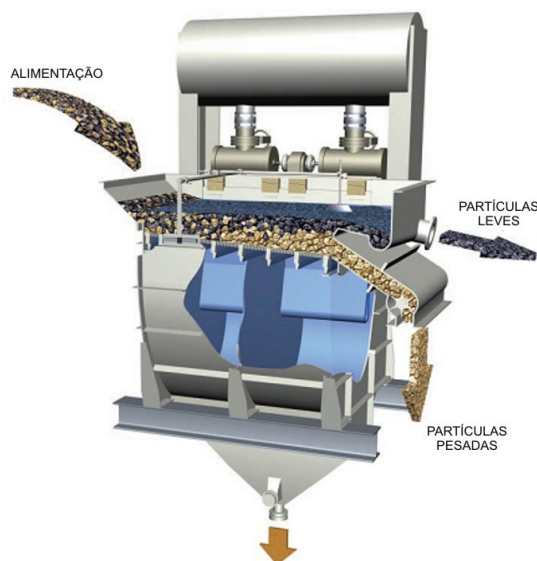


Figura 2.12: Esquema de funcionamento do jigge modelo alljig (www.allmineral.com, 2006).

O princípio de funcionamento dos jigues é a estratificação dos grãos de acordo com a massa específica (Figura 2.13) num leito pulsante de água onde atua a força da gravidade (JOHN et al., 2006; KOHLER; KURKOWSKI, 1998). Segundo Kohler e Kurkowski (1998), a eficiência da separação sofre influência de vários fatores, dentre eles a diferença de densidade entre os materiais, as partes maiores das frações de diferentes densidades, a forma da partícula e o tipo de movimento da água.

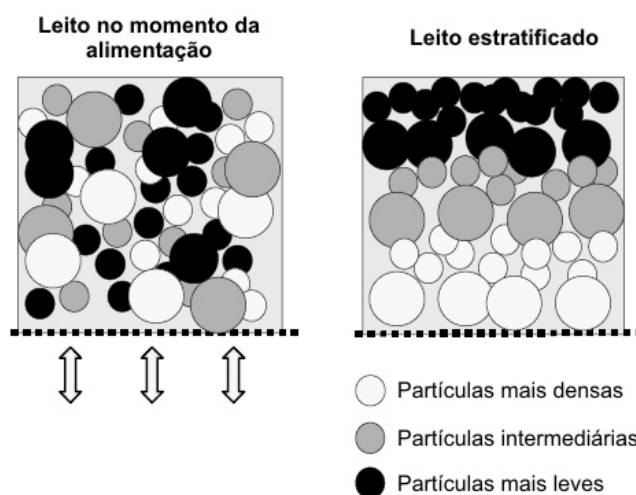


Figura 2.13: Esquema do leito de um jigge ideal processando carvão (DIEUDONNÉ et al., 2001, modificado).

O uso de algumas das operações citadas anteriormente que visam concentrar o RCD ou o agregado dele obtido nem sempre levam a um produto homogêneo visto que,

muitas vezes, elas atuam somente como operações de remoção de fases indesejáveis e nem sempre são 100% eficientes. Mesmo a classificação do RCD em resíduos de concreto, de alvenaria ou mistos não garante que os agregados reciclados tenham composição e propriedades físicas constantes (JOHN et al., 2006).

Angulo (2005) e Carrijo (2005) constataram que a porosidade do agregado reciclado tem mais significância que sua natureza mineral e influencia diretamente sua resistência, módulo de deformação, absorção e massa específica. Assim, uma separação desses agregados por densidade é, de forma indireta, uma separação por resistência mecânica dos grãos (JOHN et al., 2006). Isso mostra ser importante a realização da separação gravítica no beneficiamento do RCD, pois ela permitiria, inclusive, obter um agregado reciclado mais homogêneo. Agregados mais homogêneos, por sua vez, podem ser usados em aplicações de maior importância (MESTERS; KURKOWSKI, 1997).

De acordo com Kohler e Kurkowski (1998) e John et al. (2006) a jigagem também proporciona:

- separação de substâncias leves flutuantes como papel, madeira, espuma etc.;
- separação dos materiais com densidade menor que 2 g/cm³;
- efeito de lavagem sobre os agregados, removendo a fração pulverulenta aderida à superfície dos grãos e substâncias químicas contaminantes;
- redução do teor de finos;

A jigagem apresenta como desvantagem o grande consumo de água (2,42 m³/ton de agregado na Holanda, por exemplo). Entretanto, ela pode ser tratada e reutilizada no processo (JUNGSMANN, 1997).

2.3.5 Separação em meio denso

A separação em meio denso é mais um processo de separação gravítica usado no tratamento de minérios. O meio denso é constituído de líquidos orgânicos, soluções de sais inorgânicos ou de uma suspensão estável de densidade pré-estabelecida. A densidade do meio deve ser intermediária entre as dos materiais a serem separados, de forma que aqueles com densidade inferior flutuem e aqueles com densidade superior afundem (CAMPOS et al., 2004).

O uso da separação em meio denso é recomendada pela RILEM com a finalidade de separar e controlar o teor de partículas mais porosas presentes nos agregados reciclados (ANGULO et al., 2004). É uma técnica mais rápida que a catação,

pode ser usada com a fração miúda e também é uma forma de classificar a composição dos agregados reciclados (ANGULO et al., 2004; OIKONOMOU, 2005).

Certos meios densos podem inviabilizar a operação para grandes quantidades de agregados. Carrijo (2005) constatou que o uso de cloreto de zinco não permite separações dos agregados reciclados em densidades maiores que $2,2 \text{ g/cm}^3$, sem falar que mesmo depois de 96 horas imersos em água os agregados ainda apresentaram teor de cloretos solúveis suficiente para retardar o tempo de hidratação do cimento. A autora também constatou problemas no uso de bromofórmio visto que o vapor do mesmo é tóxico, o que faz necessário trabalhar em ambiente controlado (uma capela, por exemplo) ou bem ventilado.

2.3.6 Flotação

A flotação não é uma operação muito usada no beneficiamento do RCD pelo que se nota na literatura.

É empregada na remoção de impurezas leves, como, por exemplo, plástico, madeira e papel (COSPER et al., 1993; DOLAN et al., 1999; QUEBAUD; BUYLE-BODIN, 1999 apud ANGULO et al., 2001).

Capítulo 3

PROPRIEDADES DOS AGREGADOS RECICLADOS

Uma vez mostrada a tecnologia empregada na transformação da fração mineral do RCD em agregados para uso na construção, neste capítulo serão abordadas as propriedades dos agregados reciclados a fim de conhecê-los melhor visto que a utilização eficiente e confiável dos mesmos na produção de concretos estruturais exigirá um nível adequado de conhecimento das suas características e de suas respectivas influências sobre as propriedades do compósito.

Apesar das propriedades do agregado poderem ser estudadas separadamente, aquelas importantes para a tecnologia do concreto estão inter-relacionadas e podem assim ser agrupadas (MEHTA; MONTEIRO, 1994):

- a) Características dependentes da porosidade: massa específica, absorção de água, resistência, dureza, módulo de elasticidade e sanidade;
- b) Características dependentes das condições prévias de exposição e das condições de fabricação: tamanho, forma e textura das partículas;
- c) Características dependentes da composição química e mineralógica: resistência, dureza, módulo de elasticidade e substâncias deletérias presentes.

Ainda de acordo com Mehta e Monteiro (1994), em termos de relação com as propriedades do concreto, as propriedades do agregado podem assim ser agrupadas:

- a) influenciadoras do estado fresco: porosidade ou massa específica, composição granulométrica, forma e textura superficial;
- b) influenciadoras do estado endurecido: porosidade, composição mineralógica e outras propriedades dependentes destas.

3.1 Composição

A composição do resíduo de construção e demolição é bastante heterogênea e variável. Nela aparecem os mais diversos materiais usados na construção civil, em

diversas proporções. Apesar disso, a fração mineral reciclável como agregado para concretos e argamassas é bastante representativa como se pode ver na Tabela 3.1 e na Tabela 3.2.

Tabela 3.1: Exemplos de composição percentual de RCDs do Brasil e da Holanda.

Materiais	Origem				
	Recife ¹	Blumenau ² (em volume)	Salvador ³	Maceió ⁴	Holanda ⁵
Concreto e argamassa	38,0	18,4	53,0	46,5	21,0
Cerâmica	2,0	15,2	14,0	48,2	39,0
Cerâmica vermelha e argamassa	-	30,2	-	-	-
Rochas	9,0	0,8	5,0	-	-
Tijolo	17,0	-	-	-	14,0
Solo e areia	27,0	5,3	22,0	-	-
Cerâmica polida	-	5,6	-	3,1	-
Cerâmica polida e argamassa	-	9,7	-	-	-
Madeira	2,0	9,3	-	-	17,0
Gesso	4,0	-	-	-	-
Metal	1,0	0,2	-	-	-
Plástico	-	-	4,0	-	-
Podas	-	2,5	-	-	-
Outros	-	2,9	2,0	2,3	9,0
Total reciclável	93,0	85,1	94,0	97,7	74,0

Fonte: ¹Carneiro et al. (2004), ²Sardá e Rocha (2003), ³Carneiro et al. (2001), ⁴Vieira (2003), ⁵Bossink e Brouwers (1996) apud Carrijo (2005).

Notas: Alguns materiais foram somados a outros; "-" significa que o material não foi quantificado pelo autor (podendo estar dentro da classe "Outros") ou não foi encontrado no RCD.

Tabela 3.2: Composição percentual, segundo a Resolução Conama 307 (2002), de RCDs coletados no Lixão de Maceió e em pontos de deposição ilegal dentro da malha urbana da cidade.

Origem da amostra	% em massa das classes presentes na amostra			
	Classe A	Classe B	Classe C	Classe D
Misturado ¹	93,98	3,33	2,66	0,04
Construção	82,89	4,58	12,22	0,31
Reforma	98,56	0,66	0,78	0,00
8 depósitos ilegais na cidade	98,82	0,07	1,11	0,00
Média	93,56	2,16	4,19	0,09

Fonte: Gomes et al. (2005)

Nota: ¹resíduo oriundo de várias fontes: construção, demolição, reforma etc.

A heterogeneidade e variabilidade da composição do RCD são refletidas na composição do agregado obtido (Tabela 3.3 e Tabela 3.4). Por sua vez, a

heterogeneidade e variabilidade da composição do agregado reciclado resultarão numa variabilidade de suas propriedades (JOHN et al., 2006) já que cada fase possui suas próprias características e peculiaridades. Porém, de acordo com Pinto (1986) apud Angulo (2000), a variabilidade da composição do agregado é diferente da variabilidade da composição do RCD visto já ter sido comprovado que frações cerâmicas retidas majoritariamente na peneira de malha 25 mm, por exemplo, podem migrar em maior quantidade para as frações mais finas do agregado gerado, a depender do equipamento de cominuição, sem considerar que a diferença de resistência das fases do RCD poderia causar uma maior ou menor capacidade de redução dos seus grãos.

Tabela 3.3: Composição percentual, em massa, de vários agregados graúdos reciclados.

Materiais	Origem					
	Porto Alegre ¹		Usina de Ribeirão Preto/SP ^{2,*}			
	amostra 1	amostra 2	amostra A	amostra B	amostra C	amostra D
Argamassa	25,9	30,62	36,8	35,7	37,9	37,4
Concreto	15,9	14,49	19,8	21,6	21,5	21,1
Cerâmica	25,9	26,77	14,6	25,9	23,8	20,8
Rochas	31,9	27,72	27,4	13,4	12,4	17,7
Cerâmica polida	-	-	1,2	2,6	4	2,5
Outros	0,4	0,4	0,2	0,8	0,4	0,5

Fonte: ¹Leite (2001); ²Zordan (1997)

Nota: *amostras coletada no período de 26/set/1996 a 30/out/1996.

Normas e recomendações como as de Lima (1999) e as encontradas em Angulo (2005) usam a composição dos agregados reciclados como um dos parâmetros de controle dos mesmos. De acordo com a origem do RCD ou a presença percentual das fases, o agregado é indicado ou restrito ao uso em algumas aplicações as quais, por vezes, têm a resistência limitada. A massa específica e a absorção de água do agregado também são citadas e limitadas. Todavia, Angulo (2005) salienta que limites semelhantes são estabelecidos para agregados de RCD reciclado e agregados de concreto reciclado quando, na verdade, os valores potenciais de resistência são muito diferentes, o que, segundo o autor, não estabelece de forma clara a relação entre a resistência mecânica dos concretos e a porosidade dos agregados.

A NBR 15116 (2004) veio estabelecer uma forma de classificar o agregado graúdo reciclado para uso em concretos baseada na sua composição percentual em

massa. Através de catação manual, uma amostra do agregado é dividida em quatro grupos: g1 (materiais contendo pasta de cimento), g2 (rochas), g3 (cerâmica) e g4 (outros materiais). Quando $g1 + g2 > 90\%$, o agregado é dito ARC (agregado de resíduo de concreto), enquanto que se $g1 + g2 < 90\%$, o agregado é dito ARM (agregado de resíduo misto). Como a norma regula o uso de agregado em concretos não estruturais das classes C10 e C15 da NBR 8953, subentende-se que os ARCs seriam indicados à produção de concretos C15 e os ARMs à de concretos C10. A única propriedade ligada à porosidade que é controlada é a absorção de água. A Tabela 3.4 mostra agregados graúdos reciclados de Maceió classificados segundo a NBR 15116 (2004).

Tabela 3.4: Composição percentual, em massa, de agregados graúdos reciclados da cidade de Maceió, de acordo com a NBR 15116 (2004).

Grupo	Origem da amostra					
	Misturado 1	Misturado 2	Construção	Reforma 1	Reforma 2	8 depósitos ilegais
g1	43,67	44,27	40,65	43,28	44,91	51,81
g2	16,73	15,42	34,61	22,46	20,78	27,28
g3	32,46	34,76	22,93	26,07	27,13	20,40
g4	7,14	5,55	1,81	8,19	7,18	0,52
g1 + g2	60,4	59,69	75,26	65,74	65,69	79,09
Classif.	ARM	ARM	ARM	ARM	ARM	ARM

Fonte: Gomes et al. (2005)

Notas: g1 = materiais contendo pasta de cimento; g2 = rochas; g3 = cerâmica; g4 = outros materiais (gesso, plástico, matéria orgânica, cerâmica vidrada etc.).

Angulo (2005) estudou a composição química e mineralógica dos agregados de RCD reciclado, que também variou em função da origem (Itaquera/SP ou Vinhedo/SP), e verificou que a mesma pode ser dividida em:

- RO+CE: silicatos oriundos de rochas naturais e de cerâmicas;
- A: aglomerantes oriundos de pasta endurecida de cimento ou cal;
- AR: argilominerais oriundos de solos, cerâmicas vermelhas mal queimadas, abaixo de 500 °C, ou rochas naturais;

revelando-se um critério mais apropriado que a análise visual além de ser aplicável à fração miúda dos agregados de RCD.

Em relação aos outros materiais que podem estar presentes no agregado reciclado, Lima (1999) afirma que podem ser considerados contaminantes praticamente todos os materiais minerais não inertes ou materiais que prejudicam a qualidade de

concretos e argamassas, como, por exemplo: cloretos, sulfatos, matéria orgânica, papel, plástico, tecido, borracha, vidro, betume, vegetação, terra, gesso, madeira e outros. O contaminante tanto pode aparecer como uma das próprias fases que compõem o agregado como pode ser incorporado a este durante seu manuseio (JOHN; AGOPYAN, 2000).

Alguns materiais constantes da própria fração mineral reciclável ou dos contaminantes podem tornar o RCD, e, conseqüentemente, o agregado reciclado, um material não inerte segundo a NBR 10004. De acordo com Oliveira (2002), em razão da versão de 1987 dessa norma citar rochas, tijolos e vidros como exemplos de materiais inertes, os geradores, gestores e pesquisadores tendem a estender essa classificação ao RCD como um todo. No entanto, o mesmo autor verificou que o resíduo de concreto submetido à ação da chuva ácida libera compostos químicos que mineralizam as águas e alteram os solos e sugere, dessa forma, que o mesmo seja classificado como resíduo não inerte (classe II) pela NBR 10004.

Há contaminantes que são especialmente prejudiciais devido ao fato de poderem reagir ou se alterar dentro do concreto como é o caso, dentre outros, do gesso, que tem ação expansiva (LEITE, 2001) e dos cloretos, que podem provocar corrosão da armadura (NEVILLE, 1997).

Os contaminantes podem ser eliminados dos agregados, ou ainda do RCD, através do uso das operações de concentração citadas no capítulo 2. Restando contaminantes, estes serão toleráveis caso seus teores enquadrem-se nos limites especificados nas normas ou recomendações. Na falta de uma norma nacional que regule o uso de agregados reciclados em concretos estruturais, poder-se-ia adotar as recomendações ou normas de países que estejam mais avançados nessa área, as recomendações da RILEM ou até a própria NBR 15116 (2004).

3.2 Absorção de Água

A absorção de água é uma das propriedades ligadas à porosidade cuja determinação é das mais simples. As duas propriedades são diretamente proporcionais.

Em conseqüência da variação da porosidade do agregado reciclado, a absorção de água também apresentará variabilidade. Angulo (2000) constatou que a absorção de cada uma das fases que compunham o agregado reciclado produzido na usina de Santo

André (SP) variou e que as fases tenderam, em geral, a ser cada vez mais porosas na seguinte ordem: rochas, concretos/argamassas e cerâmicas (Figura 3.1). Dessa forma, é de se esperar que quanto maior for a quantidade de fases mais porosas, como a cerâmica, por exemplo, maior será a absorção do agregado.

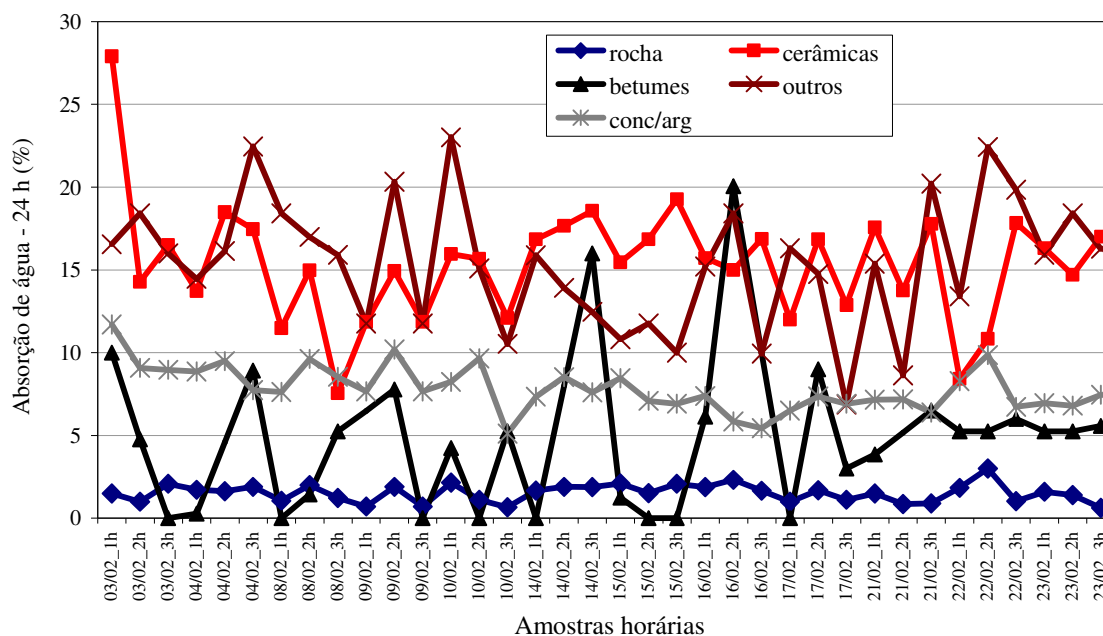


Figura 3.1: Absorção de água por imersão, após 24 horas, de fases do agregado graúdo de RCD reciclado da usina de Santo André (SP) (ANGULO, 2000).

Vários estudos têm observado que a absorção de água é maior para as frações de menor granulometria. São exemplos o estudo de Hansen e Narud (1983), que analisaram agregados de concreto reciclado (Tabela 3.5), e o de Poon e Chan (2006) (Tabela 3.6), que, dentre outras fontes, analisaram agregados de alvenaria de tijolos cerâmicos.

Tabela 3.5: Propriedades de agregados de concreto reciclado.

Tipo de agregado	Fração granulométrica (mm)	Massa específica	Absorção de água (%)	Perda por abrasão <i>Los Angeles</i> (L500)	Volume de argamassa aderida aos grãos de rocha natural (%)
Reciclado (H)	4-8	2,34	8,5	30,1	58
	8-16	2,45	5,0	26,7	38
	16-32	2,49	3,8	22,4	35
Reciclado (M)	4-8	2,35	8,7	32,6	64
	8-16	2,44	5,4	29,2	39
	16-32	2,48	4,0	25,4	28
Reciclado (L)	4-8	2,34	8,7	41,4	61
	8-16	2,42	5,7	37,0	39
	16-32	2,49	3,7	31,5	25

Fonte: Hansen e Narud (1983)

Nota: H, M e L significam que os concretos britados (em britador de mandíbulas) eram de alta, média e baixa resistência, respectivamente.

Tabela 3.6: Absorção de água de agregados de alvenaria de tijolos cerâmicos reciclada.

Propriedade	Tamanho do agregado		
	20 mm	10 mm	< 5 mm
Absorção de água (%)	18,4	19,5	30,9

Fonte: Poon e Chan (2006)

Hansen e Narud (1983) verificaram que a maior absorção das frações menores do agregado de concreto reciclado é devida à maior quantidade de argamassa aderida aos grãos das mesmas. Poon e Chan (2006) também atribuem a maior absorção das frações menores à maior quantidade de argamassa aderida aos grãos de menor tamanho. A partir desses dois estudos, vê-se que a maior absorção de água das frações de menor granulometria dos agregados reciclados acontece em razão das mesmas conterem materiais mais porosos e, conseqüentemente, menos resistentes. A provável causa para isso é que, conforme 3.1, tais materiais tendem a se fragmentar mais que os materiais mais resistentes.

A capacidade de absorção de água dos agregados reciclados apresenta ainda a característica de se pronunciar numa velocidade mais rápida que a dos agregados naturais de forma que aquele pode chegar à quase saturação em questão de minutos. Leite (2001)³ e Carrijo (2005) usaram um ensaio modificado para determinação da

³ A autora chega a propor um método de ensaio com aparato especial para a determinação da curva absorção em função do tempo.

absorção dos agregados de RCD reciclado de seus estudos. Em tal ensaio a absorção é medida não só às 24 h mas também ao longo dos primeiros minutos e horas do período de imersão. Enquanto Leite (2001) constatou que os agregados, tanto miúdos quanto graúdos, atingiram cerca de 50% da absorção total em 10 minutos, Carrijo (2005) observou, para este mesmo tempo, que os agregados graúdos separados em faixas de densidade atingiram entre 70% e 86% da absorção total de água. Em muitos casos citados na literatura, 10 minutos é o tempo para o qual a absorção começa a se processar de forma mais lenta; em outras palavras, é o ponto em que a curva da absorção em função do tempo inicia um comportamento assintótico.

A avaliação da absorção de água nos momentos iniciais é importante porque o concreto no estado fresco pode ter parte considerável da água de mistura absorvida pelos agregados reciclados e, conseqüentemente, sofrer perda de consistência. Oliveira e Vazquez (1996) e Poon et al. (2004) verificaram que o uso do agregado em condições extremas, isto é, totalmente seco ou saturado com superfície seca, não tem efeitos positivos sobre o concreto, pois foram observados desde perda de trabalhabilidade até ligeiros decréscimos da resistência mecânica, por exemplo. O uso, então, do agregado numa condição intermediária de umidade tenderia a minimizar ou anular os efeitos negativos da alta absorção. Tendo isso em vista, Leite (2001) e Carrijo (2005) fizeram uso do resultado do ensaio citado anteriormente para realizar uma pré-molhagem do agregado no momento de preparo do concreto.

É preciso observar, no entanto, que na produção do concreto a quantidade de água que o agregado reciclado pode absorver irá depender de fatores como a sua condição inicial de umidade, o tempo de permanência em contato com a água, se o agregado entra em contato primeiro somente com a água, ou com a pasta de cimento, entre outros (BARRA, 1996 apud LEITE, 2001).

3.3 Massa Específica

A massa específica é outra propriedade intimamente ligada à porosidade, e as duas guardam entre si uma relação inversamente proporcional.

Assim como a absorção de água, a massa específica dos agregados reciclados sofre variabilidade em consequência da variação da porosidade, regra comprovada por Angulo (2000) no estudo da usina de Santo André (SP). O autor observou uma

variabilidade da massa específica das fases componentes do agregado gráúdo reciclado e também uma tendência geral daquelas com maior absorção apresentarem menor massa específica (Figura 3.2).

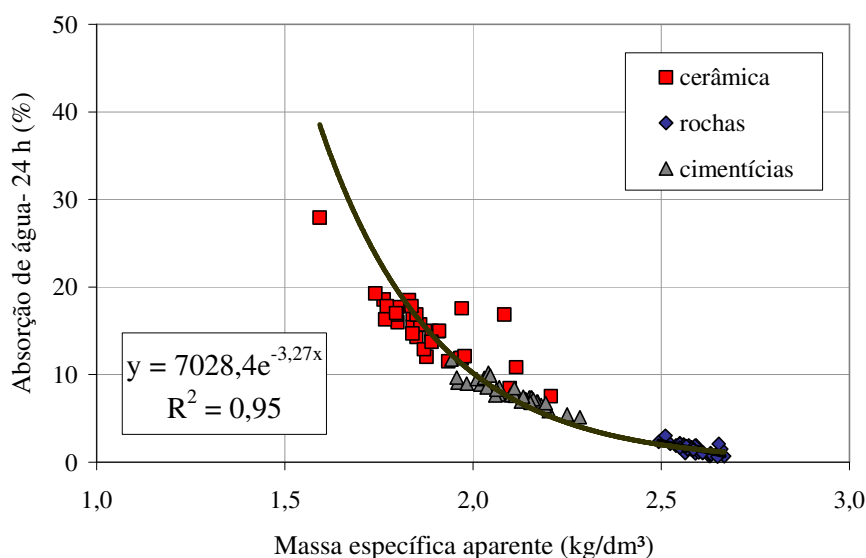


Figura 3.2: Correlação entre massa específica aparente e absorção de água de fases do agregado gráúdo reciclado da usina de Santo André (SP) (ANGULO, 2000 apud ANGULO, 2005).

O estudo de Carrijo (2005) apresenta importantes resultados a respeito da influência da massa específica dos agregados reciclados sobre as propriedades do concreto. A autora coletou agregados gráúdos reciclados na usina de Itaquera (SP) a partir das duas pilhas: cinza e vermelho⁴; e os separou em quatro faixas de densidade: $d < 1,9 \text{ kg/dm}^3$, $1,9 \text{ kg/dm}^3 < d < 2,2 \text{ kg/dm}^3$, $2,2 \text{ kg/dm}^3 < d < 2,5 \text{ kg/dm}^3$ e $d > 2,5 \text{ kg/dm}^3$. A eficiência da separação foi confirmada através da determinação da massa específica e absorção por meio do ensaio estabelecido pela ABNT (Tabela 3.7). Os dados desta tabela mostram que as duas propriedades variaram conforme o intervalo de separação e não conforme a classificação do agregado em cinza ou vermelho. A massa específica dos agregados reciclados variou entre 67,9% e 97,8% da massa específica do agregado natural.

⁴ Ver seção 2.3.1.

Tabela 3.7: Massa específica e absorção de água de agregados graúdos reciclados separados por faixas de densidade.

Agregado	Sigla	Densidade	Origem	Massa espe- cífica (g/cm³)	Absorção de água (%)
Reciclado	d1	d<1,9	vermelho	1,74	15,32
			cinza	1,78	14,65
	d2	1,9<d<2,2	vermelho	2,02	9,01
			cinza	2,11	8,05
	d3	2,2<d<2,5	vermelho	2,49	2,84
			cinza	2,53	2,03
	d4	d>2,5	vermelho	2,62	1,40
			cinza	2,60	1,51
Natural				2,68	0

Fonte: Carrijo (2005)

A composição desses agregados estudados por Carrijo (2005) (Tabela 3.8) também confirma que aqueles mais densos são ricos em fases mais densas e menos porosas como as rochas, por exemplo, e que os mais leves são ricos em fases menos densas e mais porosas como as cerâmicas, por exemplo. Também é notado que praticamente todas as fases estão presentes nos vários intervalos de densidade, o que comprova a variabilidade da porosidade das mesmas e mostra que a separação/classificação de agregados de RCD reciclado baseada em análise visual não é eficiente em produzir um material homogêneo, pois, nesse processo, cerâmicas tão densas quanto rochas podem ser colocadas junto das cerâmicas mais porosas.

Tabela 3.8: Composição percentual em massa dos agregados graúdos reciclados separados por faixas de densidade do estudo de Carrijo (2005).

Faixa de densidade (g/cm ³)		d < 1,9		1,9 < d < 2,2		2,2 < d < 2,5		d > 2,5	
Tipo de agregado		verm. ¹	cinza	verm.	cinza	verm.	cinza	verm.	cinza
Fases (% da massa total)	Cimentícia	69,1	78,9	92,0	92,7	60,0	46,3	23,6	13,3
	Ceram. vermelha	24,2	15,4	4,6	0,3	0,3	0,1	0,0	0,0
	Ceram. branca	2,3	1,8	3,0	2,6	0,3	0,0	0,1	0,0
	Rochas	0,3	0,0	0,0	1,0	36,6	53,2	72,8	86,7
	Betume	2,2	2,4	0,0	3,5	2,8	0,4	3,5	0,0
	Amianto	1,9	1,4	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Fonte: Carrijo (2005)

Nota: ¹ verm. = vermelho

Em se tratando de dosagem de concreto, o uso dos agregados reciclados com menor massa específica resulta num maior volume de agregado quando são tomadas massas iguais de agregados naturais e reciclados. Este é um fato que deve ser observado no momento de se adaptar traços de concreto convencional aos agregados reciclados principalmente quando são realizados estudos comparativos de laboratório. Além disso, o teor, ou seja, o percentual do volume que é ocupado pelos agregados influencia as propriedades mecânicas do concreto (NEVILLE, 1997).

3.4 Resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à abrasão

A resistência à compressão e o módulo de elasticidade de um agregado não são propriedades frequentemente mensuradas em razão da dificuldade de se ensaiar as partículas isoladamente; porém, assim como a resistência à abrasão, são muito influenciadas pela porosidade (MEHTA; MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997).

A resistência à compressão do agregado graúdo pode ser determinada de forma indireta através da medição da resistência à compressão do concreto. Substitui-se os agregados graúdos de um concreto de resistência conhecida pelos agregados graúdos a serem estudados. Se com este agregado obtém-se um concreto com resistência à compressão menor e, particularmente, se muitos grãos aparecem rompidos após a ruptura do corpo-de-prova, conclui-se que a resistência do agregado é inferior à resistência à compressão desse concreto (NEVILLE, 1997). Foi com base nesses critérios que Carrijo (2005) constatou a baixa resistência à compressão de agregados reciclados de seu estudo.

De forma semelhante à resistência à compressão, infere-se o módulo de elasticidade do agregado reciclado, pois, segundo Neville (1997), o módulo de elasticidade do concreto é tanto maior quanto maior o módulo de elasticidade do agregado. Carrijo (2005) observou que o módulo dos concretos diminuiu à medida que a massa específica dos agregados reciclados diminuiu, comprovando que os agregados menos densos possuíam menor módulo de elasticidade. No entanto, Neville (1997) lembra que agregados com resistência e módulo de elasticidade moderados ou baixos podem ser bons para a preservação da integridade do concreto quando submetido a tensões devidas a variações de volume de origem hidráulica ou térmica.

A resistência à abrasão do agregado oferece um indicativo da qualidade do material a ser utilizado no concreto; representa a resistência à fragmentação por choque e atrito das partículas de agregado graúdo. Os agregados reciclados apresentam menor resistência ao impacto e ao desgaste por abrasão que os agregados naturais (LEITE, 2001).

O método mais usado na determinação da resistência à abrasão é o ensaio americano de abrasão *Los Angeles*, que combina abrasão e atrito. Ele mostra boa correlação não só com o desgaste real dos agregados no concreto mas também com a resistência à compressão e a resistência à flexão do concreto confeccionado com tal agregado (NEVILLE, 1997).

Hansen e Narud (1983) constataram que a perda por abrasão *Los Angeles* dos agregados de concreto reciclado foi maior que a dos agregados naturais para as 3 faixas granulométricas estudadas (Tabela 3.7), sendo tanto maior quanto menor era a granulometria, o que concorda com a afirmação deles de que a maior quantidade de argamassa aderida às frações menores é o ponto fraco do agregado de concreto reciclado. Especificamente para o agregado de concreto reciclado, e possivelmente para a fase concreto presente em agregados reciclados mistos, a idade do mesmo influencia a perda por abrasão. Foi o que observou Buttler (2003) ao analisar a perda por abrasão *Los Angeles* às idades de 1, 7 e 28 dias (41,68%, 30,48% e 28,75%, respectivamente). O autor atribuiu a grande perda na primeira idade estudada à grande quantidade de partículas de cimento não hidratadas aderidas à superfície do agregado. Note-se, no entanto, que a diferença entre as perdas aos 7 e 28 dias foi pequena. Ainda de acordo com Buttler (2003), a norma americana ASTM C33 (*Standard Specification for Concrete Aggregates*) estabelece que agregados só podem ser usados na produção de concreto se sua perda por abrasão for inferior a 50%. A NBR 15116 (2004) não faz nenhuma menção a essa propriedade dos agregados reciclados.

3.5 Outras propriedades

3.5.1 Granulometria, teor de finos e de materiais pulverulentos⁵

A granulometria dos agregados reciclados é variável e depende da composição do resíduo de origem, da granulometria do resíduo, do equipamento usado na cominuição do resíduo e de sua regulação (ANGULO, 2000; LIMA, 1999), de outras operações unitárias usadas no beneficiamento e ainda outros fatores. Também o teor de finos (material de granulometria inferior a 0,15 mm) e de materiais pulverulentos é variável e dependente desses fatores.

Nas usinas brasileiras que utilizam britadores de impacto é gerada grande quantidade de miúdos (até 60% em massa), mas uma quantidade considerável de miúdos e finos já está presente no resíduo. Entretanto, mesmo que essa parcela seja removida antes da cominuição, a quantidade gerada nesta etapa é significativa (LIMA, 1999). O teor de finos e de materiais pulverulentos dos agregados reciclados tende a ser maior que nos agregados naturais.

De acordo com Lima (1999), agregados de concreto reciclado de diferentes qualidades não apresentam variações significativas na granulometria e podem apresentar curvas parecidas com a de agregados naturais, quando retiradas as parcelas finas.

A Figura 3.3 e a Figura 3.4 mostram as curvas granulométricas de alguns dos agregados miúdos e graúdos obtidos dos RCDs da cidade de Maceió e citados na Tabela 3.4.

⁵ Materiais pulverulentos é a denominação dada pela NBR 7219:1987 (versão antiga da NBR NM 46) à fração passante na peneira # 0,075 mm.

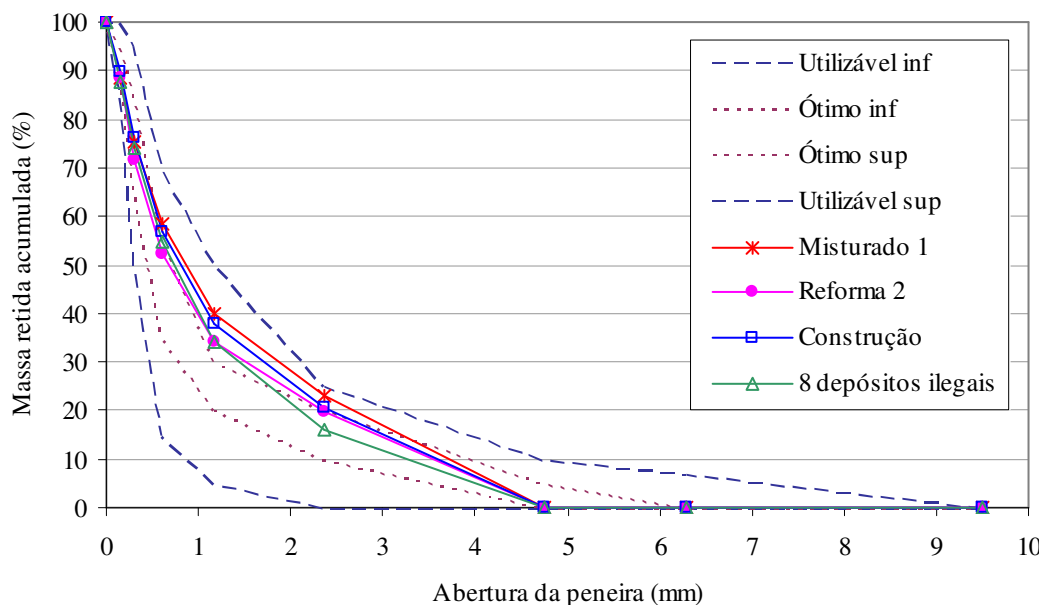


Figura 3.3: Curvas granulométricas de alguns agregados miúdos reciclados de Maceió estudados por Gomes et al. (2005).

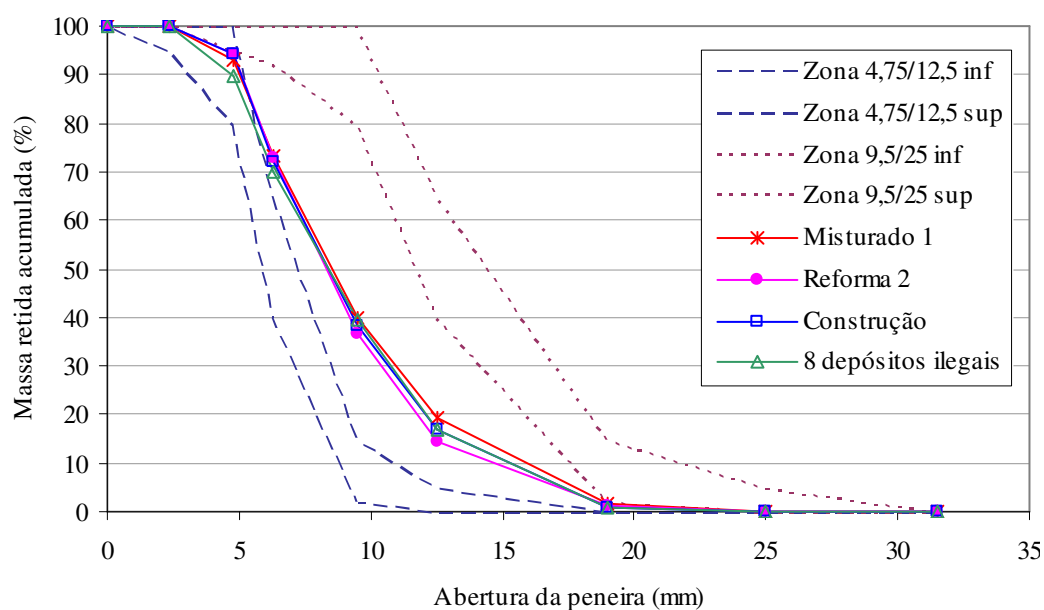


Figura 3.4: Curvas granulométricas de alguns agregados graúdos reciclados de Maceió estudados por Gomes et al. (2005).

Observa-se na Figura 3.3 que os agregados miúdos apresentaram uma tendência a se enquadrar na zona utilizável superior da NBR 7211 (2005). Porém, esse fato não se refletiu no módulo de finura (Tabela 3.9) visto que nessa zona tal propriedade deve ter valor entre 2,90 e 3,50. Já os agregados graúdos (Figura 3.4) não se encaixaram em nenhuma das zonas especificadas pela NBR 7211 (2005); apenas enquadraram-se, no geral, entre as zonas 4,75/12,5 e 9,5/25. As curvas de ambos agregados (miúdos e

gráudos) foram contínuas e pouco diferentes umas das outras apesar dos mesmos virem de fontes diferentes. Todavia, esses dados são condizentes com as composições (Tabela 3.4) e com a possibilidade de cada fase sofrer maior ou menor fragmentação, conforme discussão em 3.1.

Tabela 3.9: Outras características relacionadas à granulometria dos agregados reciclados de Maceió.

Agregado	Misturado 1	Construção	Reforma 2	8 depósitos ilegais
Módulo de finura ag. miúdo	2,91	2,8	2,66	1,92
Teor mat. pulv. ag. miúdo	7,27	7,06	7,31	7,43
Módulo de finura ag. gráudo	5,99	6,05	6,03	5,79
Teor mat. pulv. ag. gráudo	1,57	0,17	0,05	1,66

Fonte: Gomes et al. (2005)

Enquanto que o teor de materiais pulverulentos dos agregados miúdos não apresentou, em geral, grande variação (Tabela 3.9), nos agregados gráudos esse teor mostrou-se muito variável. Entretanto, Gomes et al. (2005) verificaram que os valores encontrados para ambos agregados satisfizeram os limites estabelecidos pela NBR 15116 (2004) e que também se situaram dentro da faixa de variação encontrada na literatura.

3.5.2 Forma, textura superficial dos grãos e aderência

Os agregados reciclados são, em geral, mais irregulares, angulares e de textura mais áspera e rugosa que os agregados naturais (ANGULO, 2000; CARNEIRO et al., 2001; LEITE, 2001) e estas características também sofrem variabilidade, pois dependem da composição do resíduo e do equipamento de cominuição usado (LEITE, 2001).

O agregado reciclado também pode se apresentar mais lamelar⁶ que o agregado natural. Partículas finas e achatadas podem reduzir a resistência do concreto quando o agregado tem uma carga aplicada no seu lado achatado (TAM; TAM, 2007). Grãos mais angulares e mais lamelares tendem a prejudicar a consistência do concreto, exigindo, então, mais água ou teor de pasta para que os concretos reciclados alcancem consistência adequada (LEITE, 2001; LIMA, 1999; TAM; TAM, 2007).

⁶ Um agregado é lamelar quando tem índice de forma maior que 2.

Leite (2001) verificou que o agregado reciclado usado em seu estudo foi menos lamelar que o agregado natural (2,3 contra 2,6, respectivamente). Esse valor se assemelha à média dos valores encontrados para os agregados da cidade de Maceió estudados por Gomes et al. (2005) que foi 2,4 (Tabela 3.10). Leite (2001) obteve o agregado através de cominuição do RCD em britador de mandíbulas seguido de um britador de impacto enquanto que Gomes et al. (2005) efetuaram a cominuição em um moinho de martelos.

Tabela 3.10: Índice de forma de agregados graúdos reciclados de Maceió estudados por Gomes et al. (2005).

Agregado	Misturado 1	Misturado 2	Construção	Reforma 1	Reforma 2	8 depósitos ilegais
Índice de forma	2,6	2,4	2,1	2,6	2,3	2,3

Fonte: Gomes et al. (2005)

Angulo (2000) observou variabilidade do índice de forma dos agregados produzidos na usina de Santo André (SP); os valores situaram-se entre 1,87 e 2,16, com média igual 2,01.

Levy (2001) notou que os agregados de alvenaria reciclada prejudicaram mais a consistência do concreto que os agregados de concreto reciclado devido, possivelmente, à maior porosidade e maior lamelaridade daqueles. Em Chen et al. (2003) (Tabela 3.11), tanto os agregados oriundos da reciclagem de tijolos quanto de telhas apresentaram-se mais lamelares que os agregados oriundos da reciclagem de concreto. Uma possível explicação para essa maior lamelaridade é que esses materiais, antes mesmo da cominuição, já apresentam partes em forma de placas, ou seja, partes onde duas dimensões predominam sobre a terceira como é o caso de paredes de tijolos cerâmicos furados e de telhas cerâmicas produzidas no Brasil. Levy (2001) fez a cominuição dos resíduos em um britador de mandíbulas.

Tabela 3.11: Índice de forma de agregados graúdos reciclados de Taiwan.

Origem do agregado	Concreto		Tijolos		Telhas	
	grupo A	grupo B	grupo A	grupo B	grupo A	grupo B
Índice de forma	2,26	2,25	2,32	2,29	2,87	2,45

Fonte: Chen et al. (2003)

Nota: Grupo A ou B é usado para assinalar que os agregados foram obtidos de duas diferentes regiões de Taiwan.

A textura mais rugosa dos agregados reciclados também afeta a consistência do concreto. Porém, também permite uma melhor aderência com a pasta de cimento, o que pode melhorar a resistência mecânica do compósito. Outra causa da maior aderência é o engrenamento proporcionado pela da entrada de parte da pasta dentro dos poros capilares que se abrem a partir da superfície do agregado.

Salem e Burdette (1998) afirmam que a maior resistência à flexão nas idades iniciais e maior resistência à compressão do concreto reciclado encontradas em seu estudo podiam ser atribuídas à maior rugosidade dos agregados de concreto reciclado usados. Essa maior resistência à flexão somente nas idades iniciais está de acordo com Mehta e Monteiro (1994).

Khaloo (1994) atribui o ganho na resistência à tração e à flexão de concretos produzidos com 100% de agregados de tijolos cerâmicos reciclados de grande dureza à maior aderência entre a matriz e estes proporcionada por sua maior rugosidade.

3.5.3 Atividade pozolânica

Vários estudos têm atribuído o ganho de resistência de concretos ou argamassas à possível reatividade da fração miúda dos agregados reciclados.

Pinto afirma que no agregado de RCD reciclado podem estar presentes:

[...] partículas de cimento não-inertizadas, que ainda irão reagir, partículas de cal, que estarão disponíveis para novas reações, partículas já cristalizadas, que funcionarão como iniciadores da cristalização (acelerando a formação da nova rede cristalina), e partículas finas de material cerâmico, com significativo potencial pozolânico, que irão reagir com a cal hidratada (1998 apud Carneiro et al. 2001, p.152).

Alguns estudos atribuem uma atividade pozolânica especialmente à parte da fração fina oriunda de material cerâmico. Entretanto, há entre tais trabalhos uns que nem chegam a verificar se tal atividade realmente existe (LEVY; HELENE, 2004). Há estudos, inclusive, que não constatarem atividade pozolânica mesmo em agregados miúdos de cerâmica reciclada como é o caso de Hamassaki et al. (1997) citados por Lima (1999) e Leite (2001).

Leite (2001) não observou na bibliografia analisada resultados definitivos a respeito da influência da atividade pozolânica de materiais cerâmicos presentes no agregado reciclado sobre a resistência à compressão do concreto, concluindo apenas que o efeito pozolânico existe a depender do tipo e da quantidade de material usado.

Levy e Helene (2004) investigaram o efeito de três agregados miúdos de diferentes origens (cerâmica sem atividade pozolânica, cerâmica com atividade pozolânica e argamassas) sobre a resistência à compressão e módulo de elasticidade de concretos e argamassas. Apesar de verificarem que os agregados de origem cerâmica proporcionaram, em geral, os melhores resultados, os autores constataram que o agregado cerâmico com atividade pozolânica não apresentou contribuição significativamente diferente do agregado sem atividade pozolânica e alertaram, por fim, que o efeito fíler também é relevante.

Capítulo 4

PROPRIEDADES DOS CONCRETOS CONFECCIONADOS COM AGREGADOS RECICLADOS

Assim como as propriedades do agregado são influenciadas pela porosidade, as do concreto também são.

A resistência, durabilidade, retração e permeabilidade do concreto sofrem influência direta do número, tipo, tamanho e distribuição dos poros presentes nos agregados, na pasta de cimento e na zona de transição (BASHEER et al., 2001). Particularmente, a massa unitária, o módulo de elasticidade e a estabilidade dimensional do concreto dependem grandemente da densidade e resistência do agregado (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Também a consistência do concreto é influenciada pela porosidade do agregado, como já se viu no capítulo anterior e ainda se verá aqui.

Em consequência dos agregados reciclados terem propriedades variáveis, os concretos com eles confeccionados também tendem a apresentar variabilidade das propriedades que dependem do agregado. O conhecimento dessas propriedades é tão importante quanto o conhecimento das propriedades do agregado visto que é a partir do entendimento das relações existentes entre esses dois conjuntos de dados que se pode proporcionar o emprego adequado e confiável dos agregados reciclados. Também é baseado no conhecimento das propriedades e do desempenho dos concretos que se restringe ou se aponta seu melhor uso, dimensionam-se as estruturas e estabelecem-se valores limites em normas e recomendações.

4.1 Consistência

Observa-se na literatura que, em geral, os concretos confeccionados com agregados reciclados apresentam menor consistência (medida pelo abatimento do tronco de cone) que concretos convencionais de mesmo traço.

A consistência é afetada por vários fatores (GUIMARÃES, 2005):

- a) consumo de água;
- b) consumo de cimento;
- c) relação água/cimento, relação agregado/cimento e consumo de cimento;
- d) adições;
- e) aditivos;
- f) agregados.

No caso dos agregados reciclados, a maior presença de grãos mais finos (teor de finos e/ou materiais pulverulentos), a forma mais lamelar ou angular dos grãos, a textura superficial mais rugosa e a maior porosidade (que tanto aumenta a rugosidade das partículas quanto permite ao agregado absorver parte da água de mistura) prejudicam a consistência do concreto.

Leite (2001) usou um experimento fatorial para analisar a influência da relação a/c e do teor de substituição de agregados naturais miúdos e graúdos por agregados reciclados miúdos e graúdos sobre propriedades do concreto. A absorção de água dos agregados reciclados foi compensada⁷, mas, mesmo assim fez-se necessário o uso de aditivo superplastificante em vários traços com teor de substituição de agregado igual ou superior a 50%. A autora mediu a consistência através do abatimento do tronco de cone e observou, dentre outras coisas, que:

- os concretos reciclados apresentaram valores de abatimento mais baixos e mais variáveis que o concreto convencional;
- o teor de substituição do agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado teve efeito significativo sobre o abatimento do concreto, de forma que quanto maior o seu valor, menor foi o valor do abatimento;
- a relação a/c teve efeito significativo sobre o abatimento do concreto, de forma que houve uma tendência de diminuição deste à medida que a relação a/c cresceu – comportamento atribuído à maior aspereza da mistura em consequência da menor quantidade de cimento nas maiores relações a/c;
- concretos confeccionados somente com agregados miúdos reciclados tiveram o abatimento menos prejudicado;

⁷ À água de cada traço, foi adicionada uma quantidade relativa à absorção dos agregados em 10 minutos (obtida da curva de absorção em função do tempo), o que significava 50% da absorção total do agregado miúdo e 40% da absorção do agregado graúdo.

- apesar dos concretos reciclados terem apresentado abatimentos mais baixos que os concretos de referência, com exceção dos concretos com grandes teores de substituição dos agregados miúdo e graúdo (88,5%), as demais misturas apresentaram-se bem moldáveis;
- a alta variabilidade do abatimento dos concretos reciclados exprime certa ineficiência do método em avaliar a consistência tanto destes concretos quanto de concretos convencionais com pequeno consumo de cimento;
- os concretos reciclados apresentaram menor tendência à segregação e menor exsudação que os concretos de referência, sendo este último efeito atribuído à grande absorção dos agregados reciclados.

Leite (2001) também usou o ensaio VeBe com alguns dos traços estudados e verificou que o método avaliava melhor a consistência dos concretos reciclados que o abatimento do tronco de cone.

Com os agregados graúdos separados em faixas de densidade, Carrijo (2005) realizou um estudo no intuito de verificar a influência da porosidade desses agregados sobre as propriedades de concretos confeccionados com três relações a/c (0,4, 0,5 e 0,67). Uma quantidade de água igual a 70% da absorção total de cada agregado foi acrescentada à água de mistura dos concretos, sendo adicionada junto com o mesmo à batedeira, permanecendo o material em repouso por um tempo de 10 minutos antes de se iniciar o preparo dos concretos.

Carrijo (2005) fixou uma consistência plástica inicial de 80 ± 10 mm de abatimento e percebeu uma dificuldade em mantê-la. Por isso, resolveu adotar a metodologia de adicionar gradualmente aditivo superplastificante ao concreto até que se verificasse visualmente que o mesmo havia atingido o ponto de consistência plástica. Só então era medido o abatimento (Figura 4.1).

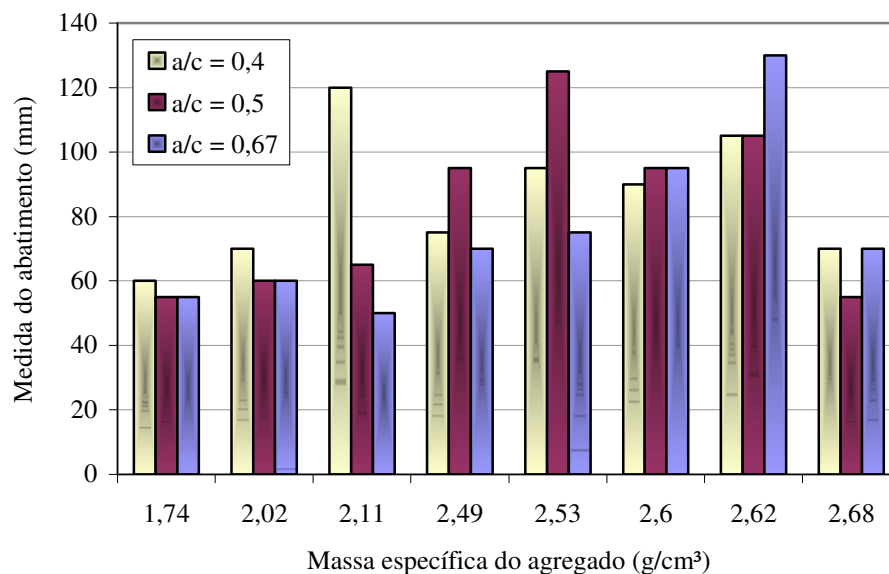


Figura 4.1: Abatimento de concretos confeccionados com agregados graúdos de RCD reciclado separados em faixas de densidade (CARRIJO, 2005).

Apesar de algumas misturas estudadas apresentarem valores baixos de abatimento (Figura 4.1), Carrijo (2005) verificou que as mesmas apresentaram-se trabalháveis e de fácil adensamento, concordando com a constatação de Leite (2001) de que o abatimento do tronco de cone é ineficaz em avaliar a consistência de concretos reciclados. Carrijo (2005) afirma ainda que o fato do abatimento ter sido menor para as menores massas específicas do agregado reciclado (considerando as relações a/c 0,5 e 0,67) pode ser explicado não só pela maior absorção deste mas também pelo fato da massa dos grãos não ser suficientemente grande para vencer a resistência que a pasta exerce nos mesmos. A autora constatou ainda uma tendência de aumento da dose de aditivo à medida que agregados menos densos (mais porosos) eram usados.

Khatib (2005) investigou a influência de quatro teores de substituição do agregado miúdo por dois agregados miúdos reciclados sobre a consistência do concreto (medida pelo abatimento do tronco de cone). Os concretos não necessitaram do uso de aditivos, e, segundo o autor, todos eles apresentaram trabalhabilidade boa ou muito boa (Figura 4.2). Os concretos confeccionados com agregados de concreto reciclado apresentaram aumento do abatimento à medida que se aumentou o teor de substituição enquanto que para o agregado de tijolos a substituição só foi benéfica até o teor de 50%. Certamente a porosidade deste último agregado teve influência no experimento tornando-o mais rugoso ou levando-o a absorver mais água da mistura, pois sua

absorção de água era igual a 14,75% e a do agregado de concreto igual a 6,25%. Todavia, é necessário lembrar que o autor só analisou uma relação a/c (0,5).

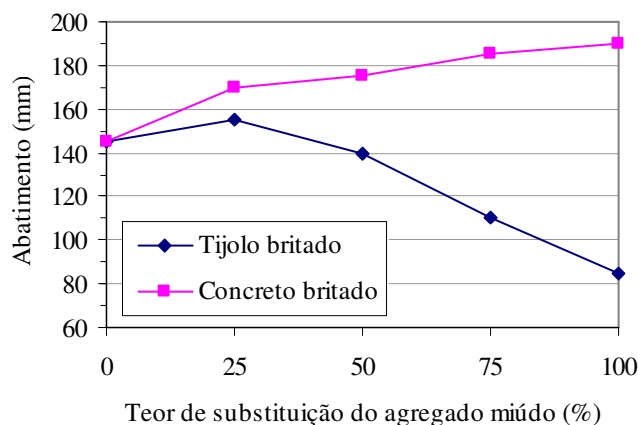


Figura 4.2: Efeito do teor de substituição de agregados miúdos sobre o abatimento do concreto (KHATIB, 2005).

Com base nos estudos aqui citados, vê-se que a porosidade dos agregados graúdos reciclados é a propriedade mais capaz de influenciar o estado fresco do concreto. Já para o agregado miúdo, parece haver ainda outros fatores relevantes (relação a/c da mistura, granulometria etc.).

Dessa forma, os efeitos negativos dos agregados reciclados sobre a consistência podem vir a ser minimizados através de:

- aumento da quantidade de água no traço em um valor igual à parte da absorção total do agregado, ou pré-molhagem do mesmo antes de iniciar a mistura;
- aumento do consumo de cimento, o que resulta em modificação da relação a/c;
- uso de adições, como, por exemplo, fíleres (LIMBACHIYA et al., 1998 e DESAI, 1998 apud LIMA, 1999);
- uso de aditivos (plastificantes ou superplastificantes) ou aumento de sua dosagem;
- eliminação de parte da fração fina dos agregados miúdos ou, simplesmente, abandono do uso do agregado miúdo reciclado já que ele também é conhecido por apresentar absorção maior que o graúdo.

- f) uso de agregados graúdos menos porosos, ou seja, mais densos e com menor absorção de água.

4.2 Resistência à compressão

Em termos de relação da porosidade com a resistência, pode-se afirmar que o maior limitante da resistência dos concretos reciclados é o agregado reciclado em razão dele ser o principal responsável pela “introdução de porosidade” no sistema. Há circunstâncias específicas, entretanto, em que outras propriedades do agregado ou parâmetros da composição do concreto mostram-se também relevantes, como se verá adiante.

No estudo de Khatib (2005), foi observada uma tendência de redução na resistência à compressão dos concretos à medida que se aumentou o teor de substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado tanto de concreto (Figura 4.3) quanto de tijolos (Figura 4.4). Para cada teor de substituição, os concretos contendo agregado de tijolos apresentaram redução da resistência ligeiramente menor que aqueles contendo agregado de concreto. Ao comparar as resistências dos concretos reciclados com a do concreto de referência, o autor constatou que, em geral, após 28 dias, houve ganho de resistência relativa; o qual foi atribuído à ação cimentante de partículas de cimento não hidratadas no agregado de concreto e à reação pozolânica do agregado de tijolos. Entretanto, não foi realizado ensaio que comprovasse tal potencial deste último agregado.

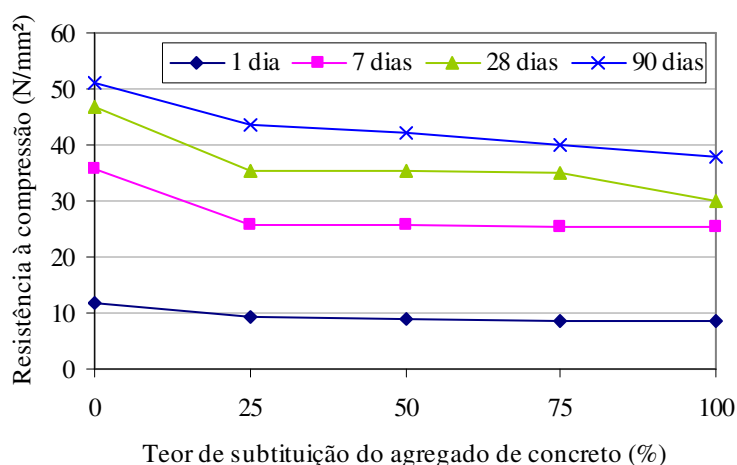


Figura 4.3: Efeito do agregado miúdo de concreto reciclado sobre a resistência à compressão de concretos estudados por Khatib (2005).

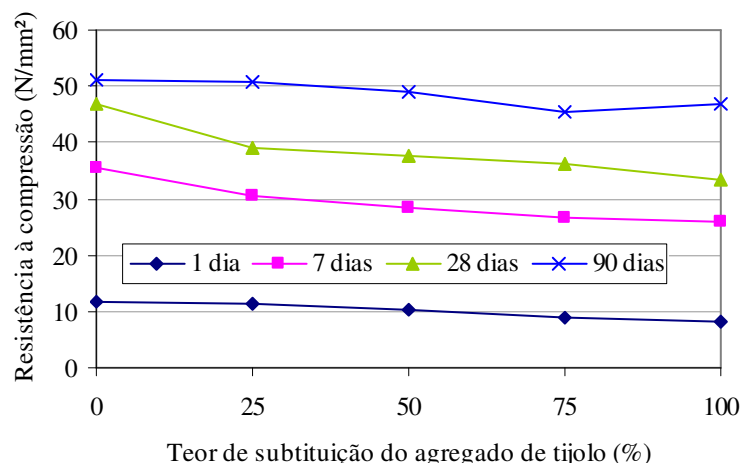


Figura 4.4: Efeito do agregado miúdo de tijolo reciclado sobre a resistência à compressão de concretos estudados por Khatib (2005).

No seu experimento fatorial, Leite (2001) verificou que os seguintes fatores tinham efeito significativo sobre a resistência à compressão do concreto (por ordem de importância): relação a/c (Lei de Abrams), teor de substituição do agregado graúdo, idade, teor de substituição do agregado miúdo, a interação teor de substituição do agregado graúdo x relação a/c, a interação idade x relação a/c, a interação teor de substituição do agregado miúdo x idade e a interação teor de substituição do agregado graúdo x idade x relação a/c.

Considerando-se somente o efeito isolado dos fatores teor de substituição do agregado graúdo e teor de substituição do agregado miúdo no modelo estatístico, Leite (2001) observou que quanto maior o valor do primeiro fator, menor era a resistência à compressão do concreto enquanto que, para o segundo fator, quanto maior seu valor, maior era a resistência. Os concretos contendo 100% de agregado miúdo reciclado, mas agregado graúdo natural, apresentaram as maiores taxas de crescimento de resistência entre 28 e 91 dias, para todas as relações a/c, efeito que a autora atribuiu à atividade pozolânica da fração miúda⁸. Foi observado ainda que, para altas relações a/c, o uso combinado de agregados reciclados miúdos e graúdos levou a concretos de maior resistência, sendo esta tanto maior quanto maior era o teor de substituição dos agregados.

Segundo Carrijo (2005), para baixas relações a/c, a resistência à compressão do concreto reciclado é limitada pela baixa resistência do agregado reciclado. Já no caso de

⁸ De fato, através dos ensaios apropriados, Leite (2001) comprovou a existência de reatividade pozolânica da fração cerâmica miúda dos agregados reciclados.

altas relações a/c, a resistência do agregado reciclado pouco influi na resistência do concreto, de forma que esta é dominada pela resistência da argamassa. Isto pode ser visto nos resultados de Leite (2001) (Figura 4.5), ou seja, a baixas relações a/c, a resistência do concreto convencional é maior que a do concreto reciclado enquanto que à medida que a relação a/c aumenta a situação pode se inverter. Este comportamento a altas relações a/c certamente está relacionado à porosidade do agregado reciclado visto que:

- a) este agregado pode absorver parte da água de mistura dos concretos mesmo que ele tenha passado por uma pré-molhagem, reduzindo assim a relação a/c efetiva, o que pode levar a um aumento das resistências mecânicas do compósito (ver seção 3.2);
- b) a pasta, a altas relações a/c, pode ser viscosa a tal ponto de conseguir penetrar, ou penetrar mais que a baixas relações a/c, nos poros do agregado, resultando numa maior aderência/engrenamento entre as duas fases, o que tem efeito benéfico sobre a resistência do concreto (ver 3.5.2).

Ao analisar a microestrutura dos concretos convencionais e reciclados por meio de micrografia eletrônica de varredura, Leite (2001) verificou que a zona de transição destes era mais densa que a daqueles de tal forma que, a uma determinada escala de ampliação das imagens, foi impossível distinguir o agregado reciclado da pasta.

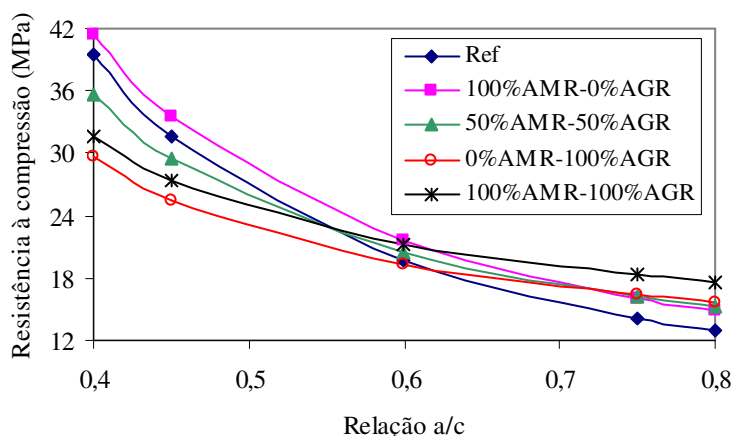


Figura 4.5: Resistência à compressão de concretos reciclados em função da relação a/c e do teor de substituição dos agregados (AMR = agregado miúdo reciclado e AGR = agregado graúdo reciclado) (LEITE, 2001).

Assim como Leite (2001), Carrijo (2005) verificou que os concretos reciclados obedecem à Lei de Abrams. Além disso, esta autora observou que a resistência à

compressão dos concretos reciclados foi sempre menor que a do concreto convencional e reduzia-se à medida que a massa específica dos agregados diminuía. Contudo, os concretos produzidos com agregados das faixas de densidade $d > 2,5 \text{ kg/dm}^3$ e $2,2 < d < 2,5 \text{ kg/dm}^3$ apresentaram valores de resistência próximos aos dos concretos convencionais. Também foi observado que ao reduzir a densidade dos agregados a diminuição da resistência foi mais intensa à medida que a relação a/c decresceu (Figura 4.6), mostrando que o agregado reciclado torna o concreto de maiores resistências mais suscetíveis à variação de sua densidade.

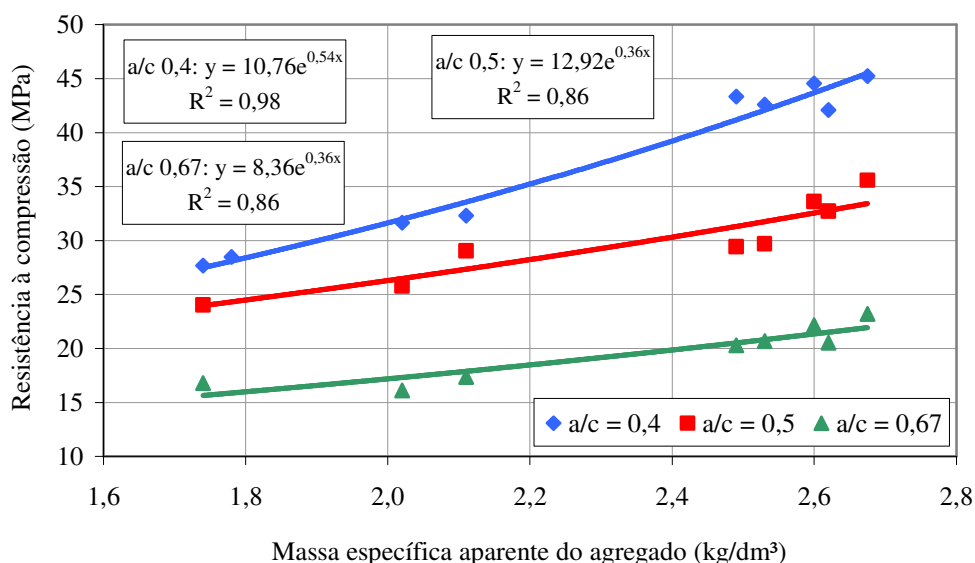


Figura 4.6: Resistência à compressão dos concretos em função da massa específica dos agregados reciclados e da relação a/c (CARRIJO, 2005).

Em vista dos resultados encontrados, Carrijo (2005) concluiu que a classificação dos agregados reciclados de acordo com a porosidade é mais útil e sensata que a classificação segundo a natureza mineral.

Gómez-Soberón (2002) estudou o efeito da porosidade sobre as propriedades do concreto produzido com diferentes teores de substituição do agregado natural por agregado de concreto reciclado. O autor constatou que à medida que o teor de agregados reciclados cresceu, a porosidade total cresceu e a resistência à compressão diminuiu.

Os comportamentos opostos observados por Khatib (2005) e Leite (2001) mostram que a influência do agregado miúdo reciclado sobre a resistência do concreto precisa ser mais bem compreendida. Porém, no que se refere ao uso do agregado graúdo reciclado, uma conclusão a que se pode chegar a partir dos estudos citados nesta seção é

que concretos reciclados de maior resistência podem ser conseguidos usando-se agregados graúdos mais densos (menos porosos) quer sejam eles totalmente reciclados ou misturas de natural com reciclado.

4.3 Módulo de elasticidade

Assim como a resistência à compressão, o módulo de elasticidade do concreto depende da porosidade de suas fases (pasta, agregado e zona de transição). Dessa forma, muitos comportamentos observados na resistência repetem-se no módulo de elasticidade. No caso do agregado, sua dimensão máxima, forma, textura superficial, granulometria e composição mineralógica também podem influir no módulo de elasticidade por influenciar a microfissuração da zona de transição. Todavia, a porosidade é mais importante em virtude de estar ligada à sua rigidez, resistência (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Da mesma forma que para a resistência à compressão, Khatib (2005) observou que os concretos produzidos tanto com agregado miúdo de concreto quanto com agregado miúdo de tijolos apresentaram módulo de elasticidade menor que o concreto convencional. Quanto maior o teor de substituição do agregado, menor foi o módulo de elasticidade. Porém, os concretos produzidos com agregados de tijolos apresentaram menores reduções. À maior idade (90 dias), estes concretos apresentaram redução de 9,9% contra 16,4% dos concretos contendo agregado de concreto, mostrando que, apesar de ser mais poroso, o agregado miúdo de tijolos foi menos prejudicial. Isto leva a crer que no caso do agregado miúdo reciclado, além da porosidade, outras características típicas dos agregados reciclados, tais como forma mais angular, textura superficial mais rugosa e granulometria eventualmente mais contínua também são relevantes.

O mesmo experimento fatorial de Leite (2001) apontou que os seguintes fatores tinham influência significativa sobre o módulo de elasticidade⁹: relação a/c, teor de substituição do agregado graúdo e a interação teor de substituição do agregado graúdo x teor de substituição do agregado miúdo; sendo os dois primeiros os fatores de maior influência. O módulo de elasticidade foi tanto menor quanto maior foram os valores

⁹ A autora só aproveitou o modelo ajustado aos valores medidos por meio de extensômetro elétrico, pois os outros dois métodos (extensômetro mecânico e LVDT) apresentaram grande variabilidade.

desses dois fatores, comprovando que alterações que levam ao aumento da porosidade das fases do concreto são capazes de reduzir o valor desta propriedade.

Nos concretos estudados por Carrijo (2005), os valores do módulo de elasticidade dos concretos convencionais e dos concretos reciclados contendo agregados graúdos reciclados das duas faixas de densidade superiores ($2,2 < d < 2,5 \text{ kg/dm}^3$ e $d > 2,5 \text{ kg/dm}^3$) foram bem semelhantes entre si e bem maiores que os dos concretos reciclados contendo agregados das duas faixas de densidade inferiores, para os agregados de ambas as naturezas (vermelho e cinza) e para as três relações a/c estudadas. Na verdade, quase todos os concretos contendo agregados reciclados das duas faixas de densidade superiores apresentaram módulos de elasticidade maiores que os do concreto convencional. Isto pode ter sido consequência da melhora da aderência entre a pasta e o agregado proporcionada pela porosidade deste.

Carrijo (2005) ainda constatou que a diminuição no módulo de elasticidade dos concretos reciclados foi semelhante para as três relações a/c (Figura 4.7), mas que, apesar disso, a diminuição foi mais sensível à redução da massa específica dos agregados reciclados. Por fim, a autora verificou que também o módulo de elasticidade do concreto foi mais influenciado pela massa específica dos agregados reciclados do que por sua natureza mineralógica.

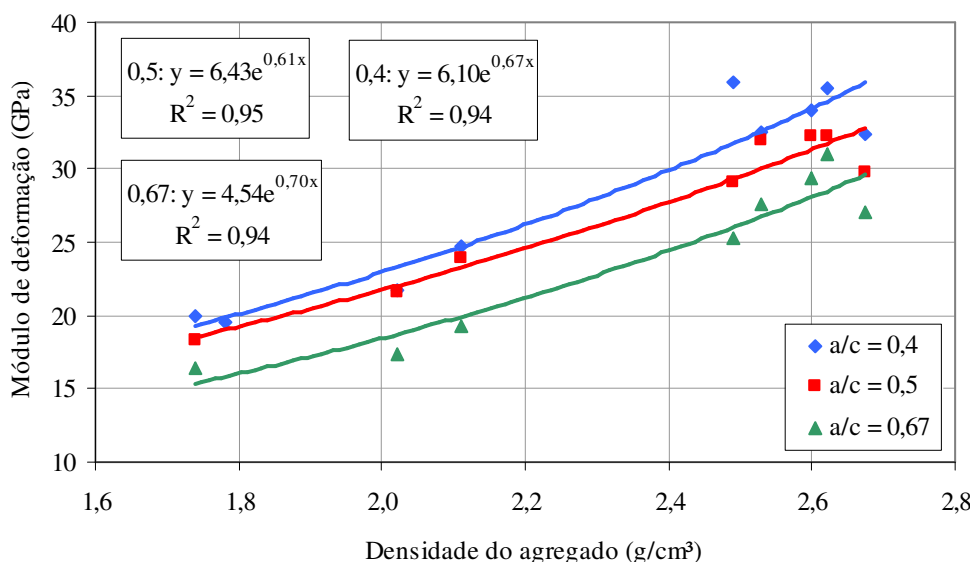


Figura 4.7: Módulo de elasticidade de concretos em função da massa específica dos agregados reciclados e da relação a/c (CARRIJO, 2005).

Da mesma forma que os outros estudos citados anteriormente, Gómez-Soberón (2002) verificou que a diminuição do módulo de elasticidade do concreto esteve associada ao aumento da porosidade do mesmo em consequência do aumento do teor de substituição do agregado natural por agregado de concreto reciclado.

Vê-se, então, que o módulo de elasticidade é influenciado pela porosidade do agregado reciclado de forma semelhante à resistência à compressão. Com base nisto e nos estudos aqui discutidos, pode-se concluir que o uso de agregados mais densos (menos porosos) permite obter concretos reciclados menos deformáveis (maior módulo de elasticidade).

4.4 Durabilidade

A durabilidade do concreto de cimento Portland é, segundo ACI (1991) apud Mehta e Monteiro (1994), sua capacidade de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração.

De acordo com Neville (1997), a deterioração do concreto acontece pela ação de fatores externos ou até internos ao próprio material, os quais podem ser mecânicos (impacto, abrasão, erosão ou cavitação), químicos (de origem exterior: íons agressivos e muitos líquidos e gases naturais ou industriais) ou físicos (efeito de altas temperaturas ou de diferenças entre os coeficientes de dilatação térmica do agregado e da pasta de cimento hidratada).

Apesar de tantos serem os fatores ligados à durabilidade do concreto, esta característica depende muito da facilidade com que fluidos (líquidos e gases) podem adentrar e movimentar-se em seu interior; de forma que ela é muito mais dependente da permeabilidade¹⁰ e capacidade de absorção do compósito, as quais são condicionadas à porosidade, do que de propriedades bastante aceitas, como resistência, módulo de elasticidade etc. (BRANDÃO, 1998; NEVILLE, 1997). De fato, segundo Mehta e Monteiro (1994), a maioria dos problemas de durabilidade do concreto tem como fator central um fluido em especial, a água. Além disso, por estar a resistência do concreto também relacionada à porosidade, é possível notar que ainda outros fatores de

¹⁰ Neville (1997) ressalta que *permeabilidade* é o escoamento de um fluido através de um meio poroso sob diferencial de pressão, mas lembra que, em geral, o termo é usado como referência ao movimento global de fluidos para e através do concreto. Brandão (1998) parece estar se referindo mais a este segundo significado.

deterioração, como o impacto e a abrasão, por exemplo, guardam relação com tal propriedade, o que reforça a necessidade de analisá-la.

Avaliar a porosidade do concreto associando-a à durabilidade trata-se, então, de avaliar o quão penetrável o compósito é aos fluidos¹¹ (NEVILLE, 1997), analisando a quantidade de poros, seus tamanhos, sua conectividade e tortuosidade, e/ou de como se dá o movimento desses fluidos, ou seja, com que facilidade acontece seu escoamento, difusão ou sorção. Vários são os ensaios que permitem quantificar – ou estimar – a porosidade do concreto. Exemplos são os ensaios de determinação da absorção de água, do índice de vazios, da permeabilidade aos gases e aos líquidos (pelo método de Figg, por exemplo), o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio etc.

O agregado reciclado tende a permitir uma densificação da zona de transição e diminuição da microfissuração dessa fase em razão de seu menor módulo de elasticidade permitir a compatibilização de sua deformação com a da pasta. Por si só, isso poderia levar a uma diminuição da facilidade de movimentação dos fluidos no concreto. Entretanto, o agregado reciclado é mais poroso que o agregado natural, e assim traz mais vazios para o composto, podendo também aumentar a conectividade entre os poros do sistema e, conseqüentemente, a facilidade com que fluidos se movem dentro deste.

Carrijo (2005) analisou a porosidade dos concretos produzidos com agregados reciclados separados em faixas de densidade medindo a absorção de água e o índice de vazios do compósito. Foi observado que essas duas propriedades cresceram à medida que a relação a/c aumentou (Figura 4.8) e a massa específica do agregado gráúdo diminuiu (Figura 4.9). Porém, essas alterações no concreto foram mais sensíveis às alterações da massa específica dos agregados. Novamente, a autora constatou que a porosidade do agregado teve efeito mais significativo que sua natureza mineralógica.

¹¹ ou seja, a *penetrabilidade* do concreto, e não a permeabilidade (NEVILLE, 1997) (ver nota anterior).

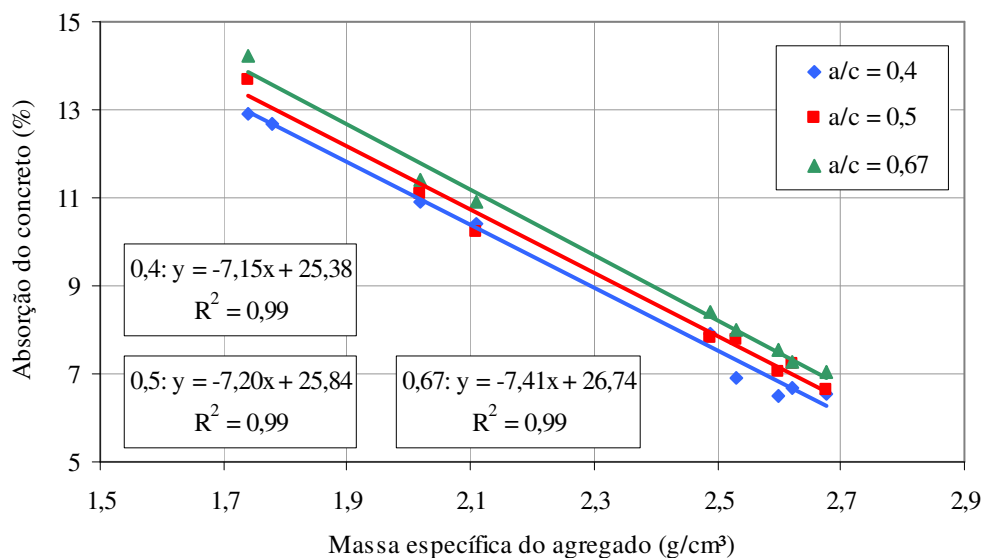


Figura 4.8: Absorção de água do concreto em função da massa específica dos agregados graúdos reciclados (CARRIJO, 2005).

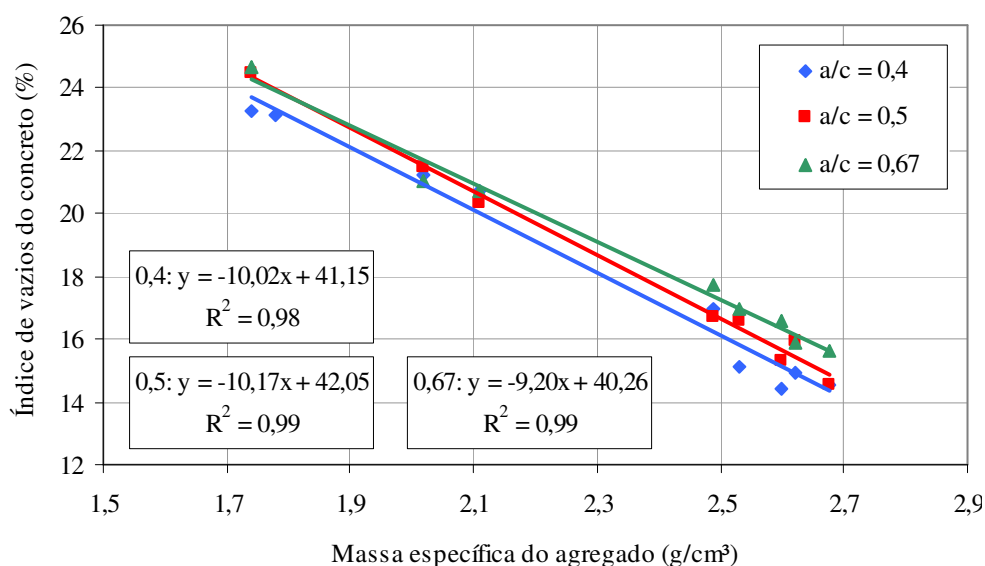


Figura 4.9: Índice de vazios do concreto em função da massa específica dos agregados graúdos reciclados (CARRIJO, 2005).

Comparando seus resultados com uma proposta de classificação de Helene (1983), Carrijo (2005) verificou que, quanto à porosidade, somente os concretos contendo agregados reciclados da faixa $d > 2,5 \text{ kg/m}^3$ e com as relações a/c 0,4 e 0,5 puderam ser classificados como *concretos normais*. Já em relação à absorção de água, todos os concretos reciclados foram classificados como *deficientes*.

Quebaud et al. (1999) estudaram a permeabilidade de concretos produzidos com agregados miúdo e graúdo reciclados e a permeabilidade de concretos produzidos com agregado miúdo natural e agregado graúdo reciclado. Em relação à permeabilidade à

água, os concretos totalmente reciclados foram prejudicados a ponto dessa propriedade ser de 2 a 3 vezes maior que a do concreto de referência. Quanto à permeabilidade aos gases (ar atmosférico e argônio) e a permeabilidade de superfície, os concretos totalmente reciclados apresentaram-se mais permeáveis que o concreto de referência; os concretos que só continham agregado graúdo reciclado apresentaram resultados intermediários.

No caso de estruturas de concreto armado, íons agressivos e substâncias ácidas podem adentrar os poros do concreto e atacar a armadura provocando sua corrosão (GENTIL, 1996 apud VIEIRA, 2003). Vieira (2003) estudou a corrosão sob ação de íons cloreto em concretos produzidos com diferentes relações a/c e teores de substituição dos agregados naturais por agregados de RCD miúdos e graúdos. A autora observou que o agregado miúdo reciclado influenciou positivamente na durabilidade dos concretos enquanto que o agregado graúdo reciclado aumentou o risco de corrosão da armadura, concluindo que a produção de concreto armado com agregados reciclados só não era viável em casos onde se realizasse a substituição total dos agregados ou a substituição total da fração graúda em altas relações a/c .

Semelhantemente à resistência à compressão e ao módulo de elasticidade, a durabilidade do concreto associada à sua porosidade mostra-se influenciada pela porosidade dos agregados. Pode-se concluir, de uma forma geral, a partir dos estudos aqui citados, que concretos reciclados menos penetráveis e, por conseguinte, mais duráveis, podem ser obtidos por meio da redução da porosidade da fase agregado. Redução essa conseguida através da redução do teor de participação de agregados reciclados na composição do concreto ou através da redução da porosidade individual do agregado graúdo reciclado.

Capítulo 5

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, apresenta-se a metodologia aplicada na etapa experimental do trabalho. Em seguida, é feita uma descrição da obtenção dos agregados reciclados e de suas propriedades, bem como das propriedades dos agregados naturais e dos demais materiais usados na composição dos concretos. A comparação e discussão das propriedades dos agregados naturais e reciclados serão feitas no próximo capítulo.

5.1 Planejamento da parte experimental

Em atendimento ao objetivo principal do trabalho, que é o de analisar algumas das propriedades do concreto produzido com agregados de RCD reciclado as quais permitam caracterizá-lo quanto à possibilidade de aplicação como material estrutural, foram tomadas como variáveis de resposta (variáveis dependentes) do estudo as seguintes propriedades do concreto:

- a) resistência à compressão;
- b) módulo de elasticidade;
- c) absorção de água;
- d) índice de vazios;
- e) tempo de permeabilidade ao ar.

Também foi medida a consistência de todos os concretos pelo abatimento do tronco de cone. Entretanto, essa propriedade não foi um dos principais focos do estudo (ver 5.4.2).

A influência do agregado de RCD reciclado sobre as propriedades do concreto foi avaliada não só através das formas comumente usadas em trabalhos experimentais (comparação de valores, construção de gráficos, ajustes de modelos etc.) mas também através de um experimento fatorial. Porém, para esta segunda parte, foram adotadas

como variáveis de resposta somente a resistência à compressão, a absorção de água e o índice de vazios.

Experimentos fatoriais, também citados na literatura como projeto de experimentos ou planejamentos estatísticos, são constituídos de ferramentas estatísticas que permitem uma análise mais confiável dos resultados visto que avaliam a interação entre as variáveis de entrada do estudo, avaliam o quão são importantes seus efeitos e determinam um ajuste ótimo das mesmas de forma a maximizar o desempenho do experimento. Além disso, tornam a experiência pouco suscetível às variáveis externas que não estão sendo medidas e, por vezes, permitem a minimização dos custos (DAL MOLIN et al., 2005; LEITE, 2001; MONTGOMERY; RUNGER, 2003; VIEIRA, 2003).

O experimento fatorial compreendeu a realização da análise da variância (ANOVA), o ajuste de um modelo aos dados experimentais, a análise dos resíduos do modelo e a análise de gráficos de valores previstos em função dos valores observados.

As variáveis de entrada do experimento – também chamadas de variáveis independentes ou fatores, no caso do experimento fatorial – foram os seguintes parâmetros relativos à composição dos concretos:

- a) Relação água/cimento: adotados 3 valores – ou níveis, no caso do experimento fatorial – 0,67, 0,50 e 0,40 com o intuito de contemplar a faixa de relações a/c e de resistências abordadas na NBR 6118 (2003)¹² para concretos estruturais. Para o experimento fatorial, foi adotado o consumo de cimento referente àquelas relações a/c, ou seja, 300, 400 e 500 kg/m³, respectivamente, uma vez que o método exige, neste caso, que os níveis dos fatores sejam igualmente espaçados;
- b) Massa específica do agregado graúdo reciclado: adotados 2 valores/níveis. O menor valor foi a própria massa específica do RCD coletado (2,08 kg/dm³). O maior valor foi 2,25¹³ kg/dm³. Esta maior densidade foi obtida misturando-se agregado de concreto reciclado ao agregado obtido do RCD. O primeiro agregado foi chamado de G1, o segundo foi chamado de G2;

¹² Tabela 7.1 (pág. 15) da referida norma.

¹³ 2,25 kg/m³ foi o valor pretendido, usado na Equação 1 (ver 5.2.1). O valor efetivamente medido foi 2,27 kg/m³ (ver Tabela 5.7).

- c) Tipo do agregado miúdo: adotados 2 tipos/níveis: agregado 100% natural (areia natural de rio) e agregado 100% reciclado (agregado miúdo de RCD reciclado) no intuito de verificar a viabilidade da reciclagem massiva das frações do agregado reciclado obtido de RCDs.

Fatores que foram mantidos fixos na realização dos experimentos:

- a) idade de realização dos ensaios nos concretos: foi escolhida a idade de 28 dias para a realização dos ensaios de medição das propriedades mecânicas e do tempo de permeabilidade ao ar. Essa também foi a idade de início do ensaio que media a absorção de água e o índice de vazios dos concretos;
- b) pré-molhagem de todos os agregados reciclados (miúdo e graúdo) com o intuito de evitar que os mesmos absorvessem parte da água da mistura;
- c) tipo de cura: o método de cura adotado para todos os concretos foi a imersão total dos corpos-de-prova em água.

Da combinação das variáveis independentes (fatores) em seus vários níveis, resultaram 12 traços de concreto a serem estudados (Tabela 5.1). Além deles, foram produzidos 3 concretos de referência, um para cada relação a/c, resultando num total de 15 traços. O experimento fatorial não incluiu os concretos de referência, pois o mesmo foi empregado com o objetivo principal de analisar a influência dos agregados reciclados sobre as propriedades dos concretos.

Tabela 5.1: Traços gerados da combinação dos fatores do experimento junto com os traços de referência.

Consumo de cimento (kg/m³) - relação a/c	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Nome do traço ¹	Número de corpos-de-prova (ensaios)
300 - 0,67	natural	reciclado $\gamma = 2,08 \text{ kg/dm}^3$	67MRG1	3 cilíndricos 10x20 cm (resistência à compressão) + 3 cilíndricos 10x20 cm (módulo de elasticidade) + 3 cilíndricos 10x20 cm (absorção e índice de vazios) + 1 prismático 15x15x50 cm (permeabilidade ao ar)
		reciclado $\gamma = 2,27 \text{ kg/dm}^3$	67MRG2	
	reciclado	reciclado $\gamma = 2,08 \text{ kg/dm}^3$	67MNG1	
		reciclado $\gamma = 2,27 \text{ kg/dm}^3$	67MNG2	
400 - 0,50	natural	reciclado $\gamma = 2,08 \text{ kg/dm}^3$	50MRG1	
		reciclado $\gamma = 2,27 \text{ kg/dm}^3$	50MRG2	
	reciclado	reciclado $\gamma = 2,08 \text{ kg/dm}^3$	50MNG1	
		reciclado $\gamma = 2,27 \text{ kg/dm}^3$	50MNG2	
500 - 0,40	natural	reciclado $\gamma = 2,08 \text{ kg/dm}^3$	40MRG1	
		reciclado $\gamma = 2,27 \text{ kg/dm}^3$	40MRG2	
	reciclado	reciclado $\gamma = 2,08 \text{ kg/dm}^3$	40MNG1	
		reciclado $\gamma = 2,27 \text{ kg/dm}^3$	40MNG2	
Concretos de referência				
300 - 0,67	natural	natural	Ref67	
400 - 0,50	natural	natural	Ref50	
500 - 0,40	natural	natural	Ref40	
TOTAL				135 C + 15 P

Notas: ¹ Os dois números iniciais referem-se à relação a/c; MR = agregado miúdo reciclado e MN = agregado miúdo natural; G1 = agregado graúdo reciclado menos denso e G2 = agregado graúdo reciclado mais denso.

A estimativa do erro experimental do experimento fatorial foi obtida mediante a realização de uma só réplica, o que significa que para a resistência à compressão, a absorção de água e o índice de vazios todos os traços de concreto reciclado foram moldados duas vezes. A decisão por se fazer só uma réplica levou em consideração as quantidades de materiais disponíveis e o tempo disponível. A Tabela 5.2 mostra a codificação dos níveis dos fatores.

Tabela 5.2: Codificação dos níveis dos fatores no experimento fatorial.

Fator	Níveis
Consumo de cimento (kg/m ³)	300 (-1), 400 (0), 500 (+1)
Densidade do agregado graúdo reciclado (kg/dm ³)	2,08 (-1), 2,27 (+1)
Tipo de agregado miúdo	reciclado (-1), natural (+1)

A execução da parte experimental seguiu a sequência de etapas mostrada no diagrama da Figura 5.1.



Figura 5.1: Etapas da parte experimental do trabalho.

5.2 Materiais componentes

5.2.1 Agregados reciclados

O resíduo de construção e demolição que serviu de matéria-prima para os agregados reciclados foi obtido durante o desenvolvimento do Projeto Desentulho¹⁴ para a cidade de Maceió. A partir dos dados levantados nesse projeto, foram selecionados como pontos de coleta os 8 maiores locais de deposição ilegal de RCD dentro da malha urbana da cidade. Em cada ponto, após as análises de campo do RCD, recolheu-se somente a fração mineral do mesmo para uso neste trabalho. O material foi armazenado no Laboratório de Estruturas e Materiais (Lema) do NPT/CTEC/Ufal.

O resíduo de concreto consistiu em corpos-de-prova oriundos de trabalhos de pesquisa e de amostras de concreto de várias obras, ambos ensaiados e armazenados no Lema/NPT/Ufal.

Foram duas as etapas do processo usado para se obter agregados a partir do RCD e dos corpos-de-prova de concreto:

¹⁴ Ver referência Gomes et al. (2005).

- 1) Cominuição do RCD/resíduo de concreto em um moinho de martelos (Figura 5.2a);

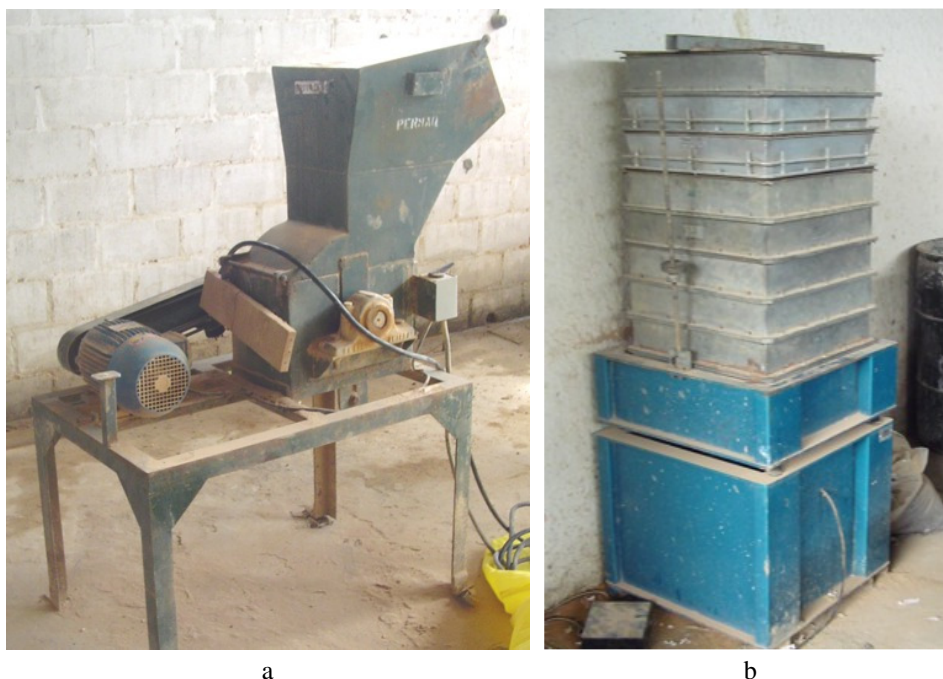


Figura 5.2: (a) Moinho de martelos usado na cominuição dos resíduos. (b) Peneirador mecânico usado na separação dos agregados.

- 2) Separação, por meio de peneirador mecânico (Figura 5.2b), do agregado obtido em duas faixas granulométricas de acordo com a NBR 7211 (2005): agregado graúdo, cujos grãos passam pela peneira # 75 mm e ficam retidos na peneira # 4,75 mm; e agregado miúdo, cujos grãos passam na peneira # 4,75 mm e ficam retidos na peneira # 0,15 mm, se bem que neste trabalho a fração do agregado miúdo de RCD passante na peneira # 0,15 mm não foi descartada em virtude de se almejar uma utilização massiva dos produtos obtidos do processamento do RCD.

O agregado miúdo obtido do processamento do concreto não foi utilizado no estudo.

Observou-se que a quantidade de agregado miúdo gerada foi maior que a de agregado graúdo na proporção de cerca de 2:1, o que confirma as afirmações da literatura de que o moinho de martelos gera grande proporção de miúdos.

O maior tamanho encontrado para os grãos dos agregados graúdos foi 25,4 mm. No entanto, para que suas dimensões máximas se equiparassem a do agregado graúdo

natural usado, a fração retida nessa peneira – que se resumia a alguns poucos grãos – foi descartada, restando como maiores grãos aqueles retidos na peneira # 19 mm.

O agregado gráúdo mais denso (G2) não foi obtido de imediato. Optou-se por realizar a mistura do agregado gráúdo de RCD reciclado e do agregado de concreto reciclado somente na betoneira, no momento de produção dos concretos. O método utilizado para determinar o percentual de participação de cada agregado na mistura e assim manipular sua resistência fez uso de uma regra de mistura¹⁵ para a massa específica.

Foi usada a massa específica dos agregados como parâmetro base em virtude da mesma estar intimamente ligada à porosidade do material de forma que, como já citado, segundo John et al. (2006), a separação dos mesmos por massa específica vem a ser, de forma indireta, uma separação por resistência mecânica dos grãos. Também conta a favor do uso dessa propriedade o fato de sua determinação ser relativamente fácil.

Dessa forma, a massa específica de uma mistura formada por dois agregados é dada pela Equação 1 (regra de mistura para a massa específica)

$$\% M_1 \cdot \gamma_1 + \% M_2 \cdot \gamma_2 = \gamma \quad (1)$$

onde:

- $\% M_1$ e $\% M_2$ são, respectivamente, as porcentagens de participação do agregado 1 e do agregado 2, em massa;
- γ_1 e γ_2 são, respectivamente, as massas específicas do agregado 1 e do agregado 2;
- γ é a massa específica da mistura;

Juntando-se à Equação 1 a Equação 2, a qual representa uma relação óbvia para a mistura, isto é, que a soma das participações percentais de cada agregado tem de ser 100%, tem-se um sistema de equações que pode ser resolvido para $\% M_1$ e $\% M_2$ desde que sejam conhecidas as massas específicas dos agregados 1 e 2 e a massa específica que se pretende para a mistura.

$$\% M_1 + \% M_2 = 1 \quad (2)$$

¹⁵ Numa regra de mistura, uma determinada propriedade de um compósito é expressa matematicamente em termos das propriedades dos constituintes (GROVE, 2007).

As Equações 1 e 2 e ainda uma terceira, a qual relaciona a absorção de água da mistura e as absorções e teores de cada material que a compõem, foram também usadas com agregados reciclados e validadas experimentalmente por Angulo e John (2001).

A manipulação propriamente dita da resistência consiste em estabelecer para γ um valor dentro de uma faixa de massa específica previamente estudada/estabelecida – à cada faixa estaria associado um campo de aplicação apropriado para o agregado reciclado. Neste estudo foram usadas como referência as faixas de massa específica abordadas nos estudos de Angulo (2005) e Carrijo (2005) apesar dos autores terem feito a separação dos agregados por meio de um processo diferente. Aqui, cada agregado a ser misturado já se constituía numa mistura de grãos de diferentes massas específicas.

5.2.1.1 Agregado miúdo reciclado

A Figura 5.3 mostra o aspecto visual do agregado miúdo reciclado.



Figura 5.3: Aspecto visual do agregado miúdo de RCD reciclado.

A Tabela 5.3 apresenta a distribuição granulométrica do agregado miúdo reciclado, bem como outras informações ligadas à granulometria. As demais propriedades do agregado miúdo são mostradas na Tabela 5.4.

Tabela 5.3: Propriedades granulométricas do agregado miúdo reciclado determinadas segundo a NBR NM 248 (2003).

Abertura da peneira	% da massa (média)		
	retida	acumulada	
9,5 mm	0	0	-
6,3 mm	0	-	0
4,75 mm	0	0	-
2,36 mm	20,2	20,2	-
1,18 mm	17,4	37,6	-
0,6 mm	19,1	56,7	-
0,3 mm	18,3	75,0	-
0,15 mm	13,3	88,3	-
fundo	11,7	-	100,0
total	100,0	277,8	-
Tamanho máximo (mm)		4,75	
Módulo de finura		2,78	
Zona granulométrica		utilizável	

Tabela 5.4: Outras propriedades do agregado miúdo reciclado.

Propriedade	Valor	Norma
Absorção de água	9,34 %	NBR NM 30:2000
Massa específica	2,50 kg/dm ³	NBR 9776:1987
Massa unitária em estado solto	1,33 kg/dm ³	NBR 7251:1982
Teor de material com D < 0,075 mm	8,61 %	NBR NM 46:2003
Teor de matéria orgânica	< 300 ppm	NBR NM 49:2001

5.2.1.2 Agregados graúdos reciclados

A massa específica escolhida para o agregado graúdo mais denso (G2) foi 2,25 kg/dm³, a ser usada na Equação 1, ou seja, o valor de γ ($= \gamma_{G2}$). A escolha de tal valor levou em consideração que:

- Carrijo (2005) e Angulo (2005) apontam uma “massa específica de corte” entre 2,2 e 2,3 kg/dm³ para agregados graúdos reciclados; apontaram ainda que concretos produzidos com agregados menos densos que isso seriam menos eficientes para aplicações estruturais;
- As quantidades de agregados a serem misturados (agregado de RCD reciclado e agregado de concreto reciclado) para obtenção dessa massa específica eram mais compatíveis com o que se tinha disponível armazenado;

A massa específica do agregado G1 foi $2,08 \text{ kg/dm}^3$ e a do resíduo de concreto foi $2,30 \text{ kg/dm}^3$. Resolvendo o sistema formado pelas Equações 1 e 2, com $\gamma = 2,25$, $\gamma_1 = \gamma_{G1} = 2,08$ e $\gamma_2 = \gamma_{ACR}$ (agregado de concreto reciclado) = $2,30$ chegou-se a $\%M_1 = \%M_{G1} = 22,74$ e $\%M_2 = \%M_{ACR} = 77,26$ (agregado de concreto reciclado). No intuito de verificar a eficiência do método, duas amostras foram formadas e ensaiadas para determinação da massa específica do agregado G2. O valor medido foi, então, $2,27 \text{ kg/dm}^3$, o que atesta a validade do uso da regra de mistura para a massa específica com agregados reciclados.

A Figura 5.4 mostra o aspecto visual dos agregados graúdos reciclados G1 e G2.

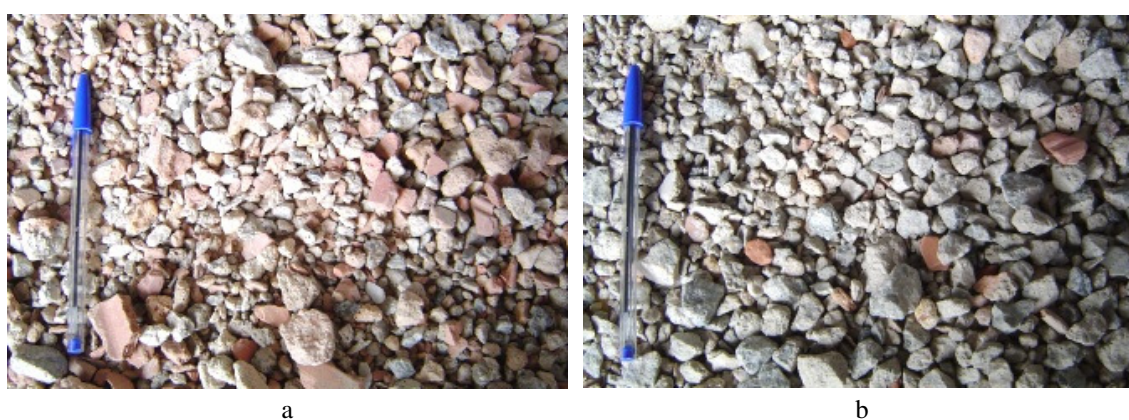


Figura 5.4: Aspecto visual dos agregados graúdos de RCD reciclado. G1 (a) e G2 (b).

A Tabela 5.5 apresenta as distribuições granulométricas dos agregados graúdos reciclados, bem como outras informações ligadas à granulometria. A composição dos dois agregados segundo a NBR 15116 (2004) consta da Tabela 5.6, e as demais propriedades do agregado miúdo são mostradas na Tabela 5.7. A Tabela 5.8 mostra os valores de absorção de água de G1 e G2 em função do tempo.

Tabela 5.5: Propriedades granulométricas dos agregados graúdos reciclados G1 e G2 segundo a NBR NM 248 (2003).

Abertura da peneira	Agregado graúdo G1			Agregado graúdo G2		
	% da massa (média)			% da massa (média)		
	retida	acumulada		retida	acumulada	
25 mm	0	-	0	0	-	0
19 mm	2,5	2,5	-	0,74	0,7	-
12,5 mm	16,0	-	18,4	14,9	-	15,6
9,5 mm	17,9	36,4	-	18,6	34,2	-
6,3 mm	35,2	-	71,6	36,3	-	70,5
4,75 mm	18,0	89,5	-	21,2	91,7	-
2,36 mm	0	89,5	-	0	91,7	-
1,18 mm	0	89,5	-	0	91,7	-
0,6 mm	0	89,5	-	0	91,7	-
0,3 mm	0	89,5	-	0	91,7	-
0,15 mm	0	89,5	-	0	91,7	-
fundo	10,5	-	100,0	8,4	-	100,0
total	100,0	576,0	--	100,0	584,9	--
Tamanho máximo (mm)	19			19		
Módulo de finura	5,76			5,85		
Zona granulométrica	nenhuma			nenhuma		

Tabela 5.6: Composição dos agregados graúdos reciclados G1 e G2 de acordo com a NBR 15116 (2004).

Materiais		Agregado graúdo	
		G1	G2
À base de cimento (g1)		53,71%	47,41%
Rochosos (g2)		26,07%	48,07%
Cerâmicos (g3)		19,90%	4,42%
“Impurezas” (g4)	cerâmica vidrada	0,17%	0,10%
	outras	0,15%	0,00%

Tabela 5.7: Outras propriedades dos agregados graúdos reciclados.

Propriedade		Ag. graúdo G1	Ag. graúdo G2	Norma
Absorção de água (%)		8,41	5,37	NBR NM 53:2003
Massa específica (kg/dm³)		2,08	2,27	
Massa unitária no estado solto (kg/dm³)		1,13 (hum. = 1,15 %)	1,23 (hum. = 1,27 %)	NBR 7251:1982
Índice de forma (por fração granulométrica)	12,5 mm	2,1	2,1	NBR 7809:1983
	9,5 mm	2,4	2,0	
	6,3 mm	2,4	2,2	
	4,75 mm	2,4	2,2	
Índice de forma de todo o ag.		2,3	2,2	
% material com D < 0,075 mm		0,75	0,45	NBR NM 46:2003

Tabela 5.8: Absorção dos agregados graúdos G1 e G2 em função do tempo.

Tempo (min)	% da absorção total	
	G1	G2
0	0,0	0,0
1	70,2	63,8
2	80,4	79,3
3	83,6	83,6
4	85,0	85,4
5	85,9	86,3
6	87,0	86,9
7	87,2	87,2
8	87,6	87,8
9	87,9	88,1
10	88,3	88,8
20	89,7	90,0
30	90,6	90,9
40	91,5	91,5
50	91,7	92,1
60	92,3	92,7
120	94,2	94,8
180	95,3	96,1
240	96,1	97,3
300	96,4	97,3
360	98,1	97,9
1440	100,0	100,0

5.2.2 Agregados naturais

5.2.2.1 Agregado miúdo

O agregado miúdo natural utilizado foi uma areia natural de rio. A Tabela 5.9 apresenta sua distribuição granulométrica, bem como outras informações ligadas à granulometria. As demais propriedades da areia são mostradas na Tabela 5.10.

Tabela 5.9: Propriedades granulométricas da areia determinadas segundo a NBR NM 248 (2003).

Abertura da peneira	% da massa (média)		
	retida	acumulada	
9,5 mm	0	0	-
6,3 mm	1,0	-	1,0
4,75 mm	2,0	3,0	-
2,36 mm	6,0	9,0	-
1,18 mm	17,0	26,0	-
0,6 mm	31,0	57,0	-
0,3 mm	32,0	89,0	-
0,15 mm	9,0	98,0	-
fundo	2,0	-	100,0
total	100,0	282	-
Tamanho máximo (mm)		4,75	
Módulo de finura		2,82	
Zona granulométrica		utilizável	

Tabela 5.10: Outras propriedades da areia.

Propriedade	Valor	Norma
Absorção de água	1,22 %	NBR NM 30:2000
Massa específica	2,68 kg/dm ³	NBR 9776:1987
Massa unitária em estado solto	1,48 kg/dm ³	NBR 7251:1982
Teor de material com D < 0,075 mm	1,0%	NBR NM 46:2003
Teor de matéria orgânica	< 300 ppm	NBR NM 49:2001

5.2.2.2 Agregado graúdo

O agregado graúdo natural utilizado foi uma brita de origem granítica comercialmente conhecida como brita 1 ($D_{\max} = 19$ mm), típica da região. A Tabela 5.11 apresenta sua distribuição granulométrica, bem como outras informações ligadas à granulometria. Suas demais propriedades constam da Tabela 5.12.

Tabela 5.11: Propriedades granulométricas da brita 1 segundo a NBR NM 248 (2003).

Abertura da peneira	% da massa (média)		
	retida	acumulada	
25,4 mm	0	-	0
19 mm	0,1	0,1	-
12,5 mm	61,4	-	61,5
9,5 mm	31,9	93,4	-
6,3 mm	4,8	-	98,2
4,8 mm	0,5	98,7	-
2,4 mm	0	98,7	-
1,18 mm	0	98,7	-
0,6 mm	0	98,7	-
0,3 mm	0	98,7	-
0,15 mm	0	98,7	-
fundo	1,3	-	100,0
total	100,0	685,7	--
Tamanho máximo (mm)		19	
Módulo de finura		6,86	
Zona granulométrica		9,5/25	

Tabela 5.12: Outras propriedades da brita 1.

Propriedade		Brita 1	Norma
Absorção de água (%)		0,49	NBR NM 53:2003
Massa específica (kg/dm³)		2,62	
Massa unitária no estado solto (kg/dm³)		1,43 (seco ao ar)	NBR 7251:1982
Índice de forma (por fração granulométrica)	12,5 mm	2,3	NBR 7809:1983
	9,5 mm	3,0	
	6,3 mm	2,6	
	4,75 mm	- ¹	
Índice de forma de todo o agregado		2,6	
% material com D < 0,075 mm		0,33	NBR 7219:1987

Notas: ¹ não havia material retido nesta peneira.

5.2.3 Aglomerante

Foi utilizado um cimento Portland composto com fíler (CPII-F-32) normalmente encontrado no mercado de Maceió. Suas características físico-mecânicas e químicas, fornecidas pelo fabricante, constam da Tabela 5.13 e da Tabela 5.14, respectivamente.

Tabela 5.13: Características físico-mecânicas do cimento utilizado.

Propriedade	Valor	Norma	Limites da NBR 11578:1991
Área específica (Blaine)	3350 cm ² /g	NBR NM 76	≥ 2600
Massa específica	3,09 kg/dm ³	NBR NM 23	não aplicável
Densidade aparente	1,2 kg/dm ³	-	não aplicável
Finura - resíduo na peneira # 0,075 mm	2,6%	NBR 12826	≤ 12,0
Finura - resíduo na peneira # 0,044 mm	13,8%	NBR 12826	não aplicável
Água da pasta de consistência normal	26,4%	NBR NM 43	não aplicável
Início de pega	2h50min	NBR NM 65	≥ 1
Fim de pega	3h45min	NBR NM 65	≤ 1,0 (facultativo)
Expansibilidade de Le Chatelier - a quente	0,50 mm	NBR 11582	≤ 5
Resistência à compressão aos 3 dias	25,8 MPa	NBR 7215:1996	≥ 10
Resistência à compressão aos 7 dias	31,7 MPa		≥ 20
Resistência à compressão aos 28 dias	39,6 MPa		≥ 32

Tabela 5.14: Características químicas do cimento utilizado.

Propriedade	Valor (%)	Norma	Limites da NBR 11578:1991
Perda ao fogo - PF	4,80	NBR NM 18	≤ 6,5
Óxido de magnésio - MgO	1,94	PO 00435 ¹	≤ 6,5
Anidrido sulfúrico - SO ₃	2,61	PO 00435	≤ 4,0
Resíduo insolúvel - RI	0,72	NM 15	≤ 16,0
Equivalente alcalino em Na ₂ O (0,658 x K ₂ O% + Na ₂ O%)	0,88	-	não aplicável
Óxido de cálcio livre - CaO Livre	1,53	NBR NM 13	não aplicável

Nota: ¹ Norma interna do fabricante do cimento.

5.2.4 Água

A água usada nos ensaios de caracterização dos materiais e na confecção dos traços de concreto foi a água disponível na rede de abastecimento da Ufal.

5.2.5 Aditivo

Utilizou-se um superplastificante de 3ª geração com base em cadeia de éter carboxílico modificado (outras características constam da Tabela 5.15). Sua escolha não se baseou em nenhum critério específico, mas tão somente no fato de que se desejava um aditivo eficiente.

Tabela 5.15: Características do superplastificante (dados fornecidos pelo fabricante).

Propriedade	Valor
Função Principal	Superplastificante 3ª geração
Base química	Policarboxilatos
Aspecto	Líquido bege
Densidade	1,067 a 1,107 g/cm ³
pH	5 a 7
Sólidos	28,5 a 31,5%
Viscosidade	95 a 160 Cps

5.3 Ensaio realizados nos agregados

Os agregados naturais foram caracterizados segundo os métodos especificados nas normas da ABNT já citadas nas seções anteriores.

Salvo o caso da determinação da composição, os agregados reciclados foram caracterizados também segundo os mesmos métodos especificados para agregados naturais em virtude de não existirem normas próprias para caracterização dos mesmos. Dessa forma, vale registrar que:

- o atual método de determinação da massa específica de agregados miúdos estabelecido pela ABNT (NBR NM 52:2003) revelou-se não ser adequado para o agregado reciclado, pois os valores de massa específica obtidos em mais de um ensaio foram maiores que o do agregado natural quando o que se esperava era o oposto, uma vez que já se percebia visualmente que a composição do agregado reciclado era abundante em cerâmica vermelha (Figura 5.3), um material de baixa densidade. Foi necessário recorrer ao método especificado na versão anterior da norma para que tal propriedade pudesse ser quantificada de forma mais adequada: o método do frasco de Chapman (NBR 9776:1987);
- no ensaio de determinação da composição granulométrica não foram realizados movimentos vigorosos com o jogo de peneiras para que as fases menos resistentes dos agregados (argamassas, por exemplo) não se fragmentassem a ponto de alterar demasiadamente os resultados do ensaio;
- apesar de outros trabalhos não recomendarem, as massas específicas dos agregados grãos reciclados foram determinadas pelo mesmo método usado para os agregados naturais (NBR NM 53:2003). A secagem superficial dos agregados com o pano, conforme manda o método, foi feita com cautela para

que os mesmos não se fragmentassem; assim, os resultados obtidos apresentaram precisão satisfatória.

5.4 Material concreto

5.4.1 Composição

A dosagem dos concretos não seguiu nenhum método comumente usado para este fim.

Inicialmente, definiram-se os consumos de cimento 300, 400 e 500 kg/dm³. A quantidade de cada um dos outros componentes foi calculada tendo-se como objetivo a obtenção de 1 m³ de concreto. Usou-se como base o método dos volumes absolutos (NEVILLE, 1997), o qual admite que o volume do concreto adensado é igual à soma dos volumes absolutos dos seus componentes.

O próximo passo foi determinar a quantidade de água para que se obtivessem as três relações a/c apontadas em 5.1, contemplando, inclusive, a faixa de relações a/c e de resistências abordadas na NBR 6118 (2003). Fixou-se, então, a quantidade de água em 20% de 1 m³ para todos os concretos, o que corresponde a 200 dm³ ou 200 kg de água, obtendo-se assim as relações 0,67, 0,5 e 0,4 para os consumos de cimento 300, 400 e 500 kg/dm³, respectivamente.

A fração volumétrica do agregado graúdo foi obtida buscando-se o auxílio do método de dosagem do IPT¹⁶. Para isso, fez-se uma análise dos traços experimentais propostos por esse método de dosagem de concretos. Tomou-se como referência o traço unitário normal 1:5 (cimento:(agregado miúdo+agregado graúdo)). Para qualquer traço, seja rico, normal ou pobre, o método admite uma variação do teor de argamassa seca de 35% a 65%. Assim, procurou-se determinar qual seria o volume de agregado graúdo para o traço normal com um teor de argamassa igual a 50%. Atribuindo-se uma massa específica de 3 kg/dm³ para o cimento, 2,62 kg/dm³ para a brita e 2,61 kg/dm³ para a areia, partiu-se para determinar tal volume a partir da média entre os volumes de agregado graúdo dos traços com teor de argamassa iguais a 49% e 51%¹⁷ considerando uma relação a/c igual a 0,5 e consumo de cimento igual a 400 kg/dm³ (tabela 17).

¹⁶ Ver referência Helene e Terzian (1993), p. 261.

¹⁷ A tabela com os traços para estudo experimental encontrada em Helene e Terzian (1993) varia os teores de argamassa de 2 em 2 pontos percentuais e não apresenta o valor 50%.

Tabela 5.16: Cálculo do volume de agregado graúdo para o traço com teor de argamassa igual a 50%.

% argamassa	Traço unitário normal	Cimento	Areia	Brita	Água	Vol. médio de agregado gráudo (%)
		Massa dos materiais para 1 m³ de concreto (kg)				
49	1:1,94:3,06	400	776	1224	200	(42,55 + 40,88)/2 = 41,72
		Vol. dos materiais para 1 m³ de concreto (dm³)				
		133,33	297,32	467,18	200,00	
		% do volume (em relação a 1 m³)				
		12,15%	27,08%	42,55%	18,22%	
51	1:2,06:2,94	Massa dos materiais para 1 m³ de concreto (kg)				
		400	824	1176	200	
		Vol. dos materiais para 1 m³ de concreto (dm³)				
		133,33	315,71	448,85	200,00	
		% do volume (em relação a 1 m³)				
		12,15%	28,76%	40,88%	18,22%	

Apesar do teor de agregado graúdo apontado nos cálculos da Tabela 5.16 ser 41,72%, preferiu-se adotar o valor de 40% em razão de se querer compatibilizar o estudo às quantidades de agregados graúdos reciclados disponíveis.

Definidos os volumes de todos os outros materiais, o volume do agregado miúdo, por conseguinte, foi calculado como sendo o volume restante para se completar 1 m³.

Para que todos os traços produzissem o mesmo volume de concreto, facilitando a comparação dos resultados finais, primeiramente definiram-se os traços de referência em volume (teor volumétrico de cada material) e só então foram calculadas as quantidades de cada material, em massa, para os mesmos e para os concretos reciclados (Tabela 5.17).

Tabela 5.17: Composição dos concretos produzidos (traços em massa e em volume).

Traço	Relação a/c	Materiais em volume (dm ³)				Materiais em massa (kg)				Teor de argam. seca
		água	cimento	agreg. miúdo	agreg. graúdo	água	cimento	agreg. miúdo	agreg. graúdo	
67MRG1	0,67	200	99	301	400	200	300	752,5	832	0,56
67MRG2	0,67	200	99	301	400	200	300	752,5	900	0,54
67MNG1	0,67	200	99	301	400	200	300	806,7	832	0,57
67MNG2	0,67	200	99	301	400	200	300	806,7	900	0,55
50MRG1	0,50	200	132	268	400	200	400	670,0	832	0,56
50MRG2	0,50	200	132	268	400	200	400	670,0	900	0,54
50MNG1	0,50	200	132	268	400	200	400	718,2	832	0,57
50MNG2	0,50	200	132	268	400	200	400	718,2	900	0,55
40MRG1	0,40	200	165	235	400	200	500	587,5	832	0,57
40MRG2	0,40	200	165	235	400	200	500	587,5	900	0,55
40MNG1	0,40	200	165	235	400	200	500	629,8	832	0,58
40MNG2	0,40	200	165	235	400	200	500	629,8	900	0,56
Concretos de referência										
Ref67	0,67	200	99	301	400	200	300	806,7	1048	0,51
Ref50	0,50	200	132	268	400	200	400	718,2	1048	0,52
Ref40	0,40	200	165	235	400	200	500	629,8	1048	0,52

5.4.2 Preparo, moldagem e cura dos concretos

Como foi observado na literatura que a alta absorção dos agregados reciclados pode atuar no sentido de diminuir a relação a/c efetiva da mistura e, conseqüentemente, prejudicar a consistência do concreto, duas medidas foram tomadas:

- efetuar a pré-molhagem dos agregados reciclados miúdos e graúdos - Antes de iniciar a mistura molhou-se o agregado com uma quantidade de água igual a 70% do valor de sua absorção total. O valor de 70% para os agregados graúdos foi determinado a partir de suas curvas de absorção em função do tempo (Tabela 5.8 e Figura 6.4), e refere-se à absorção média para o tempo de 1 minuto. O valor de 70% para o agregado miúdo foi determinado mediante a avaliação de traços experimentais de concreto contendo também o agregado graúdo G1 já pré-molhado. Para tal valor de pré-molhagem, as misturas não mostraram problemas quanto à consistência;
- usar um aditivo superplastificante para que a mistura se tornasse plástica e trabalhável de forma a não prejudicar a moldagem dos corpos-de-prova.

O procedimento utilizado para preparação do concreto foi:

- a) Concretos de referência: mistura dos agregados graúdo e miúdo mais um pouco da água do traço, por 4 minutos, em betoneira. Concretos reciclados: mistura do agregado graúdo + água referente à parte de sua absorção, por 1 minuto, seguida da colocação do agregado miúdo + água referente à parte de sua absorção (para os traços com agregado miúdo reciclado) e mistura, então, de todos os agregados por mais 3 minutos;
- b) Colocação do cimento + parte da água do traço e mistura por 2 minutos adicionando o restante da água ao longo desse tempo;
- c) Parada da betoneira e verificação da consistência do concreto visualmente e revolvendo-se a mistura¹⁸. Se o concreto não apresentasse aspecto plástico e trabalhável, adicionava-se um pouco de aditivo e procedia-se à mistura por 1,5 minutos, no mínimo. Este passo foi repetido até que se chegasse a um concreto de aspecto plástico e trabalhável;
- d) Medição da consistência do concreto através do abatimento do tronco de cone;

Após a obtenção do concreto, seguiu-se a moldagem dos corpos-de-prova. Os corpos-de-prova cilíndricos foram moldados em 1 camada, conforme recomendação da NBR 5738 (2003), adensados por meio de um vibrador de imersão. Já os corpos-de-prova prismáticos foram moldados e adensados em 2 camadas, sobre mesa vibratória.

Os corpos-de-prova permaneceram nos moldes durante 24 horas. Ao fim deste período, os mesmos foram desformados e imersos em água onde permaneceram até a data dos ensaios.

5.5 Ensaios realizados nos concretos

5.5.1 Consistência, resistência à compressão e módulo de elasticidade

O único ensaio realizado no estado fresco foi a medição da consistência do concreto através do abatimento do tronco de cone de acordo com a NBR NM 67 (1998).

A resistência à compressão axial foi medida de acordo com a NBR 5739 (1994), aos 28 dias.

¹⁸ Esse procedimento foi usado em razão de não se ter adotado de antemão um valor de consistência a ser alcançado e de já se esperar, com base na literatura, que o ensaio do abatimento do tronco de cone não refletisse adequadamente a consistência do concreto.

O módulo de elasticidade medido foi o tangente inicial (E_{ci}), de acordo com a NBR 8522 (2003), aos 28 dias. A carga de ruptura estimada usada aqui foi a média dos valores das cargas de ruptura obtidas da determinação da resistência à compressão axial.

5.5.2 Absorção de água, índice de vazios e tempo de permeabilidade ao ar

A absorção de água e o índice de vazios foram medidos de acordo com a NBR 9778 (2005). A preparação dos corpos-de-prova teve início aos 28 dias, quando os mesmos foram colocados em estufa. O ensaio teve início aos 31 dias e terminou aos 34 dias de idade.

O tempo de permeabilidade ao ar foi medida aos 28 dias pelo método de Figg. O teste foi criado por Figg (1973) para medir a permeabilidade do concreto ao ar e à água, e fornece 4 dados: o tempo e o coeficiente de permeabilidade ao ar, e o tempo e coeficiente de permeabilidade à água. O método foi aperfeiçoado, mais tarde, por Figg e outros (CATHER et al., 1984).

Pelo fato do método não ser normalizado no Brasil, seguiu-se a norma E 413 (1993) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) de Portugal, com algumas modificações. A norma do LNEC recomenda que sejam feitos 3 furos, no mínimo, no corpo-de-prova. Entretanto, no intuito de se precaver da dispersão dos valores medidos no ensaio, preferiu-se realizar 5 furos. A Figura 5.5 mostra o esquema de execução do ensaio.

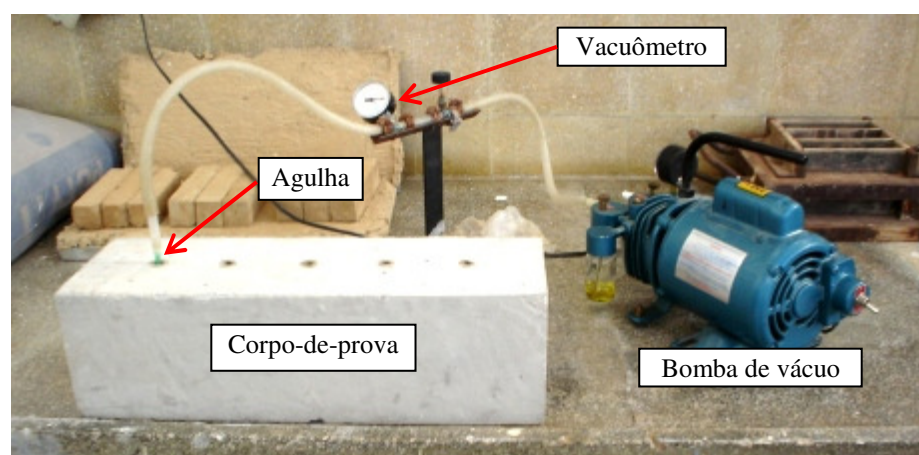


Figura 5.5: Esquema do ensaio de determinação do tempo de permeabilidade ao ar pelo método de Figg.

O teste foi usado aqui para se medir apenas o tempo de permeabilidade ao ar, pois não se dispunha do equipamento próprio para este ensaio. O tempo de

permeabilidade ao ar é tomado como o tempo necessário para que a pressão se eleve de -55 kPa (-412,5 mmHg) a -50 kPa (-375,3 mmHg) dentro de um furo produzido no concreto, no qual é gerado vácuo.

A preparação do corpo-de-prova para o ensaio teve como etapas:

- 1) retirada do corpo-de-prova da cura, aos 26 dias, e colocação na estufa para secagem a 100 °C por um período de 24 horas;
- 2) retirada do corpo-de-prova da estufa no 27º dia para esfriamento ao ar;
- 3) perfuração, aos 28 dias de idade, de 5 furos igualmente espaçados de 8,33 cm, com 6 mm de diâmetro e 4 cm de profundidade, em uma das faces laterais do corpo-de-prova. Os furos eram perpendiculares à face e em nenhum caso se escolheu a face que quando da moldagem do prisma estava voltada para o fundo da forma ou aquela voltada para cima e que foi alisada com a colher de pedreiro;
- 4) remoção do pó de dentro de cada furo soprando-se um jato de ar no mesmo;
- 5) vedação da abertura de cada furo com uma rodela de borracha cortada de um anel de vedação usado em tubos de esgoto. A rodela tinha 3 mm de espessura e, para melhorar sua aderência à parede lateral do furo, aplicou-se silicone em sua superfície lateral;
- 6) colocação de uma camada não muito espessa de silicone sobre a borracha de vedação de cada furo, por uma área de cerca de 2 cm de diâmetro concêntrica ao furo. Aguardou-se um tempo mínimo de cerca de 50 minutos no intuito de garantir uma perfeita secagem do silicone.

Passos seguidos na execução do ensaio em cada um dos furos:

- 1) inseriu-se totalmente o corpo metálico da agulha através da borracha de vedação do furo, de forma cuidadosa, mantendo-a na posição vertical;
- 2) acionou-se a bomba de vácuo (com a válvula do vacuômetro aberta) e aguardou-se que o vacuômetro medisse a menor pressão possível.;
- 3) fechou-se a válvula do vacuômetro e desligou-se a bomba;
- 4) abriu-se um pouco a válvula para que a pressão se elevasse até um valor próximo a -412,5 mmHg. Iniciou-se a cronometragem quando o ponteiro do vacuômetro indicou tal valor;

- 5) encerrou-se a medição (término da cronometragem) quando o vacuômetro indicou a pressão -375 mmHg; então anotou-se o tempo medido;
- 6) repetição dos passos (2) a (5) até que se obtivessem dois tempos de permeabilidade sucessivos cuja diferença entre eles fosse menor ou igual, em módulo, a 2% do primeiro tempo medido;

Capítulo 6

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo, os resultados das propriedades dos agregados reciclados e naturais utilizados são discutidos e comparados entre si. Em seguida, também são apresentados, discutidos e comparados os resultados dos ensaios realizados na determinação das propriedades dos concretos estudados.

6.1 Comparação das propriedades dos agregados

6.1.1 Agregados miúdos

Na Tabela 6.1 são comparadas as principais propriedades da areia e do agregado miúdo.

Tabela 6.1: Principais propriedades dos agregados miúdos.

Propriedade	Areia natural de rio	Agregado miúdo reciclado	Norma
Absorção de água (%)	1,22	9,34	NBR NM 30:2000
Massa específica (kg/dm ³)	2,68	2,50	NBR 9776:1987
Teor de matéria orgânica (ppm)	< 300	< 300	NBR NM 49:2001

A absorção de água do agregado miúdo reciclado (Tabela 6.1) foi 7,66 vezes maior que a do agregado natural, no entanto, valores maiores que esse podem ocorrer¹⁹. Com certeza a composição influenciou essa propriedade, e, apesar dela não ter sido determinada, a observação da coloração do agregado reciclado na Figura 5.3 leva a crer que era grande a presença de cerâmica vermelha no mesmo.

A massa específica do agregado miúdo reciclado apresentou-se menor que a da areia natural, o que, junto com o valor da absorção, confirma a maior porosidade do

¹⁹ Poon e Chan (2006) mediram uma absorção de 30,9% para um agregado miúdo proveniente de alvenaria de tijolos cerâmicos (ver Tabela 3.6).

mesmo. Essa maior porosidade indica uma menor resistência, que pode contribuir para a diminuição das resistências mecânicas dos concretos com ele confeccionados. A maior absorção também indica uma possibilidade do agregado reciclado interferir na consistência dos concretos caso o mesmo não passe por uma pré-molhagem.

Tanto o agregado miúdo natural como o reciclado apresentaram teor de matéria orgânica dentro dos limites normalizados, porém, o reciclado revelou-se um pouco mais limpo. Usando-se um colorímetro (ferramenta prescrita na norma equivalente americana, a ASTM C40), pôde-se estimar um teor de 200 ppm para o agregado natural e um teor entre 100 e 200 ppm para o agregado reciclado, o que, segundo Lima (1999), pode significar uma menor possibilidade deste retardar ou impedir a pega, diminuir a resistência mecânica ou a durabilidade do compósito com ele confeccionado.

Na Figura 6.1 são comparadas as curvas granulométricas do agregado miúdo reciclado e da areia natural, enquanto que a Tabela 6.2 mostra as distribuições granulométricas detalhadas dos mesmos. Observa-se na Figura 6.1 que o agregado reciclado, apesar de apresentar tendência, não se encaixa na zona ótima da NBR 248 (2003), ficando mais próximo da zona utilizável superior; fatos que são demonstrados também pelo seu módulo de finura, 2,78, valor este situado dentro da zona ótima.

A julgar pelo módulo de finura, o agregado miúdo reciclado mostrou-se mais fino que a areia natural, no entanto, a diferença entre os valores é muito pequena para se chegar a uma conclusão firme. O agregado reciclado apresentou uma distribuição regular de massa retida individual em cada uma das peneiras da faixa # 2,36 a 0,15 mm (Tabela 6.2) e demonstrou ser, de fato, mais grosso que a areia, pois seu teor de grãos retidos nas peneiras de maior abertura (# 4,75 a 1,18 mm, por exemplo) foi maior.

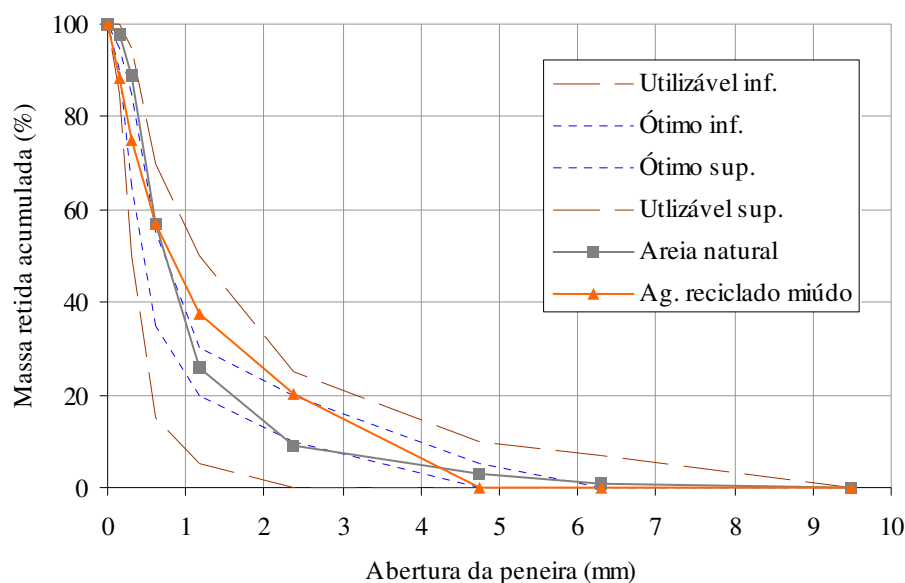


Figura 6.1: Curvas granulométricas dos agregados miúdos e limites (NBR 248:2003).

Tabela 6.2: Propriedades granulométricas dos agregados miúdos (NBR 248:2003).

Abertura da peneira	% da massa (média)					
	Areia natural			Agregado miúdo reciclado		
	retida	acumulada		retida	acumulada	
9,5 mm	0	0	-	0	0	-
6,3 mm	1,0	-	1,0	0	-	0
4,75 mm	2,0	3,0	-	0	0	-
2,36 mm	6,0	9,0	-	20,2	20,2	-
1,18 mm	17,0	26,0	-	17,4	37,6	-
0,6 mm	31,0	57,0	-	19,1	56,7	-
0,3 mm	32,0	89,0	-	18,3	75,0	-
0,15 mm	9,0	98,0	-	13,3	88,3	-
0,075 mm ¹	1,00	-	-	8,61	-	-
fundo	2,0	-	100,0	11,7	-	100,0
total	100,0	282	-	100,0	277,8	-
D _{máx} característica (mm)			Areia natural:	4,75	ag. miúdo recicl.:	4,75
Módulo de finura				2,82		2,78
Zona granulométrica				utilizável		utilizável

Nota: ¹ teor passante e não retido - medido segundo a NBR NM 46:2003.

Um grande teor de materiais finos e pulverulentos foi encontrado no agregado miúdo reciclado (Tabela 6.2), o que pode ser bom para o concreto confeccionado com ele, pois, segundo Neville (1997), uma mistura deve ter certa quantidade de material passante na peneira # 0,3 mm para que seja coesiva e trabalhável. Por outro lado, uma grande quantidade de materiais mais finos implica numa maior área superficial e,

consequentemente, maior necessidade de água para lubrificar a mistura, além de diminuir a durabilidade dos concretos do ponto de vista da resistência ao desgaste por abrasão (NEVILLE, 1997; LEITE, 1999).

6.1.2 Agregados graúdos

A Figura 6.2 compara graficamente as distribuições granulométricas dos agregados G1, G2 e da brita 1, enquanto que as propriedades granulométricas detalhadas desses agregados são comparadas na Tabela 6.3.

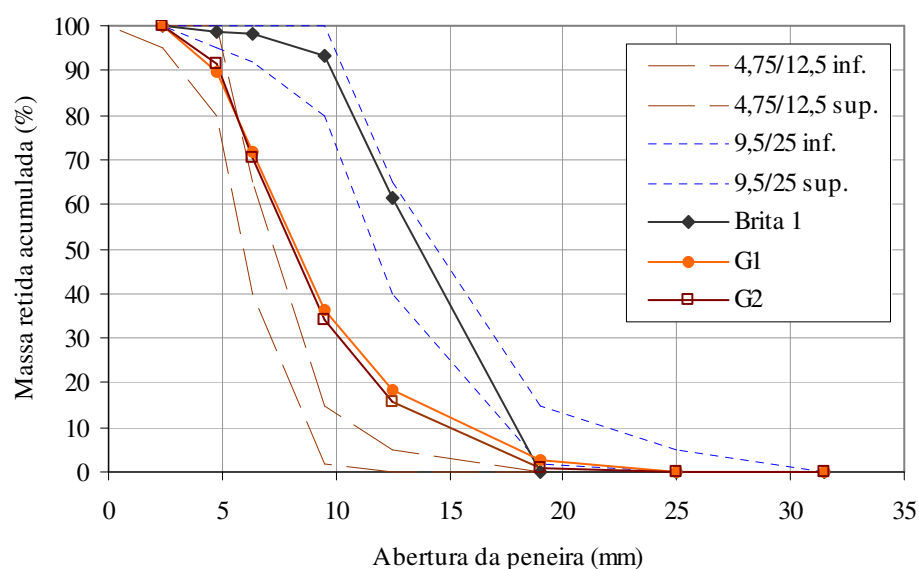


Figura 6.2: Curvas granulométricas dos agregados graúdos e limites da NBR 248 (2003).

Tabela 6.3: Propriedades granulométricas dos agregados graúdos (NBR 248:2003).

Abertura da peneira	Brita 1			Agregado reciclado G1			Agregado reciclado G2		
	% da massa (média)			% da massa (média)			% da massa (média)		
	retida	acumulada		retida	acumulada		retida	acumulada	
25,4 mm	0	-	0	0	-	0	0	-	0
19 mm	0,1	0,1	-	2,5	2,5	-	0,7	0,7	-
12,5 mm	61,4	-	61,5	16,0	-	18,4	14,9	-	15,6
9,5 mm	31,9	93,4	-	17,9	36,4	-	18,6	34,2	-
6,3 mm	4,8	-	98,2	35,2	-	71,6	36,3	-	70,5
4,75 mm	0,5	98,7	-	18,0	89,5	-	21,2	91,7	-
2,36 mm	0	98,7	-	0	89,5	-	0,0	91,7	-
1,18 mm	0	98,7	-	0	89,5	-	0,0	91,7	-
0,6 mm	0	98,7	-	0	89,5	-	0,0	91,7	-
0,3 mm	0	98,7	-	0	89,5	-	0,0	91,7	-
0,15 mm	0	98,7	-	0	89,5	-	0,0	91,7	-
fundo	1,3	-	100,0	10,5	-	100,0	8,4	-	100,0
total	100,0	685,7	--	100,0	576,0	--	100,0	584,9	--
Dimens. máx. característica (mm)				Brita 1:	19	agreg. recic. G1:	19	agreg. recic. G2:	19
Módulo de finura					6,86		5,76		5,85
Zona granulométrica					9,5/25		nenhuma		nenhuma

Observa-se (Figura 6.2 e Tabela 6.3) que os agregados graúdos reciclados têm granulometrias semelhantes e que não se encaixam nas zonas granulométricas especificadas na NBR 7211 (2005), ficando situados entre as zonas 4,75/12,5 e 9,5/25. Já o agregado natural (brita 1) encaixa-se na zona 9,5/25. O módulo de finura e a distribuição granulométrica (Tabela 6.3) mostram que os agregados reciclados são mais finos que a brita 1, contudo, é preciso lembrar que a brita foi produzida industrialmente, tendo sua granulometria sido modificada intencionalmente, para se enquadrar decerto nos limites das normas.

As composições dos agregados G1 e G2 constam da Figura 6.3 e suas demais propriedades constam da Tabela 6.4.

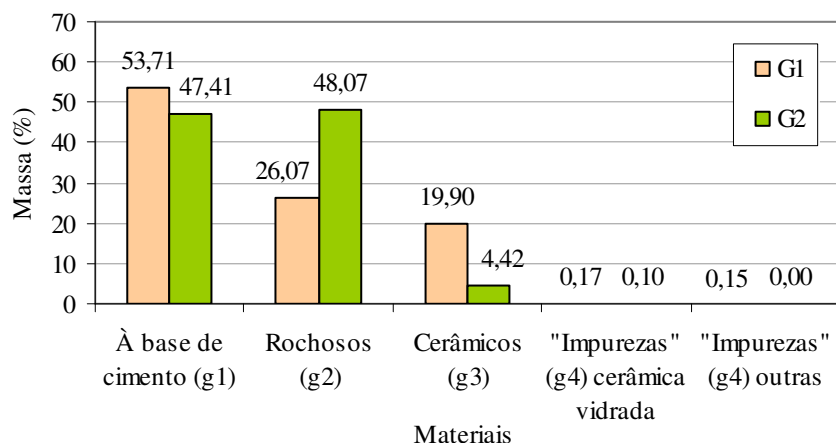


Figura 6.3: Composição dos agregados graúdos reciclados segundo a NBR 15116 (2004).

Tabela 6.4: Outras propriedades dos agregados graúdos.

Propriedade		Brita 1	G1	G2	Norma
Absorção de água (%)		0,49	8,41	5,37	NBR NM 52:2003
Massa específica (kg/dm³)		2,62	2,08	2,27	
Massa unitária no estado solto (kg/dm³)		1,43 (seco ao ar)	1,13 (hum. = 1,15 %)	1,23 (hum. = 1,27 %)	NBR 7251:1982
Índice de forma (por fração granulométrica)	12,5 mm	2,3	2,1	2,1	NBR 7809:1983
	9,5 mm	3,0	2,4	2,0	
	6,3 mm	2,6	2,4	2,2	
	4,75 mm	- ¹	2,4	2,2	
Índice de forma de todo o ag.		2,6	2,3	2,2	
% material com D<0,075 mm		0,33 ²	0,75	0,45	NBR NM 46:2003

Notas: ¹ não havia material retido nesta peneira; ² pela NBR 7219:1987.

Ao observar a Figura 6.2 e a Figura 6.3, vê-se que, apesar do agregado G2 ter maior teor de partículas mais resistentes (rochas), sua granulometria foi bem semelhante à de G1, o que mostra que, no caso do moinho de martelos, isso pode não fazer tanta diferença; possivelmente por causa da influência da grade existente na parte inferior de sua câmara de cominuição, conforme foi abordado em 2.1.4.

Os agregados G1 e G2 se apresentaram menos lamelares que a brita 1 (Tabela 6.4). Isso implica que, em termos de forma dos grãos, os mesmos interferirão menos na consistência do concreto do que o agregado natural. O índice de forma de cada fração de G1 e G2 mostra que as frações mais finas (# 6,3 e 4,75 mm) eram mais lamelares que as

frações mais grossas. A razão para isso pode residir no fato de G1 conter mais cerâmica vermelha²⁰ (Figura 5.4 a e Figura 6.3).

Com relação à absorção de água (Tabela 6.4), verifica-se que os agregados reciclados apresentaram valores bem maiores do que o agregado natural, fato já esperado e discutido na revisão bibliográfica. Já comparando os agregados reciclados entre si, vê-se que G1 apresenta maior absorção do que o G2, caracterizando um material mais poroso e menos denso, fato que se refletiu na massa específica. Estas duas propriedades, por sua vez, refletem as composições dos agregados (Figura 6.3). Nessa figura, observa-se uma menor presença de materiais rochosos e maior presença de materiais mais porosos (cerâmicos e à base de cimento) em G1. É importante lembrar que no grupo de materiais à base de cimento (g1) estavam presentes não só fragmentos de argamassas comuns, as quais são bem porosas, mas também fragmentos da fase argamassa oriunda de concretos, os quais tendem a ser menos porosos e, por conseguinte, mais resistentes.

A Figura 6.4 mostra as curvas de absorção de água dos agregados graúdos G1 e G2 ao longo do tempo. O ensaio foi realizado de acordo com a NBR NM 53 (2003) com a diferença de que em vez de se medir somente a absorção total (24 horas) também foram medidas as massas dos agregados submersos ao longo das primeiras 6 horas de ensaio, conforme sugestão de Leite (2001)²¹.

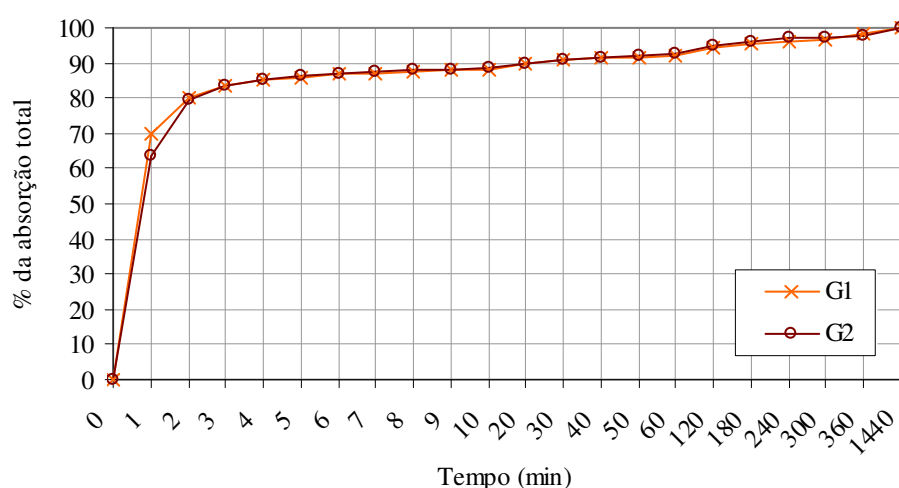


Figura 6.4: Curvas de absorção de água em função do tempo para os agregados graúdos reciclados.

²⁰ Ver seção 3.5.2 (Forma, textura superficial dos grãos e aderência).

²¹ Ver seção 3.2 (Absorção de água).

Vê-se (Figura 6.4) que a forma como a absorção se pronunciou foi praticamente a mesma para ambos os agregados. Note-se que ao tempo de 1 minuto os agregados já tinham alcançado, em média, 65% da absorção total e que aos 10 minutos já tinham chegado à praticamente 90%. Ao tempo de 10 minutos, outros estudos observaram valores diferentes: Leite (2001) mediu um valor de 50% e Carrijo (2005) uma variação entre 70% e 86%; o que leva a crer que essa propriedade tende a ser característica particular de cada agregado reciclado.

6.2 Propriedades dos concretos (1ª Análise)

Nesta 1ª análise, são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios realizados nos concretos sem considerar o experimento fatorial. Apesar disso, os resultados da réplica do experimento fatorial são usados nas discussões feitas a seguir.

6.2.1 Consistência

Conforme o que foi dito em 5.4.2, o aditivo foi adicionado até que os concretos reciclados atingissem uma consistência visualmente plástica, de forma a ter trabalhabilidade adequada e não prejudicar o processo de moldagem dos corpos-de-prova. Não se teve por objetivo estabelecer um valor de abatimento como referência, uma vez que o foco do trabalho foram as propriedades do concreto endurecido. Apesar disso, a seguir, são feitos comentários a respeito dessa propriedade.

A tabela 35 mostra as quantidades de aditivo usadas e os abatimentos de tronco de cone de cada concreto para as duas moldagens. Uma comparação gráfica dos abatimentos é mostrada na Figura 6.5.

Tabela 6.5: Quantidade de aditivo usada em cada concreto e seus respectivos abatimentos.

Concreto	Quantidade de aditivo			Abatimento (mm)	
	% em rel. à massa do cim.	Dose em gramas	Rel. com o traço de ref.	1ª moldagem	Réplica
Ref67	0,50	45,70	-	150	-
67MRG1	0,40	36,56	0,80	45	35
67MRG2	0,44	40,22	0,88	50	105
67MNG1	0,36	32,90	0,72	55	50
67MNG2	0,40	36,56	0,80	185	125
Ref50	0,25	30,32	-	80	-
50MRG1	0,63	76,41	2,52	60	90
50MRG2	0,48	58,21	1,92	125	55
50MNG1	0,48	58,21	1,92	150	80
50MNG2	0,20	24,26	0,80	175	100
Ref40	0,17	25,89	-	50	-
40MRG1	0,44	67,01	2,59	85	60
40MRG2	0,36	54,83	2,12	75	170
40MNG1	0,36	54,83	2,12	105	105
40MNG2	0,14	21,32	0,82	70	100

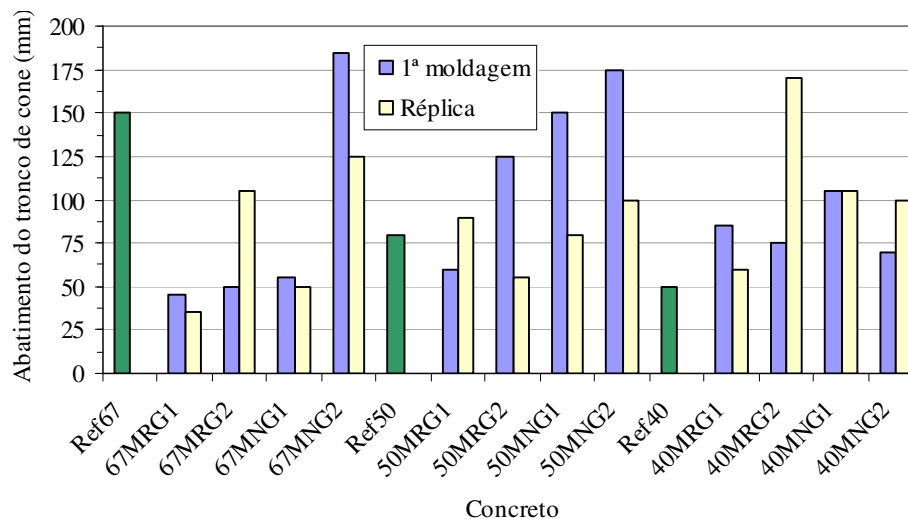


Figura 6.5: Abatimento dos concretos na 1ª moldagem e na réplica do experimento.

A Figura 6.5 mostra que, apesar dos concretos reciclados terem se apresentado trabalháveis e moldáveis, na réplica praticamente não houve tendência dos abatimentos se repetirem ou serem sempre menores ou sempre maiores que na 1ª moldagem. Este comportamento vem corroborar constatações de outros trabalhos, como, por exemplo,

Carrijo (2005) e Leite (2001), ou seja, de que a medição do abatimento do tronco de cone não é um método apropriado para medir a consistência de concretos reciclados.

Observa-se (Figura 6.5), para cada relação a/c e um mesmo agregado miúdo, que em ambas as moldagens houve uma tendência geral de aumento do abatimento ao se diminuir a porosidade do agregado graúdo reciclado, ou seja, ao se mudar do agregado G1 para G2. O fato da consistência ter sido verificada visualmente implica que os concretos, ao atingirem a condição plástica, poderiam estar, na realidade, próximos deste ponto ou pouco acima dele, o que, de certa forma, levou a uma variação nas medidas. Porém, esse comportamento também foi influenciado pelas diferenças entre as características dos dois agregados mostradas na Tabela 6.4, onde se pode ver que:

- a) a absorção de G1 é maior que a de G2;
- b) G2 é menos lamelar que G1;
- c) G1 contém mais material fino ($D < 0,15$ mm) do que G2;
- d) G1 é menos denso que G2. Segundo Carrijo (2005), agregados menos densos, podem não ter uma massa suficientemente grande para vencer a resistência que a pasta fresca exerce nos mesmos.

O agregado miúdo também exerceu influência. Observa-se, para cada relação a/c (Figura 6.5), que a substituição do agregado miúdo reciclado pelo natural contribuiu para um maior abatimento dos concretos confeccionados com este.

Ocorreram perdas de consistência em alguns concretos reciclados. Isto foi percebido através da perda de trabalhabilidade que aconteceu enquanto a massa era manipulada durante a moldagem dos corpos-de-prova. As perdas ocorreram principalmente naqueles concretos que possuíam agregado miúdo reciclado ou agregado miúdo reciclado mais agregado graúdo G1. Nestes últimos, perdas consideráveis chegaram a ocorrer, porém, não ao ponto de prejudicar a moldagem. É provável que os agregados reciclados tenham absorvido parte da água da mistura, o que pode ser um vestígio de que foi insuficiente a pré-molhagem dos mesmos com uma quantidade de água referente a somente 70% de sua absorção de água.

Uma comparação gráfica das dosagens de aditivo é mostrada na Figura 6.6.

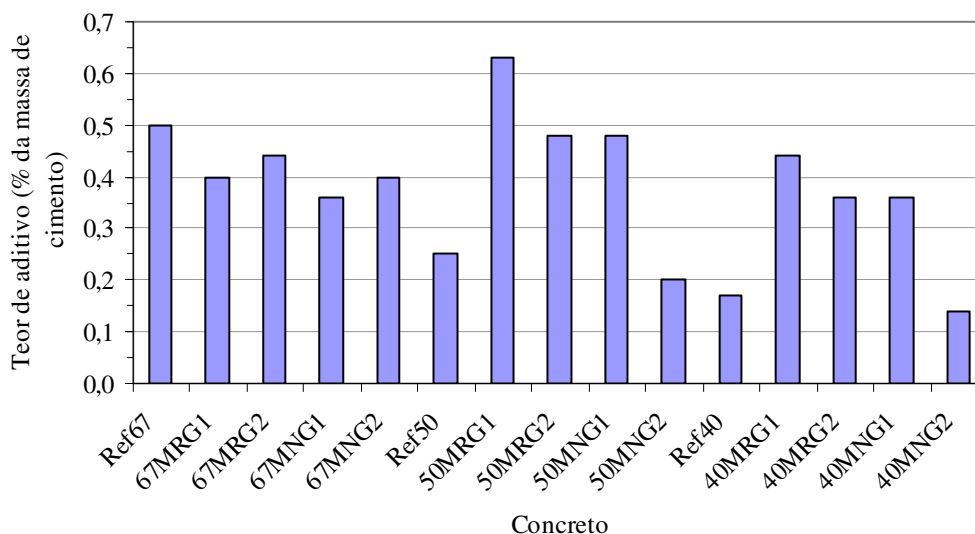


Figura 6.6: Teores de aditivo superplastificante usados nos concretos.

A análise dos teores de aditivo superplastificante usados em cada traço permite uma melhor visualização da influência dos agregados reciclados sobre a consistência dos concretos. Pode-se notar na Figura 6.6 que vários concretos reciclados das relações a/c 0,50 e 0,40 necessitaram de teores de aditivo maiores que os dos respectivos concretos de referência para atingirem uma consistência plástica, demonstrando a influência negativa dos agregados reciclados. Para essas duas relações a/c o uso de agregado G1 incorreu em necessidade do aumento da quantidade de aditivo em relação ao concreto produzido com G2. No caso do agregado miúdo, para todas as relações a/c, a substituição do natural pelo reciclado exigiu aumento da dosagem de aditivo.

6.2.2 Resistência à compressão

A Tabela 6.6 apresenta a resistência à compressão dos concretos medidas nos corpos-de-prova da 1ª moldagem e da réplica, bem como a média das duas moldagens.

Em virtude da réplica atestar a confiabilidade dos dados obtidos na 1ª moldagem, decidiu-se por associar os dois conjuntos de dados calculando a média das duas moldagens. Sendo assim, salvo menção contrária, as discussões a seguir são feitas sobre a resistência média.

A Figura 6.7 mostra uma comparação gráfica dessas resistências médias.

Tabela 6.6: Resistência à compressão dos concretos nas duas moldagens.

Concreto	Resistência à compressão (MPa)		
	1ª moldagem	Réplica	Média
Ref67	20,1	-	20,1
67MRG1	19,5	20,9	20,2
67MRG2	22,5	21,4	22,0
67MNG1	20,7	20,0	20,4
67MNG2	23,4	21,5	22,5
Ref50	32,6	-	32,6
50MRG1	28,3	27,7	28,0
50MRG2	30,8	31,5	31,2
50MNG1	30,3	32,3	31,3
50MNG2	28,5	33,2	30,9
Ref40	40,0	-	40,0
40MRG1	33,6	30,8	32,2
40MRG2	42,5	36,9	39,7
40MNG1	36,0	35,9	36,0
40MNG2	44,6	44,8	44,7

Com base nos resultados das duas moldagens (Tabela 6.6), verifica-se que para os concretos com relação $a/c = 0,67$ a resistência à compressão está em torno de 20 MPa, para $a/c = 0,50$, em torno de 30 MPa, e para $a/c = 0,40$, em torno de 40 MPa. Esse comportamento ocorreu independentemente do tipo de agregado utilizado e, portanto, mostra que todos concretos obedeceram à Lei de Abrams, isto é, à medida que se aumentou a relação a/c , a resistência à compressão diminuiu. Observa-se também que as resistências obtidas estão dentro das resistências consideradas para o concreto armado usado em elementos estruturais segundo a NBR 6118 (2003).

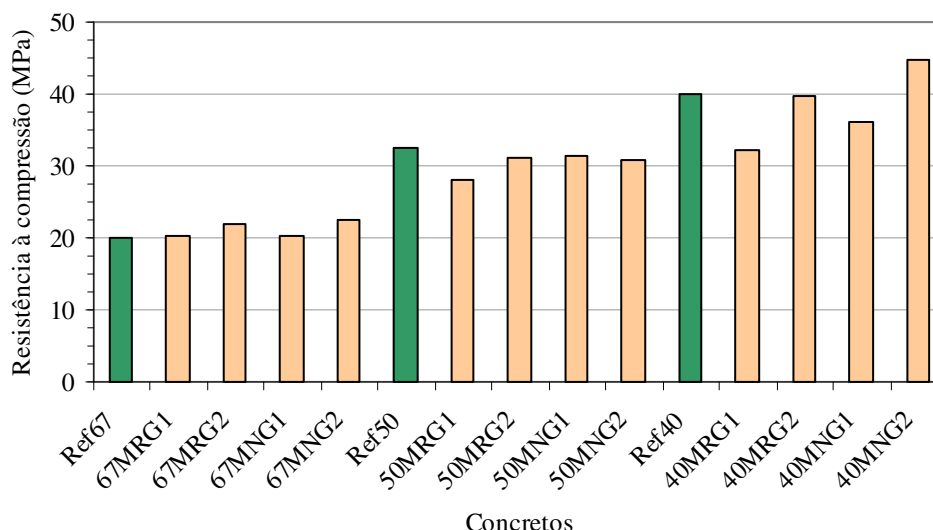


Figura 6.7: Resistência à compressão dos concretos (média das duas moldagens).

Na Tabela 6.6 e na Figura 6.7, nota-se que os concretos reciclados, em geral, apresentaram resistência à compressão próximas das dos seus respectivos concretos de referência. Os casos onde aconteceram reduções acentuadas evidenciam a influência negativa da porosidade dos agregados de RCD graúdos sobre sua própria resistência e sobre a resistência do concreto. O caso onde as resistências praticamente se igualaram ou superaram as do concreto de referência foi o dos concretos reciclados com relação a/c igual a 0,67. Leite (2001) (ver Figura 4.5) e Vieira (2003) também observaram esse comportamento a altas relações a/c enquanto que nenhum dos concretos reciclados estudado por Carrijo (2005) superou as resistências dos concretos de referência. Uma das possíveis causas disso é que os agregados reciclados podem ter absorvido parte da água de mistura, diminuindo a relação a/c efetiva – as perdas de consistência dos concretos reciclados citadas na seção anterior vêm corroborar esta hipótese. Outra possível causa é que, conforme Neville (1997), com o aumento da relação a/c, a pasta torna-se cada vez mais o fator limitante da resistência, fato também constatado por Carrijo (2005)²².

O concreto 40MNG2 revelou-se como o melhor dos concretos reciclados produzidos. Nas duas moldagens, sua resistência à compressão foi 11,8% maior que a do concreto Ref40, e a única diferença entre esses concretos foi o agregado graúdo usado. G2 era mais fino que a brita 1, fato que, por si só, é capaz de proporcionar uma zona de transição mais forte (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Além disso, a maior

²² Ver seção 4.2 (Resistência à compressão).

rugosidade superficial e maior porosidade de G2 em relação à brita certamente permitiram uma maior aderência, engrenamento, seu com a pasta.

É possível notar, já da Figura 6.7, que a resistência à compressão dos concretos reciclados foi maior para aqueles confeccionados com o agregado graúdo reciclado de maior massa específica e, conseqüentemente, menor porosidade e maior resistência (G2), assim como aconteceu em Carrijo (2005). O gráfico da Figura 6.8a, onde os pontos extremos são as resistências médias dentro de cada relação a/c , mostra isso de uma forma mais clara.

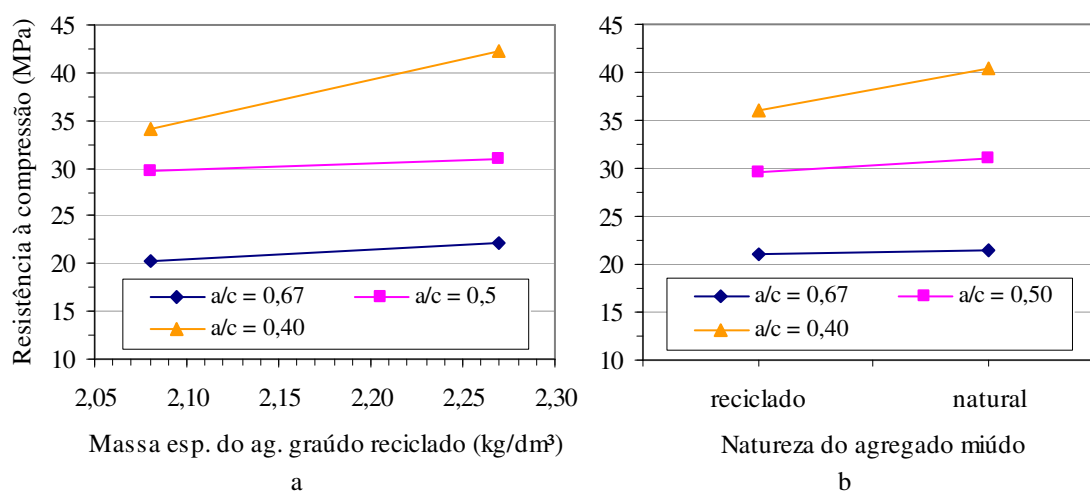


Figura 6.8: Comportamento da resistência à compressão média dos concretos reciclados (a) em função da relação a/c e da massa específica do agregado graúdo (b) em função da relação a/c e do tipo de agregado miúdo.

Na Figura 6.7 e na Figura 6.8b, percebe-se que nos concretos com relação $a/c = 0,4$ a substituição do agregado miúdo reciclado pelo natural proporcionou aumento da resistência (12,2%, em média). No caso da relação $a/c = 0,50$ a substituição aumentou ligeiramente a resistência (5,1%, em média) e no caso da relação $a/c = 0,67$ a natureza do agregado não fez diferença; as resistências foram praticamente as mesmas.

A inclinação dos segmentos de reta da Figura 6.8 mostra que os concretos de menor relação a/c – principalmente aqueles em que a/c era 0,4 – tendem a ser mais sensíveis à alteração da massa específica/porosidade do agregado graúdo reciclado e à mudança de natureza do agregado miúdo, demonstrando que a baixas relações a/c é o agregado que passa a ser a fase limitante da resistência (ver Tabela 6.7).

Consta da Tabela 6.7 o aspecto da ruptura dos agregados reciclados nos corpos-de-prova da réplica ensaiados quanto à resistência à compressão.

Tabela 6.7: Observações quanto à ruptura dos agregados reciclados nos corpos-de-prova do ensaio de resistência à compressão da réplica.

Concreto	Agregados reciclados rompidos nos corpos-de-prova
67MRG1	Não rochosos + descolamento dos rochosos e não rochosos
67MRG2	Não rochosos + descolamento dos rochosos
67MNG1	Não rochosos
67MNG2	Não rochosos e alguns rochosos
50MRG1	Não rochosos
50MRG2	Não rochosos e alguns rochosos
50MNG1	Não rochosos
50MNG2	Rochosos e não rochosos
40MRG1	Rochosos e não rochosos
40MRG2	Rochosos e não rochosos + descolamento de alguns rochosos
40MNG1	Não rochosos + descolamento de alguns rochosos
40MNG2 ¹	Rochosos e não rochosos

Nota: ¹ Observação feita nos corpos-de-prova da 1ª moldagem.

As observações da Tabela 6.7 vêm também confirmar Neville (1997) quanto à relação existente entre a pasta e a resistência do concreto à medida que a relação a/c é alterada. Para a relação a/c 0,67, a ruptura aconteceu predominantemente nos agregados não rochosos (cerâmicas e argamassas) os quais têm resistência baixa e, provavelmente, mais próxima da resistência da pasta (Figura 6.9a). Os agregados rochosos apenas se descolaram, comprovando a fraqueza da zona de transição. Já para a relação a/c 0,4, houve ruptura também dos agregados rochosos (Figura 6.9c), o que mostra que agora a pasta é mais resistente. Os concretos de relação a/c 0,5 apresentaram um comportamento intermediário (Figura 6.9b).

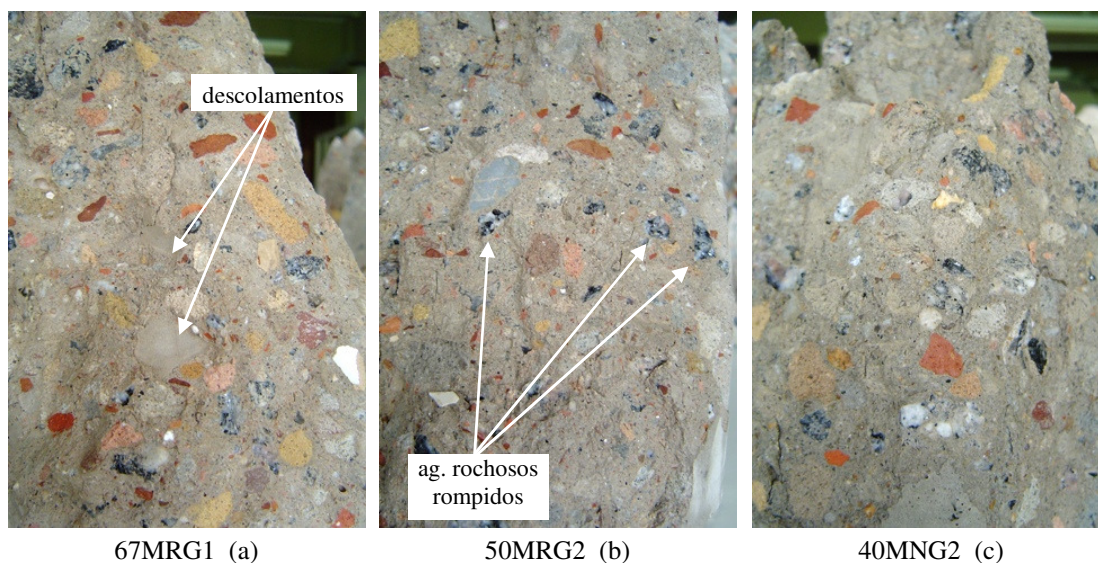


Figura 6.9: Detalhes de alguns corpos-de-prova rompidos no ensaio de resistência à compressão. As faces dos corpos-de-prova foram umedecidas.

6.2.3 Módulo de elasticidade

Na Tabela 6.8 são apresentados o módulo de elasticidade tangente inicial (E_{ci}) dos concretos bem como a resistência à compressão para fins de comparação. Os valores do módulo são comparados graficamente na Figura 6.10.

Tabela 6.8: Módulo de elasticidade tangente inicial (E_{ci}) e resistência à compressão dos concretos.

Concreto	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade - E_{ci} (GPa)
Ref67	20,1	22,5
67MRG1	20,2	20,4
67MRG2	22,0	24,9
67MNG1	20,4	27,2
67MNG2	22,5	27,4
Ref50	32,6	36,0
50MRG1	28,0	24,0
50MRG2	31,2	23,1
50MNG1	31,3	31,8
50MNG2	30,9	30,2
Ref40	40,0	36,3
40MRG1	32,2	21,3
40MRG2	39,7	30,3
40MNG1	36,0	26,9
40MNG2	44,7	32,5

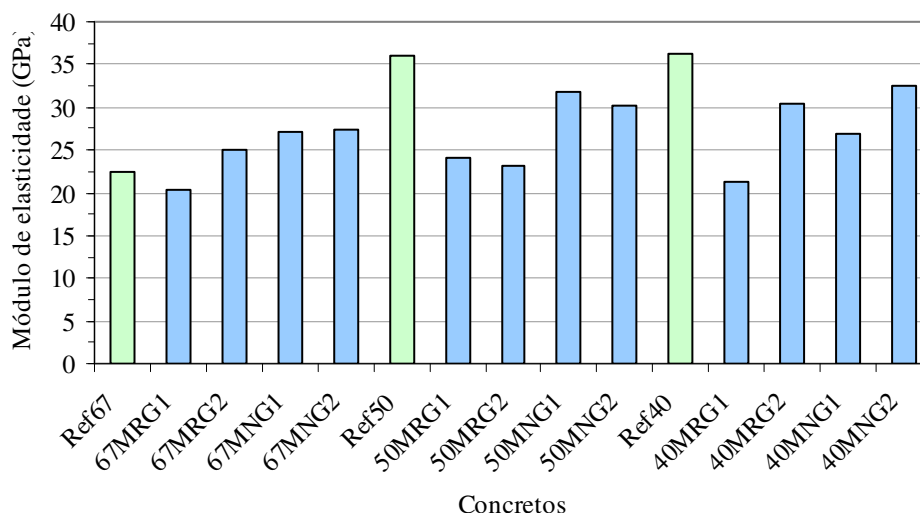


Figura 6.10: Módulo de elasticidade tangente inicial (E_{ci}) dos concretos.

Assim como aconteceu com a resistência à compressão, para as relações a/c 0,5 e 0,4, os agregados reciclados não tiveram efeito benéfico sobre os módulos de elasticidade dos concretos reciclados (Figura 6.10), pois os módulos foram menores que os dos respectivos concretos de referência, confirmando que os agregados reciclados afetam também essa propriedade do concreto. Menores módulos implicam que os concretos reciclados são mais deformáveis que o concreto convencional.

Já para a relação a/c 0,67, da mesma forma que para a resistência à compressão, os agregados reciclados tiveram, em geral, efeito benéfico sobre o módulo de elasticidade, pois, à exceção do concreto 67MRG1, os demais apresentaram módulos maiores que o concreto de referência Ref67. Este comportamento do módulo é coerente com o apresentado pelas resistências à compressão dos concretos reciclados dessa mesma relação a/c visto que as mesmas excederam a do concreto de referência, sem falar que é sabido existir uma relação entre essas duas propriedades mecânicas em virtude de ambas manterem relação com a porosidade das fases do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Nos gráficos da Figura 6.11 são mostrados os comportamentos médios do módulo de elasticidade dos concretos reciclados para cada relação a/c em função da massa específica do agregado graúdo reciclado e do tipo de agregado miúdo.

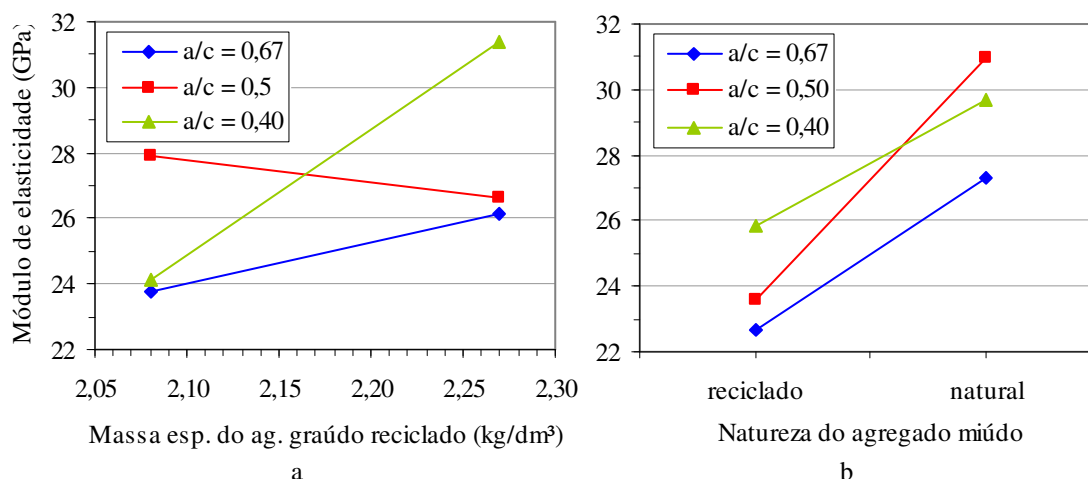


Figura 6.11: Comportamento médio do módulo de elasticidade dos concretos reciclados (a) em função da relação a/c e da massa específica do agregado graúdo (b) em função da relação a/c e do tipo de agregado miúdo.

O efeito benéfico da massa específica crescente do agregado graúdo reciclado pode ser percebido na Figura 6.10 e na Figura 6.11a para as relações a/c 0,67 e 0,40, isto é, o módulo de elasticidade foi maior para os concretos confeccionados com o agregado de maior massa específica/menor porosidade (G2). No entanto, a partir das mesmas figuras, nota-se que para a relação a/c 0,5 o módulo praticamente não se alterou.

Para o agregado miúdo não houve praticamente mudança de comportamento em relação ao que ocorreu na resistência à compressão. Os concretos produzidos com areia apresentaram módulos de elasticidade maiores que aqueles produzidos com agregado miúdo reciclado (Figura 6.10 e Figura 6.11b). Várias foram as diferenças entre os dois agregados, porém, a menor resistência do agregado reciclado ao certo foi o principal influenciador desse resultado.

A inclinação dos segmentos de reta da Figura 6.11a mostra que a baixas relações a/c o módulo de elasticidade, assim como a resistência à compressão, tendeu a ser mais sensível à alteração da massa específica/porosidade do agregado graúdo reciclado. O concreto com a relação a/c 0,5 foi um caso à parte. No caso do agregado miúdo (Figura 6.11b), pelo mesmo raciocínio, nota-se que a relação a/c 0,5 é que foi mais sensível à mudança da natureza do agregado miúdo. Dessa forma, percebe-se que, apesar de estar relacionado com a resistência à compressão, o módulo de elasticidade não seguiu a mesma tendência daquela propriedade. Essa não é uma constatação surpreendente, pois Mehta e Monteiro (1994) afirmam que ambas as propriedades não são influenciadas pela porosidade das fases constituintes do concreto no mesmo grau.

A Tabela 6.9 compara os valores dos módulos medidos experimentalmente com os valores previstos pela fórmula da NBR 6118 (2003), e a Figura 6.12 compara graficamente esses valores.

Tabela 6.9: Valores dos módulos de elasticidade tangentes iniciais (E_{ci}) medidos experimentalmente e previstos por fórmula.

Concreto	E_{ci} medido (GPa)	E_{ci} previsto NBR 6118:2003 ¹ (GPa)	$E_{ci,previsto}/E_{ci,medido}$
Ref67	22,5	25,1	1,1146
67MRG1	20,4	25,2	1,2347
67MRG2	24,9	26,3	1,0537
67MNG1	27,2	25,3	0,9308
67MNG2	27,4	26,6	0,9701
Ref50	36,0	32,0	0,8889
50MRG1	24,0	29,6	1,2345
50MRG2	23,1	31,3	1,3532
50MNG1	31,8	31,3	0,9860
50MNG2	30,2	31,1	1,0313
Ref40	36,3	35,4	0,9750
40MRG1	21,3	31,8	1,4899
40MRG2	30,3	35,3	1,1642
40MNG1	26,9	33,6	1,2485
40MNG2	32,5	37,4	1,1521

Nota: ¹ $E_{ci} = 5,6\sqrt{f_{ck}}$ com f_{ck} em MPa.

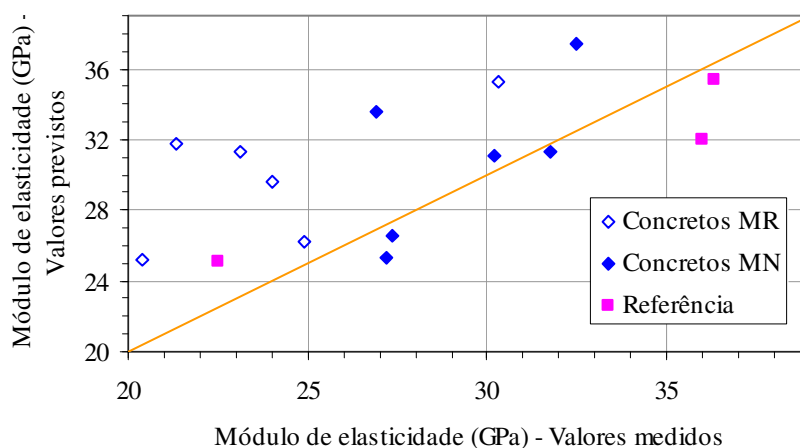


Figura 6.12: Módulo de elasticidade tangente inicial - valores medidos em função dos valores previstos.

Pode-se ver na Tabela 6.9 que para a maioria dos concretos os valores previstos pela fórmula da NBR 6118 (2003) superam o valor medido experimentalmente. Os módulos superestimados pela fórmula foram, em média, 20,8% maiores que os módulos

experimentais. Na Figura 6.12 vê-se mais claramente que quase todos os valores previstos excederam os valores medidos. Também é bem perceptível na Tabela 6.9 que a fórmula da norma parece ter servido melhor aos concretos cujo agregado miúdo era areia (alguns concretos MN e um dos concretos de referência). É possível que para uso com concretos reciclados a fórmula necessite de adaptações que levem em conta as particularidades dos agregados, a exemplo do que faz a fórmula do CEB/FIP de 1990 (NEVILLE, 1997).

6.2.4 Absorção de água, índice de vazios e tempo de permeabilidade ao ar

Constam da Tabela 6.10 os valores de absorção de água e do índice de vazios medidos na 1ª moldagem e na réplica, bem como as médias das duas moldagens. Assim como foi feito na resistência à compressão, a análise dessas duas propriedades será sobre essa média. Ainda na mesma tabela encontram-se os tempos de permeabilidade ao ar medidos pelo método de Figg. Comparações gráficas dessas propriedades são mostradas na Figura 6.13 (absorção de água e índice de vazios) e na Figura 6.14 (tempo de permeabilidade ao ar).

Tabela 6.10: Absorção de água, índice de vazios e tempo de permeabilidade ao ar (Figg) dos concretos.

Concreto	Absorção de água (%)			Índice de vazios (%)			Tempo de permeab. ao ar - Figg (seg)
	1ª moldagem	Réplica	Média	1ª moldagem	Réplica	Média	
Ref67	5,85	-	5,85	13,15	-	13,15	13,1
67MRG1	15,60	15,94	15,77	28,40	20,20	24,30	3,8
67MRG2	13,39	13,84	13,62	25,69	26,40	26,05	5,8
67MNG1	10,63	11,23	10,93	21,13	22,27	21,70	7,3
67MNG2	9,48	9,20	9,34	19,59	19,10	19,35	8,4
Ref50	6,47	-	6,47	14,49	-	14,49	15,1
50MRG1	14,52	14,76	14,64	27,08	27,48	27,28	8,4
50MRG2	12,44	13,62	13,03	24,23	26,13	25,18	11,8
50MNG1	10,39	10,8	10,60	20,92	21,64	21,28	11,2
50MNG2	9,17	9,80	9,49	18,87	20,30	19,59	7,2
Ref40	5,82	-	5,82	13,26	-	13,26	18,5
40MRG1	13,92	13,3	13,61	26,32	25,85	26,09	13,2
40MRG2	12,44	14,89	13,67	24,42	27,75	26,09	15,2
40MNG1	9,93	11,09	10,51	20,15	22,19	21,17	14,3
40MNG2	9,80	9,90	9,85	20,27	20,52	20,40	20,9

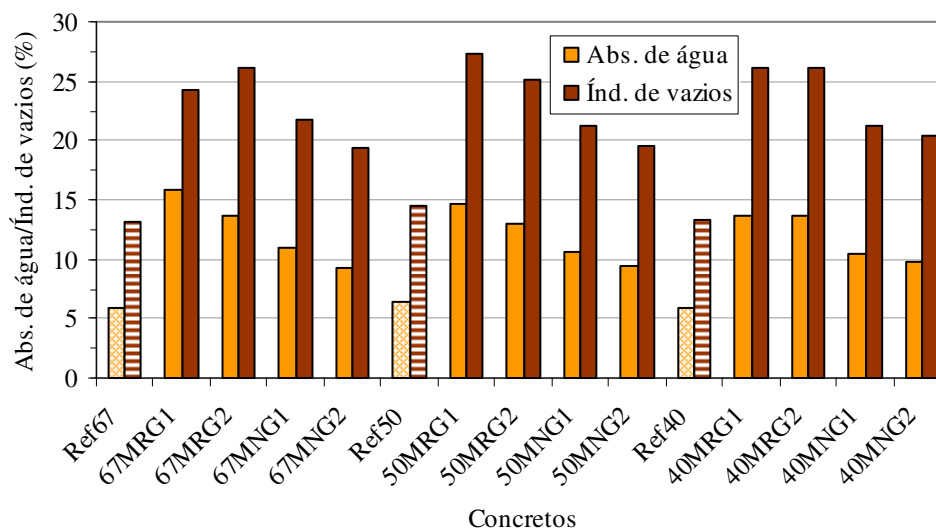


Figura 6.13: Absorção de água e Índice de vazios dos concretos.

Pode-se notar na Tabela 6.10 e na Figura 6.13 que os concretos reciclados apresentaram, em geral, maior absorção e maior índice de vazios que os concretos de referência, demonstrando que os agregados reciclados influíram negativamente na porosidade do compósito. Também é perceptível uma tendência geral de diminuição da absorção de água e do índice de vazios ao se mudar do agregado miúdo reciclado para a areia e do agregado graúdo G1 para o G2, isto é, ao se usar agregados menos porosos no concreto. Por outro lado, tanto para os concretos reciclados como para os de referência, as duas propriedades pareceram não ser sensíveis à alteração da relação a/c. Note-se que qualquer concreto de composição semelhante (xxMNG1, por exemplo) teve valor de absorção ou de índice de vazios bem semelhantes nas três relações a/c estudadas.

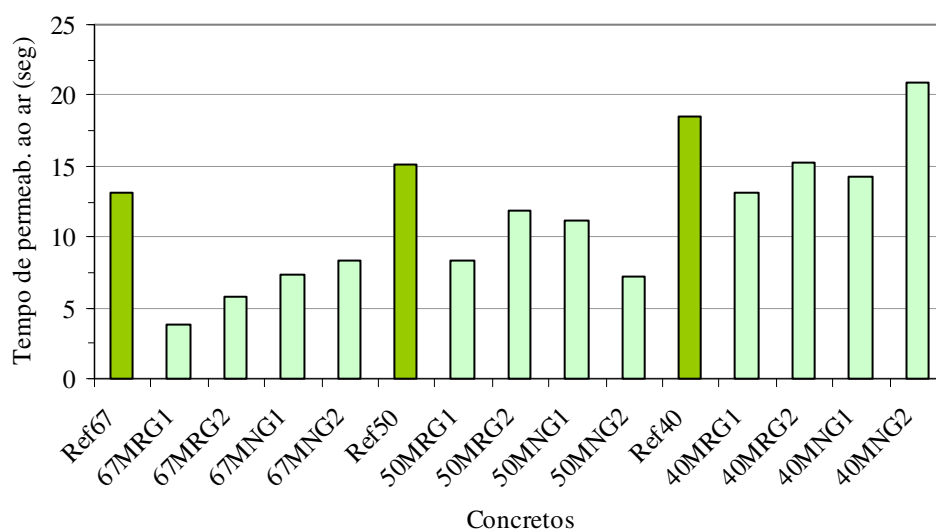


Figura 6.14: Tempo de permeabilidade ao ar (Figg) dos concretos.

A propriedade tempo de permeabilidade ao ar dos concretos reciclados (Figura 6.14) foi sensível à diminuição da porosidade do agregado miúdo e do agregado graúdo assim como ocorreu com a absorção de água e com o índice de vazios. Entretanto, sua tendência foi de crescimento já que o normal é que quanto menos permeável/penetrável for um concreto maior será o tempo necessário para o ar percorrer sua estrutura e voltar a preencher a cavidade onde foi gerado o vácuo²³. Ainda na mesma figura nota-se que, ao contrário da absorção e do índice de vazios, o tempo de permeabilidade ao ar foi sensível à alteração da relação a/c, diminuindo à medida que esta aumentou.

A seguir, pode-se visualizar graficamente (Figura 6.15, Figura 6.16, e Figura 6.21) a relação entre a porosidade dos concretos e a relação a/c para as três propriedades analisadas nesta seção.

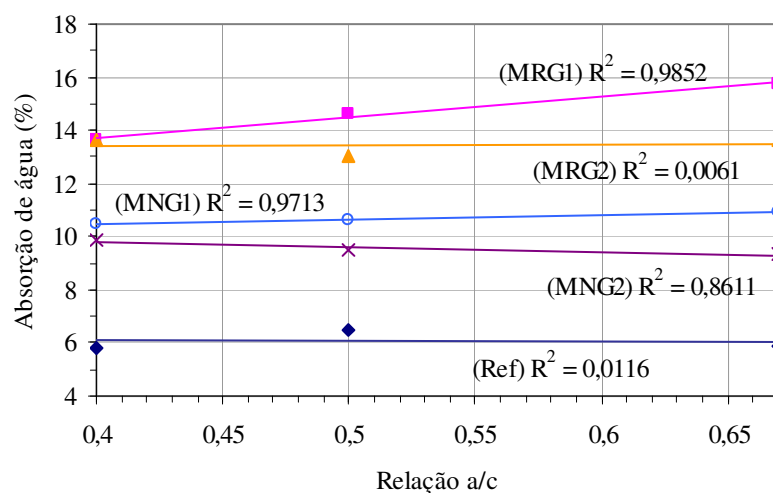


Figura 6.15: Absorção de água em função da relação a/c para cada tipo de concreto.

²³ Ver descrição do ensaio em 5.5.2.

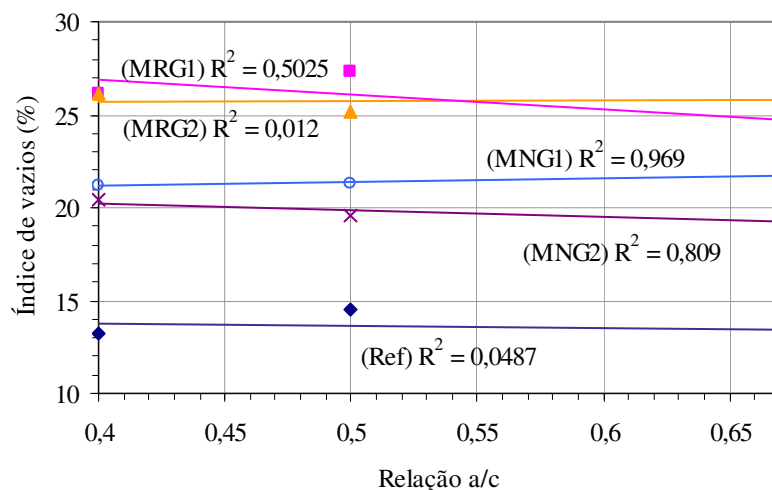


Figura 6.16: Índice de vazios em função da relação a/c para cada tipo de concreto.

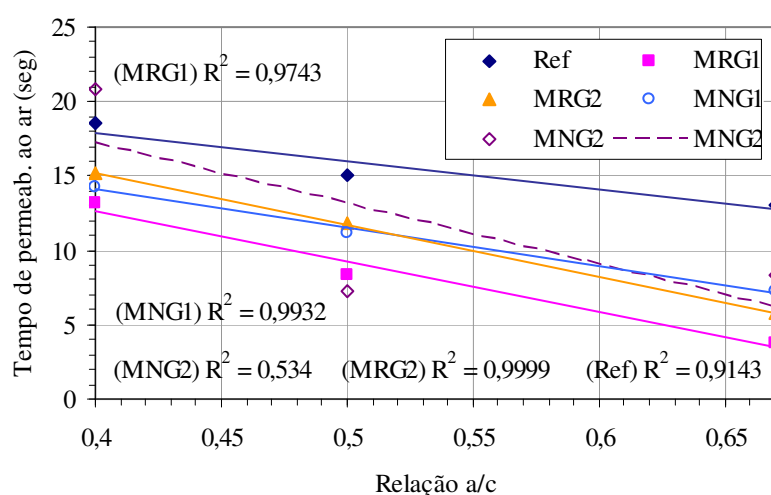


Figura 6.17: Tempo de permeabilidade ao ar (Figg) em função da relação a/c para cada tipo de concreto.

Retas ajustadas à absorção de água e ao índice de vazios em função da relação a/c (Figura 6.15 e Figura 6.16) mostram que nem sempre essas propriedades demonstraram aumentar à medida que se aumentou a relação a/c. Os coeficientes de determinação (R^2) de várias retas expõem a dificuldade que foi explicar o comportamento dos concretos através de um modelo, mas esse não foi o caso do tempo de permeabilidade ao ar (Figura 6.17), pois a maioria dos concretos foram bem ajustados por retas, demonstrando haver uma relação de dependência entre a permeabilidade da pasta e a relação a/c. Apesar dessa adequabilidade e capacidade ou não do modelo conseguir explicar o fenômeno, é possível notar, observando a posição das retas nas três figuras, que os concretos foram tanto mais porosos quanto

maior foi a porosidade do agregado total, ou seja, do conjunto agregado miúdo mais agregado graúdo.

A inclinação das retas na Figura 6.17 mostra ainda que os concretos reciclados foram mais sensíveis à alteração da relação a/c .

Nos gráficos da Figura 6.18 são mostrados os comportamentos médios da absorção de água, do índice de vazios e do tempo de permeabilidade ao ar dos concretos reciclados para cada relação a/c em função da massa específica do agregado graúdo reciclado e do tipo de agregado miúdo.

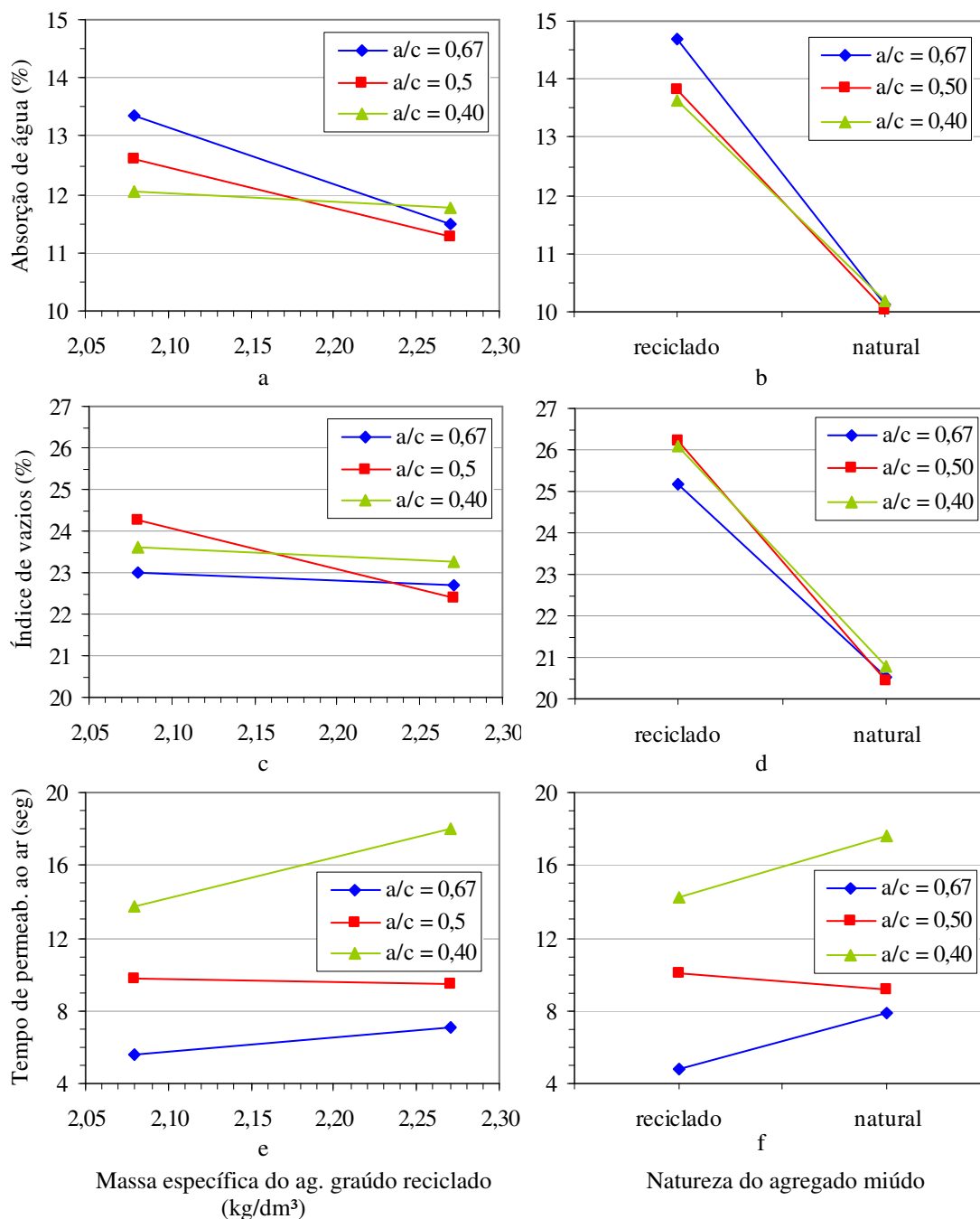


Figura 6.18: Comportamento da absorção de água média, do índice de vazios médio e do tempo de permeabilidade médio dos concretos reciclados (a), (c) e (e) em função da relação a/c e da massa específica do agregado gráúdo (b), (d) e (f) em função da relação a/c e do tipo de agregado miúdo.

Os gráficos da Figura 6.18 confirmam a tendência de diminuição da porosidade dos concretos reciclados ao se diminuir a porosidade tanto do agregado gráúdo (Figura 6.18a, c e e) quanto do miúdo (Figura 6.18b, d e f). Comportamento diferente foi observado no caso do tempo de permeabilidade ao ar para a relação a/c 0,5 (Figura 6.18e e f) em virtude do resultado anômalo do concreto 50MNG2. Ainda na Figura

6.18, para a absorção e o índice de vazios, pode-se notar, pela inclinação dos segmentos de reta, que parecem ser as relações a/c mais altas mais sensíveis à diminuição da porosidade do agregado graúdo reciclado. Já no caso do agregado miúdo, as três relações parecem ser influenciadas do mesmo modo ao se diminuir a porosidade deste agregado. Em relação ao tempo de permeabilidade ao ar, a menor relação a/c (0,4) foi a mais sensível à diminuição da porosidade do agregado graúdo. Para a diminuição da porosidade do agregado miúdo, o tempo de permeabilidade parece não ter se alterado de forma diferenciada ao se alterar da relação a/c ²⁴.

A seguir, pode-se visualizar graficamente (Figura 6.19, Figura 6.20, e Figura 6.21) a relação entre a porosidade dos concretos (porosidade da pasta) e sua resistência à compressão para as três propriedades analisadas nesta seção.

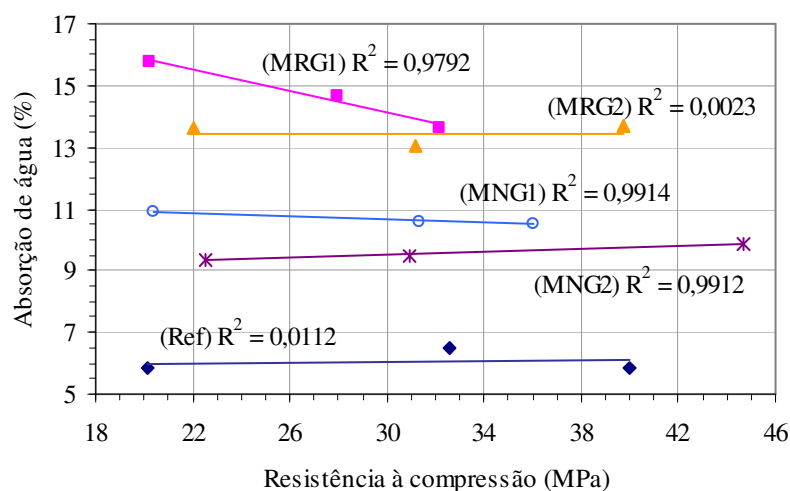


Figura 6.19: Absorção de água em função da resistência à compressão para cada tipo de concreto. Cada ponto corresponde a uma relação a/c . A relação a/c diminui da esquerda para a direita.

²⁴ O comportamento do tempo de permeabilidade ao ar dos concretos reciclados da relação a/c 0,5 é melhor visualizado na Figura 6.14. Por serem feitos a partir de médias, os gráficos da Figura 6.18e e f ficaram prejudicados pelo comportamento anômalo do concreto 50MNG2.

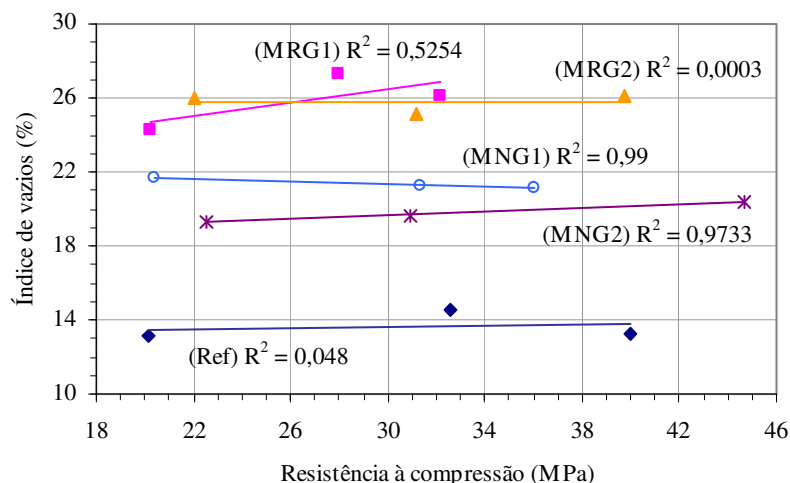


Figura 6.20: Índice de vazios em função da resistência à compressão para cada tipo de concreto. Cada ponto corresponde a uma relação a/c. A relação a/c diminui da esquerda para a direita.

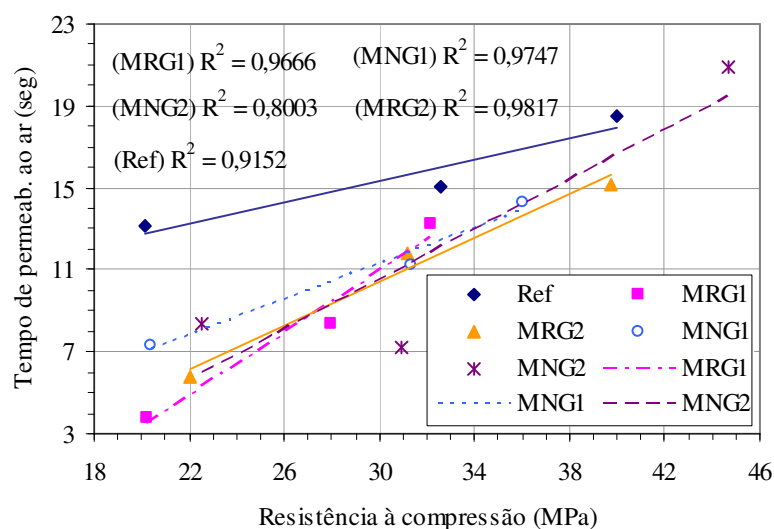


Figura 6.21: Tempo de permeabilidade ao ar (Figg) em função da resistência à compressão para cada tipo de concreto. Cada ponto corresponde a uma relação a/c. A relação a/c diminui da esquerda para a direita.

Na Figura 6.19 e na Figura 6.20 nota-se, através dos coeficientes de determinação (R^2), que as retas ajustadas aos valores de absorção de água e do índice de vazios não demonstram haver, para todos os concretos, uma clara relação inversamente proporcional entre a porosidade da pasta e a resistência à compressão. Porém, deve-se atentar para o fato de que a absorção e o índice de vazios já deram indício (Figura 6.13) de que não são sensíveis, ou são pouco sensíveis, às alterações da relação a/c. Com o tempo de permeabilidade (Figura 6.21) a situação foi diferente, pois os ajustes do mesmo à resistência à compressão foram satisfatórios para todos os concretos. Esta propriedade demonstrou que os concretos tenderam a ser tanto mais resistentes quanto menor foi a permeabilidade da pasta. Como a permeabilidade está ligada não só à

finura, conectividade e tortuosidade dos poros mas também ao volume total dos mesmos, o tempo de permeabilidade mostra que para o concreto, quer contenha agregados naturais ou reciclados, é válida a relação entre porosidade e resistência apontada pela Ciência dos Materiais.

6.3 Propriedades dos concretos (2ª Análise)

Nesta 2ª análise, são apresentados e discutidos os resultados de resistência à compressão, absorção de água e índice de vazios dos concretos segundo o experimento fatorial.

Nos itens que se seguem, os fatores são representados por C_c = consumo de cimento, γ_{ag} = massa específica do agregado graúdo reciclado e T_{am} = tipo de agregado miúdo; nas equações das superfícies de resposta os níveis dos fatores encontram-se codificados conforme a Tabela 5.2.

6.3.1 Resistência à compressão

A Tabela 6.11 mostra os valores de resistência à compressão da 1ª moldagem e da única réplica realizada no experimento com os concretos reciclados.

Tabela 6.11: Resistência à compressão dos concretos reciclados (1ª moldagem e réplica)

Concreto	Resistência à compressão (MPa)		
	1ª moldagem	Réplica	Média
67MRG1	19,5	20,9	20,2
67MRG2	22,5	21,4	22,0
67MNG1	20,7	20,0	20,4
67MNG2	23,4	21,5	22,5
50MRG1	28,3	27,7	28,0
50MRG2	30,8	31,5	31,2
50MNG1	30,3	32,3	31,3
50MNG2	28,5	33,2	30,9
40MRG1	33,6	30,8	32,2
40MRG2	42,5	36,9	39,7
40MNG1	36,0	35,9	36,0
40MNG2	44,6	44,8	44,7

A seguir é apresentada a superfície de resposta (modelo) ajustada aos resultados de resistência à compressão (Equação 3).

$$f_{ck} = 30,3 + 8,5 \cdot C_c + 1,9 \cdot \gamma_{ag} + T_{am} - 0,6 \cdot C_c^2 + 1,6 \cdot C_c \cdot \gamma_{ag} + C_c \cdot T_{am} - 0,2 \cdot T_{am} \cdot \gamma_{ag} \quad (3)$$

$$(R^2 = 0,9546)$$

Os fatores e interações que apresentaram efeitos significativos sobre a resistência à compressão, determinados através da análise da variância do modelo, são aqueles que aparecem em **negrito** na Equação 3. Assim, além da média (primeiro termo da equação), foram identificados como significativos, em ordem de importância: o consumo de cimento, a massa específica do agregado graúdo reciclado, a interação entre o consumo de cimento e a massa específica do agregado graúdo reciclado e ainda o tipo de agregado miúdo.

A superfície de resposta da resistência à compressão encontra-se em R4 e, portanto, não pode ser traçada. Mas, mantendo-se um dos fatores em um nível fixo (o tipo do agregado miúdo - T_{am}) foi possível traçá-la em R3, em função dos outros dois fatores (Figura 6.22 e Figura 6.23).

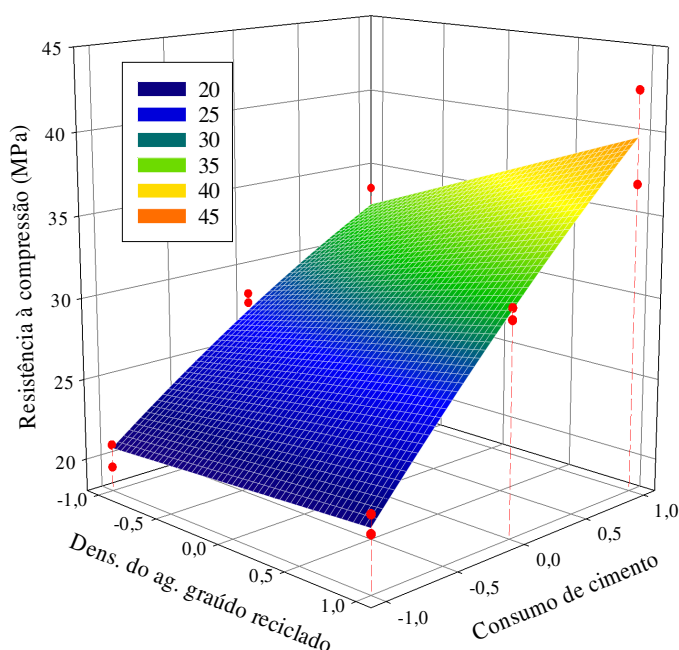


Figura 6.22: Superfície de resposta da resistência à compressão em função da massa específica do agregado graúdo e do consumo de cimento ($T_{am} = -1$).

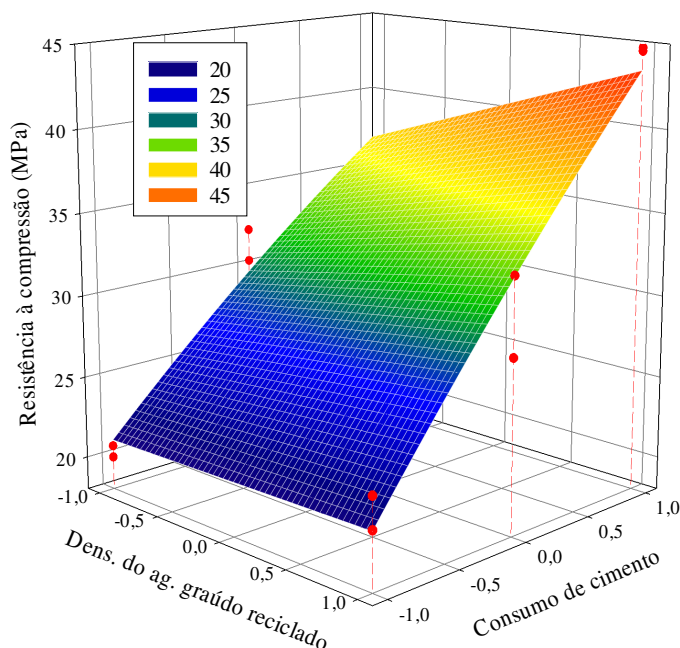


Figura 6.23: Superfície de resposta da resistência à compressão em função da massa específica do agregado graúdo e do consumo de cimento.

Nota-se na Figura 6.22 que a resistência à compressão foi tanto maior quanto maior foi o consumo de cimento e a massa específica do agregado graúdo reciclado, para ambos os níveis do fator tipo de agregado miúdo, sendo as maiores resistências alcançadas com a areia (Figura 6.23). A maior inclinação da superfície de resposta na Figura 6.23 mostra que os concretos contendo areia foram mais sensíveis à mudança do consumo de cimento – e também da relação a/c já que neste trabalho cada consumo de cimento corresponde a uma relação a/c distinta.

Na Figura 6.24 são mostrados os valores de resistência à compressão previstos (modelo) em função dos valores observados (medidos experimentalmente). Os resíduos²⁵ deixados pelo modelo são mostrados na Figura 6.25.

²⁵ Resíduo = valor medido experimentalmente – valor previsto pelo modelo.

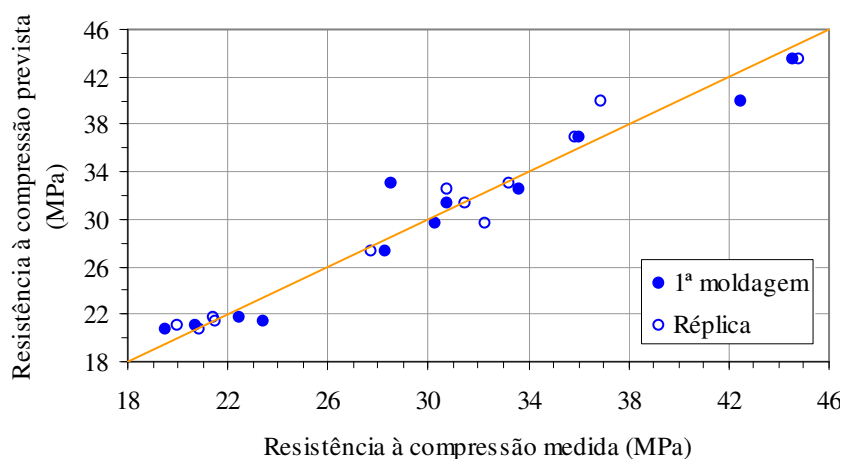


Figura 6.24: Resistência à compressão prevista em função da resistência à compressão medida.

O gráfico da Figura 6.24 confirma o que já se podia perceber a partir do valor do coeficiente de determinação do modelo (R^2), isto é, que o modelo se ajustou muito bem aos valores de resistência medidos, explicando a maior parte do comportamento da resistência à compressão dos concretos reciclados (95,46% de acordo com R^2).

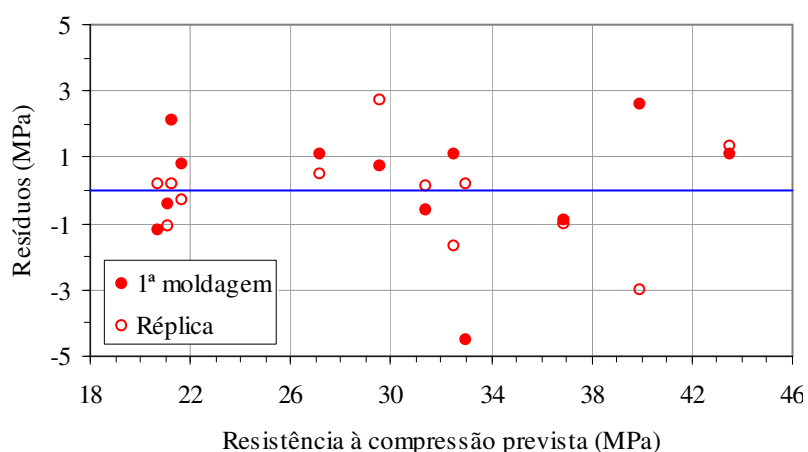


Figura 6.25: Resíduos deixados pelo modelo para a resistência à compressão.

A Figura 6.25 mostra que os resíduos deixados pelo modelo distribuem-se de forma aleatória, o que, em conjunto com R^2 , a Figura 6.22 e a Figura 6.23, confirma a adequação do modelo aos dados experimentais.

6.3.1.1 Análise do efeito isolado do consumo de cimento sobre a resistência à compressão

A Figura 6.26 mostra o gráfico de tendência da resistência à compressão dos concretos reciclados em função dos níveis do fator consumo de cimento (C_c) mantendo-

se os outros dois fatores em seus níveis médios ($T_{am} = 0$ e $\gamma_{ag} = 0^{26}$). Os valores de C_c foram tomados de 0,2 em 0,2 (níveis codificados), o que corresponde a variações reais de 20 kg/m³.

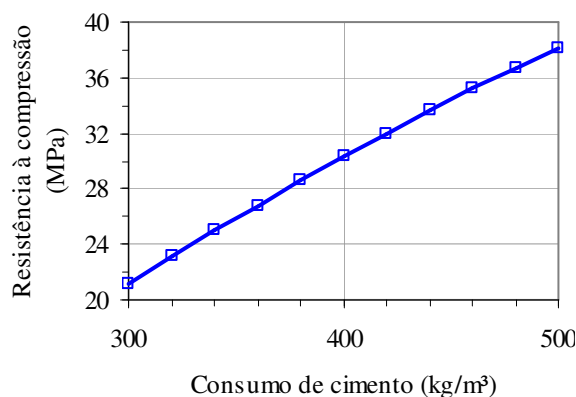


Figura 6.26: Efeito isolado do consumo de cimento sobre a resistência à compressão.

Os resultados da primeira análise (5.2) foram confirmados no experimento fatorial, ou seja, em geral, a resistência à compressão dos concretos reciclados aumentou conforme se aumentou o consumo de cimento (Figura 6.26). Como cada nível do consumo de cimento está associado a uma relação a/c , fica claro, a partir do gráfico, que para os concretos reciclados a resistência à compressão é inversamente proporcional à relação a/c (Lei de Abrams) assim como acontece com os concretos convencionais. Dessa forma, a introdução dos agregados reciclados no concreto não alterou a dependência que sua resistência tem com a porosidade do material.

Também é possível notar no gráfico da Figura 6.26 que incrementos no consumo de cimento – ou decrementos na porosidade do material, ao lembrar que C_c e a relação a/c estão inter-relacionadas aqui – levaram a incrementos na resistência à compressão do concreto. Mais adiante, no item 6.3.1.4, o efeito do fator C_c é ainda discutido.

6.3.1.2 Análise do efeito isolado do tipo do agregado miúdo sobre a resistência à compressão

Na Figura 6.27 encontra-se o gráfico de tendência da resistência à compressão dos concretos reciclados em função dos níveis do fator tipo de agregado miúdo (T_{am}) mantendo-se os outros dois fatores em seus níveis médios ($C_c = 0$ e $\gamma_{ag} = 0$).

²⁶ Notar que, dessa forma, tomar um dos demais fatores em seu ponto médio é, na verdade, anular todos os termos que o contêm na equação da superfície de resposta, simplificando-a.

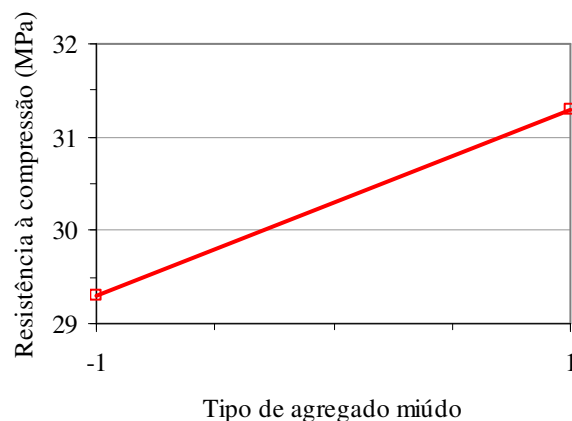


Figura 6.27: Efeito isolado do tipo de agregado miúdo sobre a resistência à compressão (-1 = reciclado e +1 = areia).

Vê-se na Figura 6.27 que, em geral, a resistência à compressão tendeu a crescer ao se substituir o agregado miúdo do reciclado pelo natural (areia).

O experimento fatorial corrobora a primeira análise dos resultados feita em 5.2 mostrando que a maior porosidade, granulometria mais grossa e outras características do agregado miúdo reciclado contribuíram para uma menor resistência à compressão dos concretos reciclados.

6.3.1.3 Análise do efeito isolado da massa específica do agregado graúdo sobre a resistência à compressão

Na Figura 6.28 é mostrado o gráfico de tendência da resistência à compressão dos concretos reciclados em função dos níveis do fator massa específica do agregado graúdo (γ_{ag}) mantendo-se os outros dois fatores em seus níveis médios ($C_c = 0$ e $T_{am} = 0$). Os valores de γ_{ag} foram tomados de 0,2 em 0,2 (níveis codificados), o que corresponde a variações reais de 0,019 kg/dm³.

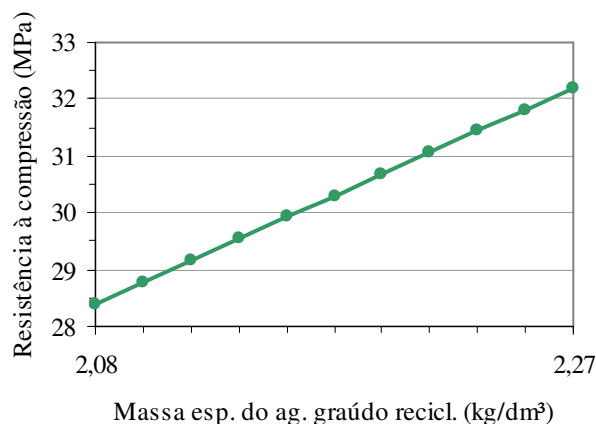


Figura 6.28: Efeito isolado da massa específica do agregado graúdo sobre a resistência à compressão.

Vê-se na Figura 6.28 que a tendência da resistência à compressão foi de crescer com o aumento da massa específica do agregado gráúdo reciclado. A diminuição da porosidade do agregado, ao se mudar de G1 para G2, aumentou a resistência dessa fase e, conseqüentemente, contribuiu para o aumento da resistência dos concretos reciclados. Essa mesma figura mostra que incrementos no valor da massa específica do agregado – ou decrementos na sua porosidade – levaram a incrementos na resistência à compressão do concreto.

6.3.1.4 Análise do efeito da interação entre o consumo de cimento e a massa específica do agregado gráúdo sobre a resistência à compressão

Na Figura 6.29 estão os gráficos de tendência da resistência à compressão dos concretos reciclados: em função dos níveis do fator consumo de cimento (C_c), para as duas massas específicas do agregado gráúdo reciclado (Figura 6.28a); e em função da massa específica do agregado gráúdo (γ_{ag}), para cada consumo de cimento (Figura 6.28b). Em ambos os gráficos o tipo de agregado miúdo foi mantido em seu nível médio ($T_{am} = 0$). Os valores de γ_{ag} e de C_c foram tomados de 0,2 em 0,2 (níveis codificados), o que corresponde a variações reais de 0,019 kg/dm³ e 20 kg/m³, respectivamente.

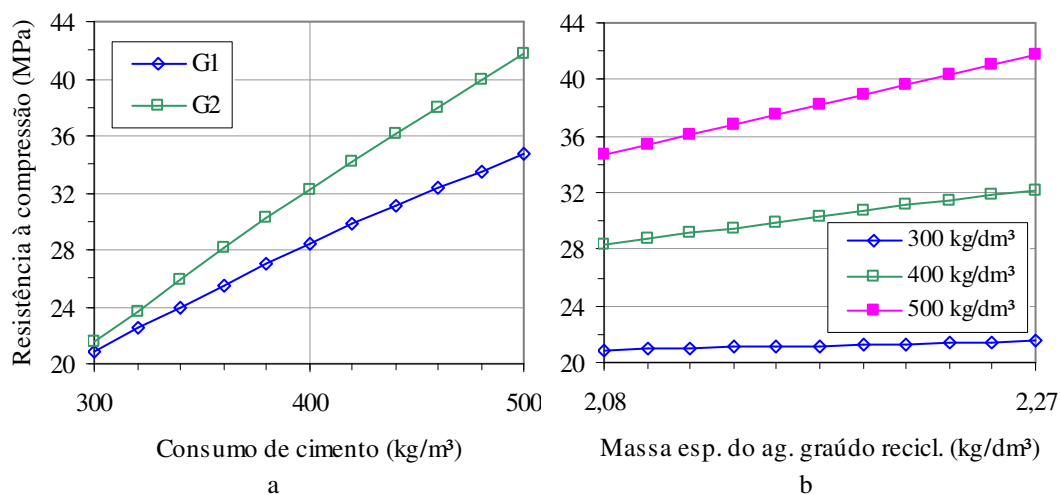


Figura 6.29: Efeito da interação $C_c \times \gamma_{ag}$ sobre a resistência à compressão (a) f_c em função de C_c (b) f_c em função de γ_{ag} .

Aqui a análise dos efeitos individuais dos fatores C_c e γ_{ag} realizada nos itens anteriores é combinada, pois o experimento fatorial detectou interação entre as duas variáveis.

A Figura 6.29a permite ver que a taxa de ganho de resistência dos concretos, ao se aumentar o consumo de cimento, foi maior para aqueles contendo o agregado mais denso (G2). Isso mostra que agregados menos resistentes tendem a tornar o concreto menos sensíveis à alteração do nível de resistência (modificação do consumo de cimento). Também é possível notar nessa mesma figura o que se pôde perceber na Figura 6.26, ou seja, que os concretos contendo o agregado G2 alcançaram maiores resistências à compressão.

A Figura 6.29b corrobora algo que já pôde ser observado na Figura 6.8a (seção 5.2.2): a taxa de ganho de resistência dos concretos, ao se aumentar a massa específica do agregado gráudo, foi tanto maior quanto maior foi o consumo de cimento. Em outras palavras, à medida que o consumo de cimento aumentou (e a relação a/c diminuiu) a resistência da pasta foi deixando de ser tão importante e a fase agregado gráudo tornou-se cada vez mais o fator limitante da resistência do concreto, como já se tinha percebido em 5.2.2.

6.3.2 Absorção de água

A Tabela 6.12 mostra os valores de absorção de água da 1ª moldagem e da única réplica realizada no experimento com os concretos reciclados.

Tabela 6.12: Absorção de água dos concretos reciclados.

Concreto	Absorção de água (%)		
	1ª moldagem	Réplica	Média
67MRG1	15,60	15,94	15,77
67MRG2	13,39	13,84	13,62
67MNG1	10,63	11,23	10,93
67MNG2	9,48	9,20	9,34
50MRG1	14,52	14,76	14,64
50MRG2	12,44	13,62	13,03
50MNG1	10,39	10,80	10,60
50MNG2	9,17	9,80	9,49
40MRG1	13,92	13,30	13,61
40MRG2	12,44	14,89	13,67
40MNG1	9,93	11,09	10,51
40MNG2	9,80	9,90	9,85

A Equação 4 representa a superfície de resposta (modelo) ajustada aos resultados de absorção de água.

$$\text{Abs} = \mathbf{11,94} - 0,25 \cdot C_c - \mathbf{1,97} \cdot T_{am} - \mathbf{0,59} \cdot \gamma_{ag} + 0,28 \cdot C_c \cdot T_{am} + \mathbf{0,39} \cdot C_c \cdot \gamma_{ag} + 0,03 \cdot T_{am} \cdot \gamma_{ag} + 0,22 \cdot C_c^2 \quad (R^2 = 0,9471) \quad (4)$$

Os fatores e interações que apresentaram efeitos significativos sobre a resistência à compressão, determinados através da análise da variância do modelo, são aqueles que aparecem em negrito na Equação 4. Além da média (primeiro termo da equação), foram identificados como significativos, em ordem de importância: o tipo de agregado miúdo, a massa específica do agregado graúdo reciclado e ainda a interação entre o consumo de cimento e a massa específica do agregado graúdo reciclado. A análise da variância comprova, então, o que foi observado na primeira análise dos resultados (seção 6.2), isto é, que mudanças na relação a/c (ou no consumo de cimento), consideradas individualmente, não influenciaram de forma significativa a absorção de água dos concretos.

A superfície de resposta da absorção de água, assim como a da resistência à compressão, encontra-se em R4 e, portanto, não pode ser traçada. Contudo, foi possível traçar a superfície em R3 como função dos fatores T_{am} e γ_{ag} (Figura 6.30) mantendo-se o consumo de cimento fixo no nível médio ($C_c = 0 = 400 \text{ kg/m}^3$). Com $C_c = 0$, o termo quadrático foi anulado na Equação 4 e assim a mesma perdeu sua curvatura e passou a ser um plano.

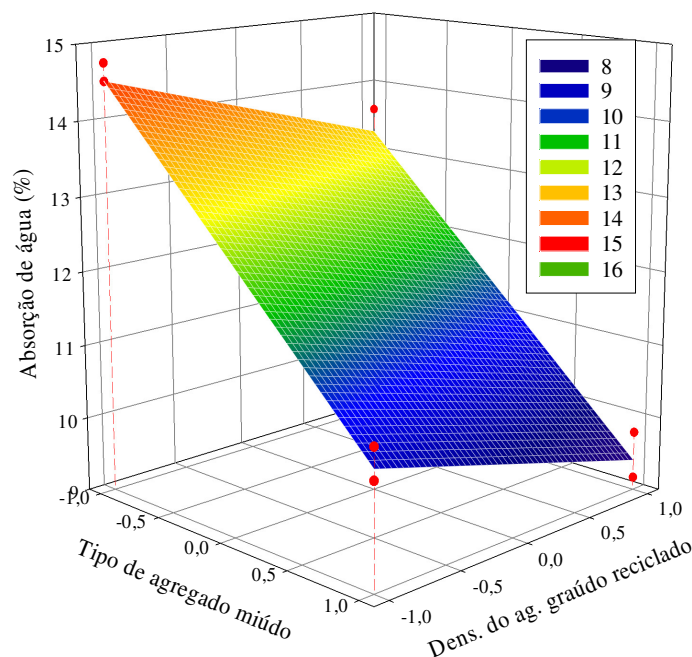


Figura 6.30: Superfície de resposta da absorção de água em função do tipo de agregado miúdo e da massa específica do agregado graúdo ($C_c = 0$).

A Figura 6.30 aponta que a absorção de água foi tanto menor quanto maior foi a massa específica do agregado graúdo reciclado, para ambas as naturezas do agregado miúdo (reciclado e natural). O tipo de agregado miúdo (T_{am}) foi um fator qualitativo no experimento fatorial, tendo apenas dois níveis, mas, apesar disso, a superfície de resposta apresentou “níveis intermediários”. Teoricamente esses níveis intermediários de T_{am} significariam misturas dos dois agregados miúdos, onde os níveis mais próximos de -1 equivaleriam a misturas contendo mais agregado miúdo reciclado do que areia, por exemplo; o nível zero seria, então, uma mistura de 50% de agregado reciclado com 50% de areia. Com base nesse raciocínio, o modelo mostra, então, que misturas dos dois agregados não levariam a uma redução da absorção de água do concreto. Por outro lado, a superfície de resposta estaria apontando que pequenos teores de substituição da areia por agregado reciclado não acarretariam grandes alterações da absorção.

Na Figura 6.31 são mostrados os valores de absorção de água previstos (modelo) em função dos valores observados (medidos experimentalmente). Os resíduos deixados pelo modelo são mostrados na Figura 6.32.

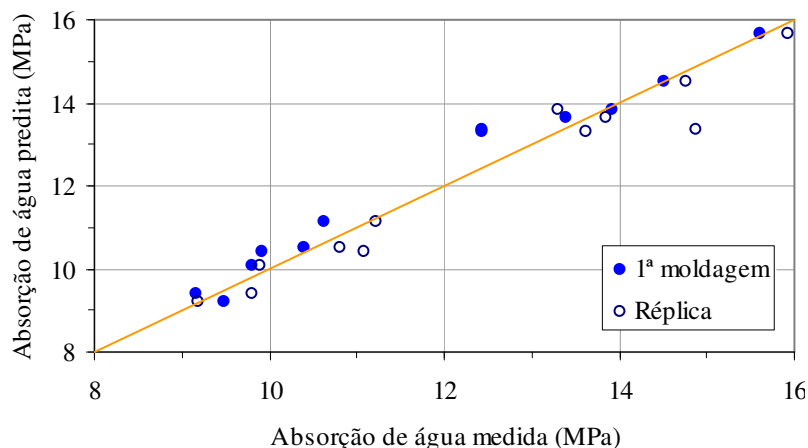


Figura 6.31: Absorção de água medida versus absorção de água predita.

O gráfico da Figura 6.31 confirma o que já se podia perceber a partir do valor do coeficiente de determinação do modelo (R^2), isto é, que o modelo se ajustou muito bem aos valores de absorção de água medidos, explicando a maior parte do comportamento da absorção de água dos concretos reciclados (94,71% de acordo com R^2).

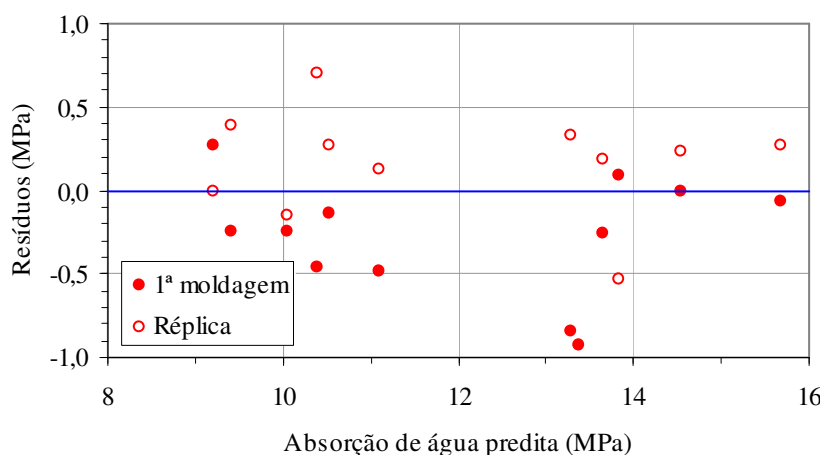


Figura 6.32: Resíduos deixados pelo modelo para a absorção de água.

A Figura 6.32 mostra que os resíduos deixados pelo modelo distribuem-se de forma aleatória, o que, em conjunto com R^2 e a figura 68, confirma a adequação do modelo aos dados experimentais.

6.3.2.1 Análise do efeito isolado do tipo do agregado miúdo sobre a absorção de água

Na Figura 6.33 encontra-se o gráfico de tendência da absorção de água dos concretos reciclados em função dos níveis do fator tipo de agregado miúdo (T_{am}) mantendo-se os outros dois fatores em seus níveis médios ($C_c = 0$ e $\gamma_{ag} = 0$).

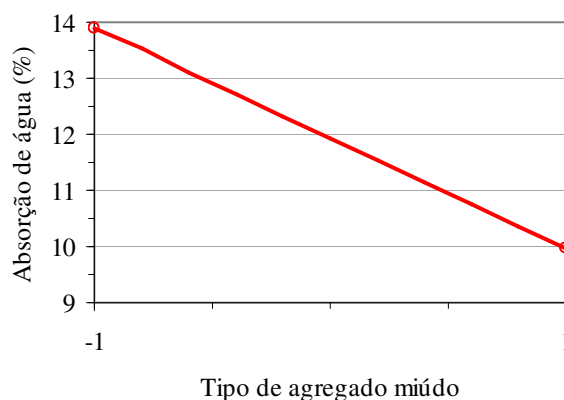


Figura 6.33: Efeito isolado do tipo de agregado miúdo sobre a absorção de água (-1 = reciclado e +1 = areia).

A tendência geral do comportamento da absorção de água dos concretos é confirmada na Figura 6.33: o uso do agregado miúdo mais poroso (o agregado reciclado: $T_{am} = -1$) levou a um aumento da porosidade dos mesmos. Na mesma figura nota-se que o aumento médio foi de algo em torno de 4 pontos percentuais, o que representa um considerável crescimento considerando que os valores de absorção medidos nos concretos reciclados ficaram entre 9% e 16%.

6.3.2.2 Análise do efeito isolado da massa específica do agregado graúdo sobre a absorção de água

Na Figura 6.34 é mostrado o gráfico de tendência da absorção de água dos concretos reciclados em função dos níveis do fator massa específica do agregado graúdo (γ_{ag}) mantendo-se os outros dois fatores em seus níveis médios ($C_c = 0$ e $T_{am} = 0$). Os valores de γ_{ag} foram tomados de 0,2 em 0,2 (níveis codificados), o que corresponde a variações reais de 0,019 kg/dm³.

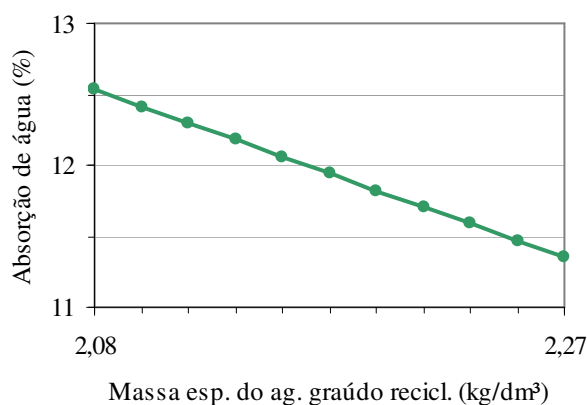


Figura 6.34: Efeito isolado da massa específica do agregado graúdo sobre a absorção de água.

Para o agregado graúdo reciclado (Figura 6.34) repetiu-se o que foi observado para o agregado miúdo: o uso daquele mais poroso (G1) levou a um aumento da absorção de água do concreto. Na mesma figura percebe-se que o aumento médio foi de algo em torno de 1 ponto percentual, o que pode representar um crescimento insignificante, na prática.

6.3.2.3 Análise do efeito da interação entre o consumo de cimento e a massa específica do agregado graúdo sobre a absorção de água

Na Figura 6.35 estão os gráficos de tendência da absorção de água dos concretos reciclados: em função dos níveis do fator consumo de cimento (C_c), para as duas massas específicas do agregado graúdo reciclado (Figura 6.35a); e em função da massa específica do agregado graúdo (γ_{ag}), para cada consumo de cimento (Figura 6.35b). Em ambos os gráficos o tipo de agregado miúdo foi mantido em seu nível médio ($T_{am} = 0$). Os valores de γ_{ag} e de C_c foram tomados de 0,2 em 0,2 (níveis codificados), o que corresponde a variações reais de 0,019 kg/dm³ e 20 kg/m³, respectivamente.

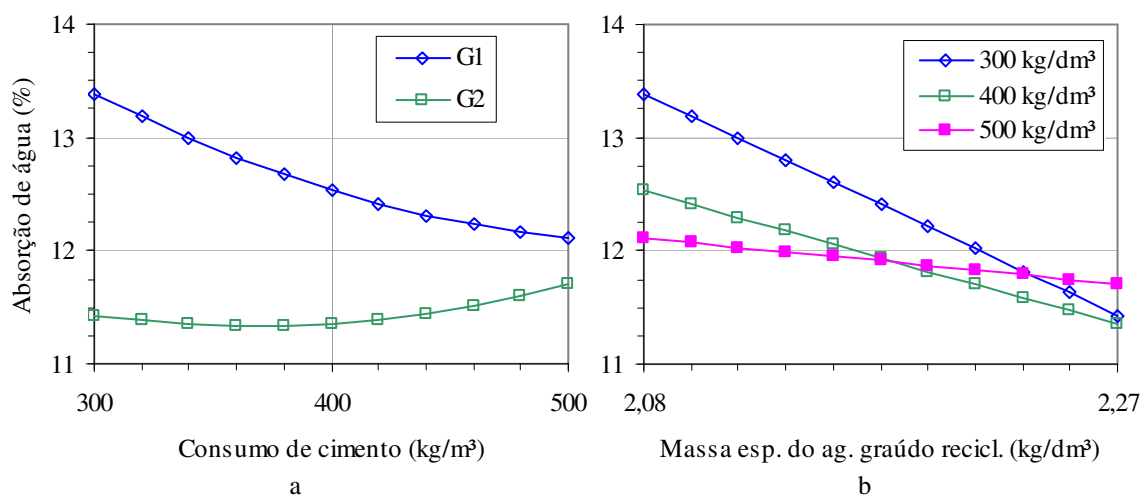


Figura 6.35: Efeito da interação $C_c \times \gamma_{ag}$ sobre a absorção de água (a) f_c em função de C_c (b) f_c em função de γ_{ag} .

Pode-se perceber (Figura 6.35a) primeiramente que, de fato, os concretos contendo o agregado mais denso apresentaram menores absorções de água. Em segundo lugar, enquanto que nos concretos contendo G1 a absorção sempre decresceu à medida que se aumentou o consumo de cimento (e a relação a/c diminuiu), nos concretos contendo G2 a menor absorção ocorreu para o menor consumo de cimento. Mas a diferença entre as absorções referentes ao menor e ao maior consumo de cimento é

muito baixa, em torno de 0,3 pontos percentuais, o que pode ser considerado um aumento desprezível. Por outro lado, esse aumento está de acordo com o que se observa na Figura 6.35b, isto é, que ao se aumentar o consumo do cimento a diferença de absorção entre os concretos com G1 e G2 vai se tornando insignificante.

O comportamento observado na Figura 6.35b mostra que a diferença do nível de porosidade do agregado graúdo vai se tornando menos importante à medida que cresce o consumo de cimento, ou seja, à medida que a porosidade da pasta diminui. Isso prova que a pasta menos porosa é menos penetrável e torna os poros do agregado, o qual está envolvido por ela, menos acessíveis à água.

6.3.3 Índice de vazios

A Tabela 6.13 mostra os valores do índice de vazios da 1ª moldagem e da única réplica realizada no experimento com os concretos reciclados.

Tabela 6.13: Índice de vazios dos concretos reciclados.

Concreto	Índice de vazios (%)		
	1ª moldagem	Réplica	Média
67MRG1	28,40	20,20	24,30
67MRG2	25,69	26,40	26,05
67MNG1	21,13	22,27	21,70
67MNG2	19,59	19,10	19,35
50MRG1	27,08	27,48	27,28
50MRG2	24,23	26,13	25,18
50MNG1	20,92	21,64	21,28
50MNG2	18,87	20,30	19,59
40MRG1	26,32	25,85	26,09
40MRG2	24,42	27,75	26,09
40MNG1	20,15	22,19	21,17
40MNG2	20,27	20,52	20,40

A Equação 5 representa a superfície de resposta (modelo) ajustada aos resultados de índice de vazios.

$$I_v = 23,33 + 0,29 \cdot C_c - 2,63 \cdot T_{am} - 0,43 \cdot \gamma_{ag} - 0,16 \cdot C_c \cdot T_{am} - 0,02 \cdot C_c \cdot \gamma_{ag} - 0,37 \cdot T_{am} \cdot \gamma_{ag} - 0,19 \cdot C_c^2 \quad (R^2 = 0,7606) \quad (5)$$

Somente o tipo de agregado miúdo (T_{am}), além da média, apresentou efeito significativo sobre o índice de vazios. A análise da variância comprova, mais uma vez, o que foi observado na primeira análise dos resultados (seção 6.2), isto é, que mudanças na relação a/c (consumo de cimento) não influenciaram de forma significativa o índice de vazios dos concretos.

A superfície de resposta do índice de vazios, assim como as dos itens anteriores, encontra-se em R4 e, portanto, não pode ser traçada. Usou-se novamente, pois, o artifício de se manter um dos fatores em um nível fixo e traçar a superfície em R3 como função dos outros dois fatores (Figura 6.36 e Figura 6.37).

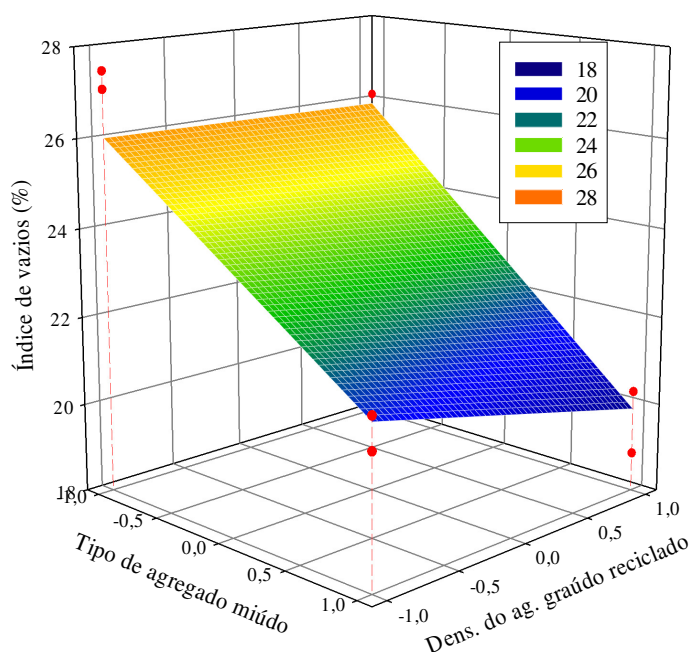


Figura 6.36: Superfície de resposta do índice de vazios em função do tipo de agregado miúdo e da massa específica do agregado graúdo ($C_c = 0$).

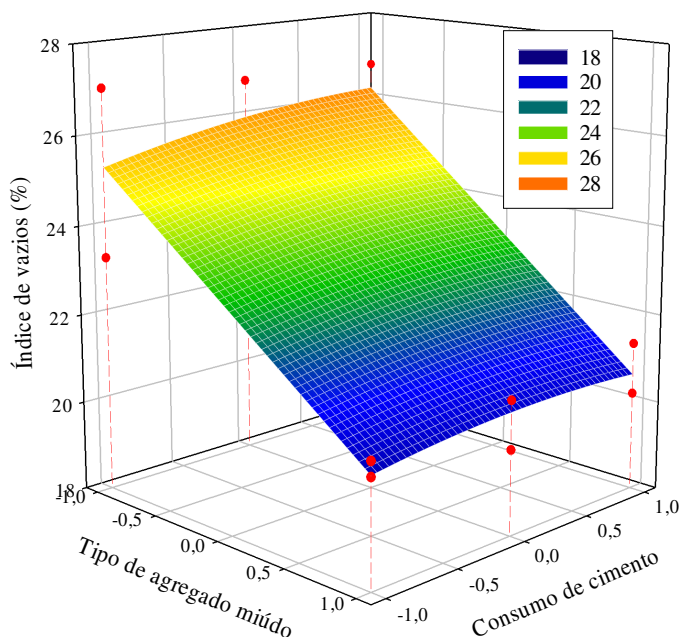


Figura 6.37: Superfície de resposta do índice de vazios em função do tipo de agregado miúdo e do consumo de cimento ($\gamma_{ag} = 0$).

Pode-se perceber na Figura 6.36 que os menores índices de vazios ocorreram nos concretos contendo areia ($T_{am} = +1$) e o agregado graúdo mais denso G2 ($\gamma_{ag} = +1$). Na Figura 6.37 nota-se o que já foi apontado pela análise da variância, quer dizer, não houve interação significativa entre o tipo de agregado miúdo e o consumo de cimento, mostrando graficamente que não houve mudança substancial no índice de vazios ao se alterar o consumo de cimento qualquer que tenha sido o tipo do agregado miúdo usado. Ainda sim, é possível notar na mesma figura que menores índices de vazios foram alcançados pelos concretos contendo areia ($T_{am} = +1$).

Na Figura 6.38 são mostrados os valores de índice de vazios previstos (modelo) em função dos valores observados (medidos experimentalmente). Os resíduos deixados por esse modelo são mostrados na Figura 6.39.

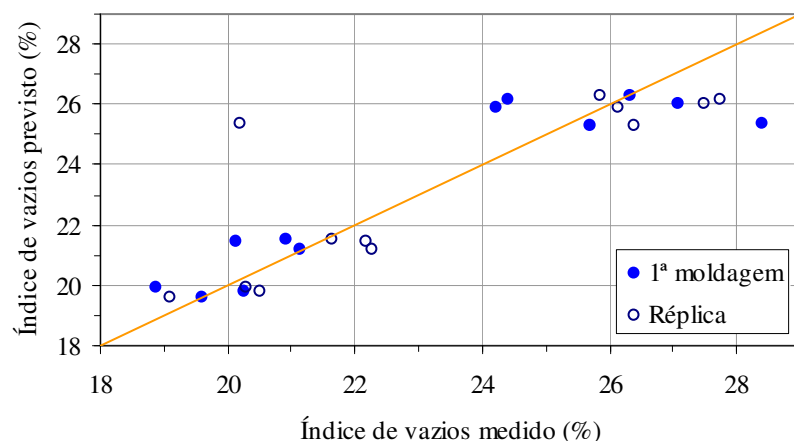


Figura 6.38: Índice de vazios previsto em função do índice de vazios medido.

No gráfico da Figura 6.38 também é possível perceber o que já apontou o coeficiente de determinação (R^2): o modelo não se ajustou tão bem aos valores de absorção de água medidos quanto os modelos dos itens anteriores se ajustaram à resistência à compressão e à absorção de água. No entanto, o modelo ainda conseguiu descrever a maior parte do comportamento da absorção de água dos concretos reciclados (76,06% de acordo com R^2).

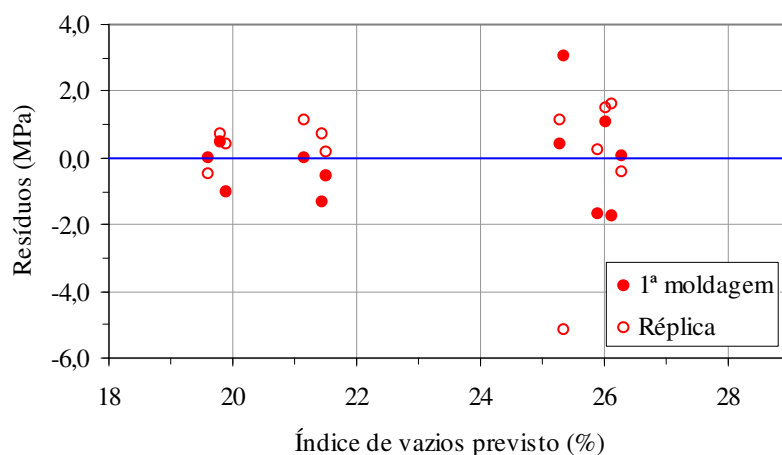


Figura 6.39: Resíduos deixados pelo modelo para índice de vazios.

Os resíduos deixados pelo modelo (Figura 6.39) distribuíram-se de forma aleatória, confirmando um ajuste satisfatório do modelo aos dados experimentais.

6.3.3.1 Análise do efeito isolado do tipo do agregado miúdo sobre o índice de vazios

Na Figura 6.40 encontra-se o gráfico de tendência do índice de vazios dos concretos reciclados em função dos níveis do fator tipo de agregado miúdo (T_{am}) mantendo-se os outros dois fatores em seus níveis médios ($C_c = 0$ e $\gamma_{ag} = 0$).



Figura 6.40: Efeito isolado do tipo de agregado miúdo sobre o índice de vazios (-1 = reciclado e +1 = areia).

A superfície de resposta (Figura 6.36 e Figura 6.37) já permitia inferir que o efeito do agregado miúdo reciclado foi de aumentar o índice de vazios dos concretos. Agora o gráfico da Figura 6.40 confirma que a tendência geral do índice de vazios foi aumentar ao se mudar da areia para o agregado miúdo reciclado.

Isso provavelmente está relacionado à granulometria do agregado miúdo reciclado, pois o mesmo apresentou maior teor de materiais finos ($D < 0,15$ mm) e de materiais pulverulentos ($D < 0,075$ mm) que a areia (Tabela 6.2). Materiais esses capazes de aprisionar mais ar na mistura fresca e assim, após o endurecimento, deixar maior quantidade de vazios na pasta.

A absorção de água e o índice de vazios são propriedades inter-relacionadas ligadas à porosidade do concreto, obtidas num mesmo ensaio e dependentes das mesmas medições feitas durante esse ensaio. Apesar disso, o experimento fatorial permitiu detectar que as duas não dependem exatamente dos mesmos parâmetros aqui estudados relativos à composição dos concretos.

Capítulo 7

Conclusões

7.1 Conclusões

Como parte conclusiva desse estudo de pesquisa dentro da área de materiais não convencionais realizado com o objetivo de tornar comum o uso de agregados reciclados proveniente de resíduos de construção e demolição em concretos estruturais, pode-se tirar de cada parte analisada as considerações a seguir.

A caracterização dos agregados reciclados aqui realizada corroborou a literatura, mostrando que as propriedades dos mesmos variam em razão de depender de diversos fatores. As propriedades dos agregados reciclados estudados refletiram as particularidades do RCD de Maceió, que estão relacionadas aos métodos e sistemas construtivos usados na região, aos materiais da região, ao período de amostragem, ao tempo de duração da amostragem etc., além das particularidades do processo aqui utilizado para a transformação do resíduo em agregado.

O uso de um moinho de martelos na cominuição dos resíduos levou, de fato, à geração de uma maior quantidade de grãos miúdos em relação aos graúdos e isso aconteceu independentemente da resistência do material cominuído (RCD ou resíduo de concreto). Ademais, a maior dimensão dos grãos apresentada foi a mesma para ambos, 25,4 mm, limitada a alguns poucos grãos, o que representa uma vantagem deste equipamento em relação a outros, pois o beneficiamento de resíduos nele poderá não necessitar mais do que uma passagem pela etapa de cominuição.

A composição do agregado G1, determinada a partir da fração mineral do RCD, mostrou que, do ponto de vista macroscópico, as fases presentes nos resíduos de Maceió foram as mesmas observadas nos resíduos de outros trabalhos (cerâmicas, rochas, materiais à base de cimento e “impurezas”).

Os métodos normalizados pela ABNT e aqui usados na caracterização dos agregados reciclados permitiram quantificar de forma satisfatória os valores da maioria de suas propriedades. Convém lembrar que as normas originalmente concebidas para a caracterização de agregados naturais podem não ser apropriadas para agregados reciclados.

A metodologia adotada com o objetivo de manipular a resistência dos agregados graúdos reciclados, ou seja, o uso de uma regra de mistura baseada na massa específica em conjunto com o ensaio de determinação da massa específica de agregados graúdos estabelecido pela ABNT, produziu um resultado adequado mesmo tendo de lidar com a massa específica média dos grãos dos materiais a serem misturados (G1 e agregado de concreto reciclado) para formar o agregado mais denso G2. Isso vem creditar a metodologia para utilização em obras quando não se dispuser de um fornecedor de agregados graúdos reciclados que os separe em faixas de massa específica (ou resistência).

Em relação à areia, típica da região, o agregado miúdo reciclado apresentou-se mais grosso, de um ponto de vista geral, mas com maior teor de materiais finos, e, apesar de ter uma granulometria contínua, não se enquadrou na zona ótima especificada na norma. O reciclado apresentou menor quantidade de matéria orgânica e, ainda, menor massa específica e maior absorção de água, o que leva a considerar que esse material tem uma maior porosidade.

Quanto aos agregados graúdos reciclados, apesar de possuírem granulometria contínua, os mesmos não se enquadraram em nenhuma faixa da norma. Além disso, em relação à brita 1 usada na comparação, apresentaram-se mais finos e com teor de materiais mais finos que 0,075 mm (materiais pulverulentos) levemente maior. Os reciclados foram menos lamelares que a brita, porém, G1 foi mais lamelar que G2 devido à maior presença de pedaços de cerâmica vermelha em sua composição. Ambos agregados reciclados apresentaram menor massa específica e maior absorção de água que a brita 1, confirmando a presença de materiais mais porosos e menos densos nas suas composições.

Assim como em outros trabalhos, a medição do abatimento do tronco de cone mostrou não ser um método adequado para medir a consistência dos concretos reciclados visto que estes se apresentaram trabalháveis mesmo com pequenos

abatimentos; também não houve relação entre os abatimentos e o teor de aditivo usado em cada concreto. As perdas de consistência dos concretos reciclados, ocorridas provavelmente em virtude dos agregados reciclados terem absorvido parte da água de mistura, são um indício de que a pré-molhagem destes com uma quantidade de água referente a 70% de sua absorção total de água foi insuficiente. Como este comportamento foi mais pronunciado nos concretos contendo mais agregado reciclado (miúdo mais graúdo) e/ou o agregado graúdo mais poroso (G1), é possível que exista aí uma tendência de que quanto maior for a porosidade do agregado (agregado miúdo mais agregado graúdo, ou somente um ou outro), maior deverá ser o teor de água usado na pré-molhagem.

O experimento fatorial usado no estudo da resistência à compressão, da absorção de água e do índice de vazios dos concretos reciclados apresentou o inconveniente de necessitar da moldagem de, no mínimo, uma réplica de cada traço, além de necessitar que os níveis dos fatores fossem igualmente espaçados, o que obrigou a relação a/c a ser substituída pelo consumo de cimento na análise dos resultados. Por outro lado, o método apresentou, sem dúvida, vantagens em relação à análise comum (a primeira análise dos resultados), pois permitiu detectar de forma clara: quais variáveis independentes (parâmetros da composição do concreto) exerceram um efeito significativo sobre as variáveis de resposta (propriedades do concreto); a ocorrência de interações entre os efeitos das variáveis independentes e a ordem de importância de cada efeito e interação significativa. Além do mais, o método forneceu modelos ajustados às respostas cujas equações continham todas as variáveis independentes estudadas, o que permitiu observar o efeito conjunto das mesmas sobre cada propriedade do concreto.

Em comparação com os concretos convencionais de referência, os concretos contendo agregados reciclados tenderam a exigir maiores doses de aditivo para alcance de uma consistência plástica.

Em termos de propriedades mecânicas, os concretos reciclados apresentaram resistências à compressão inferiores às dos concretos convencionais em vários casos, sendo uma exceção os concretos com relação a/c igual a 0,67 e o concreto 40MNG2 – estes últimos se igualaram ou superaram os concretos de referência. Vale destacar que as resistências inferiores foram, ao mesmo tempo, próximas das dos concretos

convencionais e foram confirmadas na réplica do experimento. A maior porosidade dos agregados reciclados foi prejudicial à resistência do concreto no sentido de significar agregados menos resistentes que os naturais, mas ela também pode ter proporcionado maior aderência dos agregados com a pasta, o que é benéfico para a resistência do compósito.

Os módulos de elasticidade dos concretos reciclados foram inferiores aos dos concretos convencionais, sendo, novamente, os de relação $a/c = 0,67$ uma exceção; os mesmos tiveram módulos bem semelhantes ou superiores aos dos concretos convencionais. Menores módulos de elasticidade implicam em concretos mais deformáveis e más conseqüências para a deformabilidade das estruturas e para a fluência e retração do material.

Os concretos reciclados mostraram-se mais porosos e permeáveis que os concretos convencionais, sendo somente o concreto 40MNG2 a exceção no que se refere à permeabilidade. Concretos mais porosos e permeáveis tendem a ser menos duráveis por proporcionar, no caso das aplicações estruturais, menor proteção à armadura contra agentes agressivos externos que podem adentrar o compósito. Entretanto, isso só virá a ser um fator extremamente limitante do uso desses concretos quando os mesmos forem usados em estruturas aparentes. A própria norma brasileira de cálculo de estruturas de concreto armado menciona que revestimentos podem ser aplicados ao concreto no intuito de proteger o material das condições ambientais nocivas.

As propriedades dos concretos revelaram-se sensíveis à diminuição da porosidade dos agregados graúdos reciclados, de forma que os valores destas tenderam, em alguns casos, a ser bem próximos ou até superar os valores das propriedades dos concretos convencionais, conforme já se comentou. A introdução, então, da preocupação com o nível de resistência dos agregados graúdos reciclados demonstra ser um caminho promissor na busca de um maior entendimento da influência destes sobre as propriedades dos concretos com eles confeccionados, ao mesmo tempo em que permite serem determinadas aplicações mais adequadas para os concretos reciclados, inclusive dentro das opções de uso estrutural. Para alcance desses objetivos, mais pesquisas precisarão ser feitas com o concreto reciclado estudando ainda suas propriedades e, indo mais além, o seu desempenho em estruturas.

Por ora, tendo em vista os resultados encontrados neste estudo para as propriedades dos concretos reciclados, pode-se afirmar que é possível o uso deste material em aplicações estruturais desde que observadas suas particularidades: sua menor resistência, maior deformabilidade e maior permeabilidade, as quais podem vir a ser fatores limitantes em alguns casos.

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

Finalmente, apresenta-se como sugestão para prosseguimento dos estudos:

- promover melhoras nos métodos de caracterização dos agregados reciclados – principalmente no que se refere à quantificação da absorção de água e da massa específica;
- estudar as propriedades dos agregados capazes de interferir na consistência do concreto (granulometria, índice de forma etc.) produzindo agregados reciclados em diferentes equipamentos de cominuição; confeccionar concretos com esses agregados e verificar, então, através de experimento fatorial, qual o melhor equipamento. Analisar também a relação custo x benefício dos equipamentos;
- mudar a granulometria do agregado miúdo reciclado removendo ou alterando a proporção de suas frações mais finas no intuito de produzir um agregado que interfira menos na consistência do concreto;
- avaliar o efeito de diferentes níveis de porosidade dos agregados reciclados miúdos sobre as propriedades do concreto;
- estudar diferentes formas de preparo dos concretos reciclados alterando a ordem de colocação de cada material na betoneira no intuito de minimizar a absorção da água da mistura por parte dos agregados reciclados;
- estudar através de experimentos fatoriais a relação entre a porosidade dos agregados reciclados (miúdos e/ou graúdos) e a permeabilidade do concreto aos gases e à água;
- avaliar o desempenho dos concretos produzidos com agregados reciclados de diferentes resistências (porosidades) em aplicações estruturais;

Referências

ALTHEMAN, Dener. **Avaliação da durabilidade de concretos confeccionados com entulho de construção civil**. Campinas: FAPESP, 2002. Relatório de Pesquisa. Disponível em <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br>> Acesso em: 2004.

ANGULO, Sérgio Cirelli. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. São Paulo: USP, 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, 2000. Disponível em <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br>> Acesso em: 2004.

ANGULO, Sérgio Cirelli. **Características de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. São Paulo: USP, 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, 2005. Disponível em <<http://www.teses.usp.br>> Acesso em: 2006.

ANGULO, Sérgio Cirelli; JOHN, Vanderley Moacyr. **Determinação dos teores de concreto e argamassa em agregados graúdos de RCD reciclados**. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 2001, Foz do Iguaçu. **Anais**. Paraná: Ibracon. 1 CD-ROM.

ANGULO, Sérgio Cirelli; JOHN, Vanderley Moacyr; ULSEN, Carina; KAHN, Henrique. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados separados por líquidos densos**. In: Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2004, São Paulo. **Anais**. São Paulo: Antac. 1 CD-ROM.

ANGULO, Sérgio Cirelli; KAHN, Henrique; JOHN, Vanderley Moacyr; ULSEN, Carina. **Metodologia de caracterização de resíduos de construção e demolição**. In: Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil, 2003, São Paulo. **Anais**. São Paulo: Ibracon. 1 CD-ROM.

ANGULO, Sérgio Cirelli; ZORDAN, Sérgio Eduardo; JOHN, Vanderley Moacyr. **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil**. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br>> Acesso em: 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. NBR NM 30, 2000. Rio de Janeiro.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado fino - Determinação de impurezas orgânicas. NBR NM 49, 2001. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. NBR NM 52, 2003. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. NBR NM 53, 2003. Rio de Janeiro.

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos - Método de ensaio. NBR 5739, 1994. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estruturas de concreto armado - Procedimento. NBR 6118, 2003. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados para concreto - Especificação. NBR 7211, 2005. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados - Determinação do teor de materiais pulverulentos. NBR 7219, 1987. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária. NBR 7251, 1982. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. NBR 7809, 1983. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto - Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação - Método de ensaio. NBR 8522, 2003. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. NBR 9776, 1987. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. NBR 9778, 2004. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concretos sem função estrutural - Requisitos. NBR 15116, 2004. Rio de Janeiro.

BASHEER, Lulu; KROPP, Joerg; CLELAND, David J. Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. **Construction and Building Materials**, [S.l.], n. 15, p. 93-103, 2001.

BRANDÃO, Ana Maria da Silva. **Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado - Aspectos relativos ao projeto**. São Carlos: USP, 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, 1998.

BUTTLER, Alexandre Marques. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto - Influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados**. São Carlos: USP, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, 2003. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br>> Acesso em: 2004.

CAMPOS, Antônio Rodrigues de; LUZ, Adão Benvindo da; CARVALHO, Eduardo Augusto de. Separação em meio denso. In: LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; ALMEIDA, Salvador L. M de. **Tratamento de Minérios**. 4.ed. rev. Rio de Janeiro: CETEM, 2004.

CARNEIRO, Alex Pires. et al. Características do entulho e do agregado reciclado. In: CASSA, José Clodoaldo Silva; CARNEIRO, Alex Pires; BRUM, Irineu Antônio Schadach de. **Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção - Projeto Entulho Bom**. Salvador: Edufba, 2001.

CARNEIRO, Fabiana Padilha. et al. **Resíduos de construção e demolição na região metropolitana do Recife - RMR: um estudo de caso**. In: Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2004, São Paulo. **Anais**. São Paulo: Antac. 1 CD-ROM.

CARRIJO, Priscila Meireles. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. São Paulo: USP, 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, 2005.

CARRISSO, Regina Coeli C.; CORREIA, Júlio César G. Classificação e peneiramento. In: LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; ALMEIDA, Salvador L. M de. **Tratamento de Minérios**. 4.ed. rev. Rio de Janeiro: CETEM, 2004.

CATHER, R. et al. Improvements to the Figg method for determining the air permeability of concrete. **Magazine of Concrete Research**, [S.l.], v. 36, n. 129, p. 241-245, 1984.

CHEN, How-Ji; YEN, Tsong, CHEN, Kuan-Hung. Use of building rubbles as recycled aggregates. **Cement and Concrete Research**, [S.l.], n. 33, p. 125-132, 2003.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, Resolução. 307. 2002. Brasília. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>> Acesso em: 2004.

COSPER, Stephen D.; HALLENBECK, William H.; BRENNIMAN, Gary R. **Construction and Demolition Waste - Generation, Regulation, Practices, Processing, and Policies**. Chicago: University of Illinois, 1993.

DAL MOLIN, Denise Carpena Coutinho; KULAKOWSKI, Marlova Piva; RIBEIRO, José Luis Duarte. Contribuições ao planejamento de experimentos em projetos de pesquisa de engenharia civil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 5, n. 2, p. 37-49, 2005. Disponível em: <<http://www.antac.org.br/ambienteconstruido>> Acesso em: 2005.

DIEUDONNÉ, Vincent; HEWITT, Sam; WYK, Danie Van. **Jigging the South-African coals - a new challenge**. 2001. Disponível em: <<http://www.bateman-jigging.com>> Acesso em: 2005.

DOLAN, Patrick J.; LAMPO, Richard G.; DEARBORN, Jacqueline C. **Concepts for reuse and recycling of construction and demolition waste**. [S.l.]: US Army Corps of Engineers, 1999. Relatório Técnico. Disponível em <<http://www.cecer.army.mil>> Acesso em: 2005.

FIGG, J. W. Methods of measuring the air and water permeability of concrete. **Magazine of Concrete Research**, [S.l.], v. 15, n. 85, p. 213-219, 1973.

FIGUEIRA; Hedda Vargas de O.; ALMEIDA, Salvador L. M de; LUZ, Adão Benvindo da. Cominuição. In: LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; ALMEIDA, Salvador L. M de. **Tratamento de Minérios**. 4.ed. rev. Rio de Janeiro: CETEM, 2004.

GOMES, Paulo César Correia et al. **Projeto desentulho para a cidade de Maceió**. Maceió: Sebrae, Fundepes, Ufal, 2005. Relatório Técnico.

GÓMEZ-SOBERÓN, José M. V. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate - An experimental study. **Cement and Concrete Research**, [S.l.], n. 32, p. 1301-1311, 2002.

GONÇALVES, Rodrigo Dantas Casillo. **Agregados reciclados de resíduos de concreto - Um novo material para dosagens estruturais**. São Carlos: USP, 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, 2001.

GROVE, Stephen. **Rules of mixture for elastic properties**. [S.d.]. Disponível em: <<http://www.tech.plym.ac.uk/sme/mats216>> Acesso em: 2007.

GRÜBL, Peter; RÜHL, Marcus. **Concrete with Recycled Aggregates**. 1998. Disponível em: <<http://www.b-i-m.de>> Acesso em: 2004.

GUIMARÃES, André Tavares da Cunha. Propriedades do concreto fresco. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: Ibracon, 2005. 2v.

HADJIEVA-ZAHARIEVA, R.; DIMITROVA, E.; BUYLE-BODIN, François. Building waste management in Bulgaria: challenges and opportunities. **Waste Management**, [S.l.], n. 23, p. 749-761, 2003.

HANSEN, Torben C.; NARUD, Henrik. Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. **Concrete International**, [S.l.], p. 79-83, 1983.

HARRIS, Sydney M. **Processing construction and demolition waste**. 1988. Disponível em: <<http://www.p2pays.org>> Acesso em: 2005.

HELENE, Paulo; TERZIAN, Paulo. **Manual de dosagem e controle de concreto**, São Paulo: Pini, 1993.

JOHN, Vanderley Moacyr; AGOPYAN, Vahan. **Reciclagem de resíduos de construção**. 2000. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br>> Acesso em: 2004.

JOHN, Vanderley Moacyr; ANGULO, Sérgio Cirelli; KAHN, Henrique. **Controle da qualidade dos agregados de resíduos de construção e demolição reciclados para concretos a partir de uma ferramenta de caracterização**. In: SATTler, Miguel Aloysio; PEREIRA, Fernando Oscar Ruttkay. **Construção e Meio Ambiente**. Porto Alegre: Habitare, 2006.

JUNGAMNN, A. **Building Rubble Treatment Using the alljig in Europe and USA**. 1997. Disponível em: <<http://www.b-i-m.de>> Acesso em: 2004.

KHALOO, Ali R. Properties of concrete using crushed clinker brick as coarse aggregate. **ACI Materials Journal**, [S.l.], v. 91, n. 2, p. 401-409, 1994.

KHATIB, J. M. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. **Cement and Concrete Research**, [S.l.], n. 35, p. 763-769, 2005.

KOHLER, G.; KURKOWSKI, H. **Optimising the use of RCA**. 1998. Disponível em: <<http://www.b-i-m.de>> Acesso em: 2004.

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL. Betões - Determinação da permeabilidade ao ar e à água - Método de Figg. E 413, 1993. Portugal.

LATTERZA, Luciano de Mello. **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: USP, 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, 1998.

LEITE, Mônica Batista. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** Porto Alegre: UFRGS, 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

LEVY, Salomon Mony. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria.** São Paulo: USP, 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, 2001. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br>> Acesso em: 2004.

LEVY, Salomon Mony; HELENE, Paulo. **Mitos e verdades sobre o efeito pozolânico dos resíduos cerâmicos e argamassas de cimento, produzidas em São Paulo.** In: Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2004, São Paulo. **Anais.** São Paulo: Antac. 1 CD-ROM.

LIMA, José Antônio Ribeiro de. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos.** São Paulo: USP, 1999. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, 1999. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br>> Acesso em: 2004.

LINS, Fernando Antonio Freitas. Concentração gravítica. In: LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; ALMEIDA, Salvador L. M de. **Tratamento de Minérios.** 4.ed. rev. Rio de Janeiro: CETEM, 2004.

LUZ, Adão Benvindo da; LINS, Fernando Freitas. Introdução ao tratamento de minérios. In: LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; ALMEIDA, Salvador L. M de. **Tratamento de Minérios.** 4.ed. rev. Rio de Janeiro: CETEM, 2004.

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

MESTERS, K; KURKOWSKI, H. **Density separation of recycling building materials by means of jig technology.** 1997. Disponível em: <<http://www.b-i-m.de>> Acesso em: 2004.

MIRANDA, Leonardo F.R.; SELMO, Sílvia M. S. CDW recycled aggregate renderings: Part I - Analysis of the effect of materials finer than 75 µm on mortar properties. **Construction and Building Materials**, [S.l.], n. 20, p. 615-624, 2006.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do Concreto**. 2 ed. São Paulo: Pini, 1997.

OIKONOMOU, Nik. D. Recycled concrete aggregates. **Cement & Concrete Composites**, [S.l.], n. 27, p. 315-318, 2005.

OLIVEIRA, Márcio Joaquim Estefano de. **Materiais descartados pelas obras de construção civil: Estudo dos resíduos de concreto para reciclagem**. Rio Claro: Unesp, 2002. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 2002.

OLIVEIRA, M. Barra de; VAZQUEZ, E. The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete. **Waste Management**, [S.l.], v. 16, n. 1-3, p. 113-117, 1996.

PENNSYLVANIA CRUSHER. **Handbook of crushing**. Broomall: Pennsylvania Crusher, 2003. Disponível em: <<http://www.penncrusher.com>> Acesso em: 2005.

PINTO, Tarcísio de Paula. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. São Paulo: USP, 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, 1999. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br>> Acesso em: 2004.

POON, Chi S. Management and recycling of demolition waste in Hong Kong. **Waste Management**, [S.l.], n. 15, p. 561-572, 1997.

POON, Chi S. et al. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. **Cement and Concrete Research**. [S.l.], n. 34, p. 31-36, 2004.

POON, Chi S.; CHAN, Dixon. Feasible use of recycled concrete aggregate sand crushed clay brick as unbound road sub-base. **Construction and Building Materials**. [S.l.], n. 20, p. 578-585, 2006.

QUEBAUD, Mirian Ramos. et al. **Influência do teor em agregados provenientes da reciclagem de materiais de demolição (agregados reciclados) na permeabilidade do concreto**. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 1999, Salvador. **Anais**. Bahia: Ibracon. 1 CD-ROM.

SALEM, Rohi M.; BURDETTE, Edwin G. Role of chemical and mineral admixtures on physical properties and frost-resistance of recycled aggregate concrete. **ACI Materials Journal**, [S.l.], v. 95, n. 5, p. 558-563, 1998.

SAMPAIO, João Alves; LUZ, Adão Benvindo da. Separação magnética e eletrostática. In: LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; ALMEIDA, Salvador L. M de. **Tratamento de Minérios**. 4.ed. rev. Rio de Janeiro: CETEM, 2004.

SARDÁ, Marcia Cristina; ROCHA, Janaide Cavalcante. **Métodos de classificação e redução dos resíduos da construção civil gerados em Blumenau/SC, utilizando como base a resolução do Conama n. 307.** In: Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil, 2003, São Paulo. **Anais.** São Paulo: Ibracon. 1 CD-ROM.

SBRIGHI NETO, Cláudio. Agregados para concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.** São Paulo: Ibracon, 2005. 2v.

SYMONDS Group Ltd.. **Construction and demolition waste management practices, and their economic impacts.** 1999. Relatório de Pesquisa. Disponível em: <http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/cdw/cdw_report.htm> Acesso em: 2004.

TAM, Vivian W.Y.; TAM, C. M. Crushed aggregate production from centralized combined and individual waste sources in Hong Kong. **Construction and Building Materials**, [S.l.], n. 20, p. 879-886, 2007.

THYSSENKRUPP. Disponível em: <<http://www.thyssenkrupp.com>> Acesso em: 2006.

TRÄNKLER, Josef O. V.; WALKER, Isa; DOHMANN, Max. Environmental impact of demolition waste - an overview on 10 years of research and experience. **Waste Management**, [S.l.], v.16 n. 1-3, p. 21-26, 1996.

TRIO ENGINEERED PRODUCTS. Disponível em: <<http://www.trioproductions.com>> Acesso em: 2006.

VIEIRA, Geilma Lima. **Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** Porto Alegre: UFRGS, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

ZORDAN, Sérgio Eduardo. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto.** Campinas: Unicamp, 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, Universidade Estadual de Campinas, 1997. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br>> Acesso em: 2004.

Obras consultadas

FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. **Novo Dicionário Aurélio da Língua Portuguesa**. Curitiba: Positivo, 2004.

FURASTÉ, Pedro Augusto. **Normas técnicas para o trabalho científico - Elaboração e formatação**. 14 ed. Porto Alegre: [S.ed.], 2006.

NETO, Benício de Barros; SCARMINIO, Ieda Spacino; BRUNS, Roy Edward. **Como fazer experimentos - Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 2 ed. CampinaS: Editora da UNICAMP, 2003.