

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

ANTONIO EDUARDO BEZERRA CABRAL

**Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos  
com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**

São Carlos

2007

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



ANTONIO EDUARDO BEZERRA CABRAL

**Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Ciências da Engenharia Ambiental.

Área de concentração: Ciências da Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Assoc. Valdir Schalch

São Carlos

2007

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO DESTE TRABALHO, POR  
QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE  
ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

Antonio Eduardo Bezerra Cabral

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Ciências da Engenharia Ambiental.

Área de concentração: Ciências da Engenharia Ambiental.

Aprovada em:

Banca Examinadora

---

Prof. Assoc. VALDIR SCHALCH (Orientador)  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

---

Profª. Dra. DENISE CARPENA COITINHO DAL MOLIN  
(Universidade Federal do Rio Grande do Sul/UFRGS)

---

Prof. Dr. ALMIR SALES  
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

---

Prof. Dr. WELLINGTON CYRO DE ALMEIDA LEITE  
(UNESP – Guaratinguetá)

---

Prof. Dr. OSNY PELEGRINO FERREIRA  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

---

Prof. Titular MARCELO PEREIRA DE SOUZA  
Coordenador da Área de Ciências da Engenharia Ambiental

---

Prof. Assoc. GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação



Dedico este trabalho ao meu pai (*in memoriam*),  
que me mostrou o prazer na busca pelo conhecimento,  
e à minha mãe,  
que vela por mim a cada momento da minha vida.



## AGRADECIMENTOS

Ao professor Valdir, por aceitar o desafio de orientar uma tese em uma área bastante multi-disciplinar, e acima de tudo, por acreditar no meu potencial em realizá-la.

À professora Denise, por se disponibilizar na co-orientação e pelas inúmeras contribuições ao trabalho.

Ao professor Ribeiro, pelas valiosas colaborações nas análises dos resultados.

Ao professor Ravi, pela grande contribuição na parte referente à durabilidade.

À CAPES, pelo suporte financeiro, através do Programa de Qualificação Institucional (PQI) nº106/03-1 CEFET-CE/EESC-USP.

À coordenadora do PQI, professora Nájila Julião, pelo brilhantismo com que conduziu o Programa, sempre dando suporte para o desenvolvimento do trabalho.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental (PPG-SEA).

Aos colegas do CEFET-CE, também pós-graduandos na EESC, Mariano, Turene, Tássio, Zeberto e Adeildo, pelo caloroso convívio no período em que estive longe da terrinha.

Aos colegas da EESC, Melissa, Lili, Patrícia, Jaqueline, Luciana, Andréa, Anderson, Ricardo Parente, Bia, Roberta, Luis Sérgio, Maíinha, Robin, Kátia, Sergião, Marcelo, Alexandre Kepler, Cristiano, Danilo (Piauí), Alexandre Buttler...

Aos colegas do NORIE/UFRGS, Daniel, Geilma, Ana Paula, Patrícia Lovato, Cristóvão, Gugão, Guguinha, Tiago, César, Aline, Mara, Carla, Raquel, Ivo, Jairo Andrade & Martina, Leila, Marlova, Fernanda, Andréa Kern...

Aos colegas de Sydney, Truck, Giffen, Mr. Dao, Gisela, Glau & Fábio, Taciana, Donato, Simone, Saci, que se transformaram na minha família no período em que lá estive.

Aos colegas Sãocarlenses, Ana Flávia, Robertinha, Ana, Dani, Fábio & Valéria, Rui & Juliana...

Aos meus familiares do Ceará e Piauí, pelo carinho e amor com que era recebido quando voltava a vê-los.

À Carol, que esteve ao meu lado desde o primeiro dia de aula em São Carlos, pelo amor e carinho recebidos.

Aos meus pais e irmãos, pelo apoio e incentivo dado. Esta conquista também é de vocês.

À Deus.



## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	xv
LISTA DE TABELAS .....	xix
RESUMO .....	xxiii
ABSTRACT .....	xxv
1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	2
1.1 Introdução.....	2
1.2 Justificativa.....	3
1.3 Objetivos .....	7
1.3.1 Objetivo geral.....	7
1.3.2 Objetivos específicos.....	7
2. CONSIDERAÇÕES SOBRE RESÍDUOS SÓLIDOS .....	10
2.1 Introdução.....	10
2.2 Definição .....	12
2.3 Classificação.....	12
2.3.1 Classificação segundo a NBR 10.004/04 .....	13
2.3.2 Classificação segundo a fonte geradora .....	14
2.3.2.1 Resíduos sólidos urbanos (RSU).....	14
2.3.2.2 Resíduos sólidos industriais (RSI) .....	16
2.3.2.3 Resíduos sólidos especiais .....	16
2.4 Características dos resíduos sólidos .....	18
2.5 Gestão e gerenciamento de resíduos sólidos .....	27
2.5.1 Considerações iniciais .....	27
2.5.2 Definições.....	33
2.5.3 Arranjos institucionais para gestão de resíduos sólidos.....	38
2.5.4 Instrumentos legais para gestão de resíduos sólidos .....	40
2.5.5 Mecanismos de financiamento para gestão de resíduos sólidos .....	41
2.6 Etapas operacionais do gerenciamento dos resíduos sólidos .....	42
2.7 Considerações finais.....	46
3. CONSIDERAÇÕES SOBRE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	48
3.1 Considerações iniciais .....	48
3.2 Definição, classificação, geração e composição dos resíduos da construção civil.....	51
3.3 Gestão e gerenciamento dos resíduos da construção civil .....	58

3.3.1 Coleta e transporte dos resíduos da construção civil.....	62
3.3.2 Tratamento e disposição final dos resíduos da construção civil .....	63
3.4 Considerações sobre a reciclagem dos resíduos de construção e demolição .....	63
3.4.1 Classificação dos agregados reciclados de resíduo de construção e demolição .....	71
3.4.2 Considerações sobre a produção dos agregados reciclados de resíduo de construção e demolição .....	75
3.4.3 Considerações sobre os agregados reciclados de concreto .....	76
3.4.4 Características dos agregados reciclados dos resíduos da construção civil.....	79
3.4.4.1 Quanto à porosidade e à absorção de água.....	79
3.4.4.2 Quanto à massa unitária e à massa específica.....	82
3.4.4.3 Quanto a outras características.....	84
3.5 Considerações finais.....	84
4 CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO COM AGREGADOS RECICLADOS .....	86
4.1 Propriedades do concreto .....	86
4.1.1 Massa específica.....	86
4.1.2 Trabalhabilidade.....	88
4.1.3 Porosidade, absorção de água, permeabilidade e volume de vazios ..	89
4.1.4 Resistência à compressão .....	92
4.1.5 Módulo de deformação .....	99
4.1.6 Resistência à tração .....	102
4.1.7 Resistência à abrasão.....	103
4.1.8 Retração por secagem .....	104
4.1.9 Resistência ao fogo .....	108
4.1.10 Profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos .....	109
4.1.11 Outras propriedades .....	112
4.2 Modelagem de propriedades do concreto com agregados reciclados .....	113
4.3 Considerações finais.....	114
5 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS .....	118
5.1 Projeto de Experimentos .....	118
5.2 Caracterização dos materiais.....	122
5.2.1 Cimento .....	123

5.2.2 Agregados.....	124
5.2.2.1 Difração de Raio X - DRX.....	127
5.2.2.2 Granulometria.....	129
5.2.2.3 Absorção de água.....	132
5.2.2.4 Massa específica.....	134
5.2.2.5 Massa unitária.....	135
5.2.3 Água.....	138
5.2.4 Aditivo.....	138
5.3 Confeção dos concretos.....	138
5.4 Ensaio realizado no concreto endurecido.....	141
5.4.1 Resistência à compressão.....	141
5.4.2 Módulo de deformação.....	142
5.4.3 Retração por secagem.....	143
6 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	148
6.1 Apresentação dos resultados.....	148
6.2 Análise e discussão dos resultados.....	150
6.2.1 Resistência à compressão.....	152
6.2.2 Módulo de deformação.....	158
6.2.3 Correlação entre a resistência à compressão e o módulo de deformação.....	166
6.2.4 Retração por secagem.....	168
6.3 Validação dos modelos obtidos.....	174
6.3.1 Resistência à compressão.....	175
6.3.2 Módulo de deformação.....	177
6.4 Simulação do uso dos agregados reciclados de RCD de algumas cidades brasileiras na fabricação de concretos.....	179
6.5 Comparação de custos de concretos de mesma resistência à compressão produzidos com agregados naturais e com agregados reciclados.....	184
7 CLASSIFICAÇÃO DOS CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS QUANTO À DURABILIDADE, CONSIDERANDO O VOLUME DE POROS PERMEÁVEIS (VPP).....	188
7.1 Considerações iniciais.....	188
7.2 Procedimento experimental.....	191
7.3 Resultados.....	193

7.3.1 Apresentação .....	193
7.3.2 Análise e discussão .....	194
7.3.3 Classificação dos concretos com agregados reciclados quanto à durabilidade.....	196
7.4 Considerações finais.....	199
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	202
8.1 Conclusões .....	202
8.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	206
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	209
ANEXOS .....	228
ANEXO A – LEGISLAÇÃO AMBIENTAL BRASILEIRA SOBRE RESÍDUOS SÓLIDOS .....	229
ANEXO B - ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO .....	232
ANEXO C – TRAÇOS DE CONCRETOS PRODUZIDOS.....	236
ANEXO D – PROCEDIMENTO PARA REALIZAÇÃO DA LEITURA DA RETRAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA.....	240
ANEXO E – RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	241
ANEXO F – RESULTADOS DO ENSAIO DE MÓDULO DE DEFORMAÇÃO.....	244
ANEXO G – RESULTADOS DO ENSAIO DE RETRAÇÃO POR SECAGEM .....	245
ANEXO H – RESULTADOS DAS ANÁLISES DE REGRESSÃO MÚLTIPLA .....	248

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Esquema de classificação dos resíduos sólidos segundo a fonte geradora...	18
Figura 2.2	Modelo de gerenciamento ambiental dos resíduos (CETESB, 2005a).....	30
Figura 2.3	Esquema das etapas operacionais do gerenciamento dos resíduos sólidos domiciliares (adaptado de SCHALCH, 2002) .....	44
Figura 2.4	Esquema das etapas operacionais do gerenciamento dos resíduos sólidos de serviço de saúde (adaptado de SCHALCH, 2002 e ANDRADE, 1997) .....	45
Figura 2.5	Esquema das etapas operacionais do gerenciamento dos resíduos sólidos industriais (SCHALCH, 2002).....	46
Figura 3.1	Fluxograma da gestão integrada do RCD (NETO, 2005).....	61
Figura 3.2	Zonas de transição do agregado reciclado de concreto .....	77
Figura 5.1	Projeto composto contendo projeto fatorial fracionado, os vértices da estrela e os pontos centrais .....	120
Figura 5.2	Britador de mandíbulas (a) e moinho de rolos (b) utilizados .....	125
Figura 5.3	Peneirador utilizado para separar o agregado miúdo do gráudo.....	125
Figura 5.4	Aspectos dos agregados reciclados e naturais .....	126
Figura 5.5	Difratograma dos agregados miúdo e gráudo reciclados de concreto .....	128
Figura 5.6	Difratograma dos agregados miúdo e gráudo reciclados de argamassa .....	128
Figura 5.7	Difratograma dos agregados miúdo e gráudo reciclados de cerâmica vermelha.....	129
Figura 5.8	Curva granulométrica dos agregados miúdos antes do enquadramento nos limites da Zona 3 da NBR 7.211 .....	130
Figura 5.9	Curva granulométrica dos agregados miúdos após o enquadramento nos limites da Zona 3 da NBR 7.211 .....	131
Figura 5.10	Curvas granulométricas dos agregados gráudos antes da aproximação granulométrica do agregado reciclado de argamassa.....	131
Figura 5.11	Curvas granulométricas dos agregados gráudos depois da aproximação granulométrica do agregado reciclado de argamassa.....	132
Figura 5.12	Absorção de água dos agregados miúdos e gráudos utilizados .....	132
Figura 5.13	Curvas de absorção de água dos agregados reciclados.....	134
Figura 5.14	Massa específica dos agregados miúdos e gráudos .....	134
Figura 5.15	Massas unitárias dos agregados reciclados e naturais obtidos pela recomendação da norma NM 45/02 .....	136

Figura 5.16	Massa unitária dos agregados reciclados e naturais após a parametrização .....	137
Figura 5.17	Diagrama de dosagem dos concretos utilizados .....	139
Figura 5.18	Aparato utilizado para se obter as deformações dos corpos-de-prova dos traços de concreto (LVDT) .....	142
Figura 5.19	Fôrma de madeira utilizada na confecção dos corpos-de-prova.....	143
Figura 5.20	a) Base metálica de área igual à seção transversal do corpo-de-prova onde era rosqueado um pino de aço inoxidável; b) Colocação das bases metálicas com os pinos na fôrma; c) Preenchimento da fôrma com o concreto produzido .....	144
Figura 5.21	Desrosqueamento das bases metálicas .....	145
Figura 5.22	Aparato utilizado para realização das leituras de retração dos corpos-de-prova.....	145
Figura 6.1	Comportamento médio das retrações por secagem para cada traço de concreto do projeto de experimentos .....	148
Figura 6.2	Comportamento da resistência à compressão em função dos teores de substituição do agregado natural pelo reciclado para a relação água/cimento igual a 0,46.....	154
Figura 6.3	Comportamento da resistência à compressão em função dos teores de substituição do agregado natural pelo reciclado para a relação água/cimento igual a 0,60.....	154
Figura 6.4	Comportamento da resistência à compressão em função dos teores de substituição do agregado natural pelo reciclado para a relação água/cimento igual a 0,74.....	155
Figura 6.5	Comportamento do módulo de deformação em função dos teores de substituição do agregado natural pelo reciclado para a relação água/cimento igual a 0,46.....	161
Figura 6.6	Comportamento do módulo de deformação em função dos teores de substituição do agregado natural pelo reciclado para a relação água/cimento igual a 0,60.....	162
Figura 6.7	Comportamento do módulo de deformação em função dos teores de substituição do agregado natural pelo reciclado para a relação água/cimento igual a 0,74.....	162

Figura 6.8	Correlação entre a resistência à compressão e o módulo de deformação dos concretos com agregados reciclados e naturais.....	167
Figura 6.9	Comportamento da retração por secagem em função dos teores de substituição do agregado natural pelo reciclado para a relação água/cimento igual a 0,46.....	170
Figura 6.10	Comportamento da retração por secagem em função dos teores de substituição do agregado natural pelo reciclado para a relação água/cimento igual a 0,60.....	170
Figura 6.11	Comportamento da retração por secagem em função dos teores de substituição do agregado natural pelo reciclado para a relação água/cimento igual a 0,74.....	171
Figura 6.12	Comparação entre as resistências à compressão obtidas pelos autores e as obtidas pelo modelo proposto. ....	177
Figura 6.13	Comparação entre os módulos de deformação obtidos pelos autores e os obtidos pelo modelo proposto. ....	179
Figura 6.14	Resistência à compressão dos concretos feitos com agregados reciclados de RCD de algumas cidades brasileiras.....	181
Figura 6.15	Módulo de deformação dos concretos feitos com agregados reciclados de RCD de algumas cidades brasileiras.....	181
Figura 6.16	Retração por secagem aos 224 dias dos concretos feitos com agregados reciclados de RCD de algumas cidades brasileiras.....	182
Figura 7.1	Corpos-de-prova submersos em água.....	192
Figura 7.2	Determinação da massa aparente dos corpos-de-prova submersos em água.....	192
Figura 7.3	Volume de poros permeáveis dos concretos produzidos.....	193
Figura 7.4	Comportamento do volume de poros permeáveis em função da relação água/cimento e dos teores de substituição do agregado natural pelo reciclado.....	194



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Taxa de geração média anual por habitante dos RS domiciliares do mundo .....	21
Tabela 2.2 Composição gravimétrica do RS domiciliar dos países de baixa, média e alta rendas da Ásia e projeções para o ano de 2025, em % (HOORNWEG, 2000) .....	22
Tabela 2.3 Composição gravimétrica do RS domiciliar em alguns países, em %.....	23
Tabela 2.3 Composição gravimétrica do RS domiciliar em alguns países, em % - continuação. ....	23
Tabela 2.4 Gerenciamento dos resíduos sólidos em algum países do mundo. ....	33
Tabela 2.5 Estrutura do Modelo de Gestão de Resíduos Sólidos em algum países do mundo.....	34
Tabela 2.5 Estrutura do Modelo de Gestão de Resíduos Sólidos em algum países do mundo – continuação .....	35
Tabela 3.1 Quantidade de RCD coletado e reciclado na União Européia, Estados Unidos e Kuwait (ETNRC, 1999; HANSEN, 1992; KARTAM et al., 2004). .....	54
Tabela 3.2 Dados sobre RCD de diversas cidades brasileiras .....	55
Tabela 3.3 Composição do RCD de diversas cidades brasileiras .....	57
Tabela 3.4 Classificação dos agregados reciclados conforme os requisitos de qualidade propostos pelo BCSJ (1977), citado por HANSEN (1992). ....	72
Tabela 3.5 Categorias de acordo com os constituintes dos agregados graúdos reciclados (BCSJ, 1977, citado por HANSEN, 1992).....	72
Tabela 3.6 Classificação dos agregados reciclados proposta pelo Ministério da Construção do Japão (KAWANO, 2000).....	73
Tabela 3.7 Categorias de acordo com os constituintes dos agregados graúdos reciclados (LAY, 2006).....	74
Tabela 3.8 Constituintes dos agregados graúdos reciclados (LAY, 2006). ....	74
Tabela 4.1 Volume percentual de impurezas que reduzem a resistência à compressão em 15% quando comparados com os concretos de referência (HANSEN, 1986) .....	99
Tabela 4.2 Modelos que descrevem o comportamento da resistência à compressão e do módulo de deformação do concreto com agregados reciclados.....	114

Tabela 5.1 Traços de concreto definidos realizando o fracionamento do experimento .....	121
Tabela 5.1 Traços de concreto definidos realizando o fracionamento do experimento – continuação .....	122
Tabela 5.2 Ensaios realizados no procedimento experimental e seus respectivos métodos de ensaio .....	123
Tabela 5.3 Características químicas do cimento (fornecido pelo fabricante) .....	123
Tabela 5.3 Características químicas do cimento (fornecido pelo fabricante) – continuação .....	124
Tabela 5.4 Características físicas e mecânicas do cimento (fornecido pelo fabricante) .....	124
Tabela 5.5 Parametrização da massa unitária dos agregados.....	136
Tabela 6.1 Maior valor para a resistência à compressão e para o módulo de deformação dos concretos definidos no projeto de experimentos .....	149
Tabela 6.1 Maior valor para a resistência à compressão e para o módulo de deformação dos concretos definidos no projeto de experimentos – continuação .....	150
Tabela 6.2 Simbologia das variáveis independentes e das variáveis de resposta utilizadas nos modelos .....	150
Tabela 6.2 Simbologia das variáveis independentes e das variáveis de resposta utilizadas nos modelos – continuação .....	151
Tabela 6.3 Desempenho da resistência à compressão dos concretos quando feita a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado.....	155
Tabela 6.4 Desempenho do módulo de deformação dos concretos quando feito a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado.....	162
Tabela 6.5 Equações que correlacionam o módulo de deformação com a resistência à compressão dos concretos com agregados reciclados.....	168
Tabela 6.6 Desempenho da retração por secagem dos concretos quando feito a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado para a idade de 224 dias .....	171
Tabela 6.7 Coeficientes de correção das propriedades do concreto produzido com agregados reciclados (RILEM, 1994) .....	174
Tabela 6.8 Composição dos concretos, coeficiente de determinação e diferenças significativas entre as resistências à compressão modeladas e as resistências reais .....	176

Tabela 6.9	Composição dos concretos, coeficiente de determinação e diferenças significativas entre os módulos de deformação modelados e os módulos reais .....	178
Tabela 6.10	Novas proporções dos constituintes do RCD das cidades em estudo após redistribuição.....	180
Tabela 6.11	Relação água/cimento e custo dos concretos de 35 MPa.....	184
Tabela 7.1	Classificação do concreto quanto à durabilidade baseado no VPP de corpos-de-prova, aos 28 dias, compactados com soquete e curados em câmara úmida ou submersos em água saturada com cal.....	190
Tabela 7.2	Classificação do concreto quanto à durabilidade baseado no VPP de corpos-de-prova, aos 28 dias, compactados através de vibração e curados em câmara úmida ou submersos em água saturada com cal.....	190
Tabela 7.3	Classificação do concreto quanto à durabilidade baseado no VPP de corpos-de-prova extraídos aos 28 dias de estruturas.....	190
Tabela 7.4	Determinação do VPP correspondente para 28 dias de idade de concretos antigos .....	191
Tabela 7.5	Desempenho dos concretos com relação ao VPP quando feito a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado e quando se varia a relação a/c .....	194
Tabela 7.6	Valores de VPP ajustados para os diversos tipos de concretos com agregados reciclados, em %.....	197
Tabela 7.7	Classificação do concreto segundo a durabilidade, de acordo com os acréscimos de VPP entre os níveis.....	198
Tabela 7.8	Valores dos acréscimos de VPP com relação ao concreto de referência de relação a/c=0,46, em %.....	198
Tabela 7.9	Classificação dos concretos quanto à durabilidade baseado nos acréscimos do VPP para com o concreto de referência de relação a/c=0,46.....	198



## RESUMO

CABRAL, A.E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. São Carlos-SP, 2007. 280p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A realização de uma eficiente gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos (RSU) é um desafio ao meio técnico-acadêmico e administrativo das grandes cidades. Os resíduos de construção e demolição (RCD) consistem em uma importante parcela dos RSU, em função do volume dos mesmos se é gerado e dos danos que estes podem trazer ao meio-ambiente. A reciclagem dos RCD tem sido uma solução adotada no gerenciamento dos mesmos, sendo em sua grande maioria voltada para a produção de agregados reciclados, em função do grande volume de agregados que são usados pela indústria da construção civil. Entretanto, a grande variabilidade apresentada na composição desses agregados é uma das barreiras na difusão do uso dos mesmos como matéria-prima alternativa na confecção de concretos. Com o intuito de contribuir nesta área de conhecimento, através dos resultados obtidos em um programa experimental baseado em um projeto fatorial fracionado composto de segunda ordem, que contempla a produção de concretos com os três principais componentes do RCD (concreto, argamassa e cerâmica vermelha), modelou-se o comportamento da resistência à compressão ( $f_c$ ), do módulo de deformação ( $E_c$ ), da retração por secagem ( $\epsilon$ ) e do volume de poros permeáveis ( $VPP$ ) dos concretos produzidos, ao se variar o teor de substituição dos agregados naturais pelos reciclados e a relação água/cimento. Os resultados indicam que com exceção da resistência à compressão para o concreto confeccionado com o agregado miúdo reciclado de cerâmica vermelha, a substituição dos agregados naturais pelos reciclados minora o desempenho dos concretos para todas as propriedades estudadas. Observou-se também que a substituição do agregado miúdo natural pelos miúdos reciclados influencia mais no desempenho dos concretos, sobre as propriedades estudadas, que a substituição dos agregados graúdos naturais pelos graúdos reciclados. Ao se validar os modelos propostos para a  $f_c$  e para o  $E_c$ , utilizando dados provenientes de outros autores, observou-se que tais modelos descrevem muito bem o comportamento das propriedades, embora não tenham produzido valores semelhantes aos publicados originalmente. Simulou-se também, utilizando os modelos propostos, o uso dos agregados reciclados de RCD de algumas cidades brasileiras na

fabricação de concretos, sendo que, de uma maneira geral, percebeu-se uma grande viabilidade no uso dos mesmos, uma vez que os concretos simulados ainda atingiram consideráveis  $f_c$  e  $E_c$ , principalmente quando se utilizou o agregado miúdo. Classificaram-se também os concretos quanto à durabilidade baseando-se nos acréscimos do *VPP* para com o concreto de referência de relação a/c=0,46, sendo que a classificação encontrada sugere que os concretos com elevados teores de substituição não possuem um bom desempenho com relação à sua durabilidade, sendo a substituição de pequenos teores dos agregados miúdos mais recomendada. De uma maneira geral, pode-se concluir que é possível utilizar agregados reciclados, considerando-se as variabilidades dos mesmos, na produção de concretos com desempenho mecânico e durabilidade satisfatórios, dentro das condições estudadas.

Palavras-chave: resíduos sólidos, RCD, reciclagem, agregados reciclados, concreto com agregados reciclados, modelagem, propriedades mecânicas, durabilidade.

## ABSTRACT

CABRAL, A. .E. B. **Mechanical properties and durability modeling of recycled aggregates concrete, considering the construction and demolition waste variability.** São Carlos-SP, 2007. 280p. Thesis (Doctoral). School of Engineering at São Carlos, University of São Paulo.

An efficient solid waste management is a challenge to the technician-academic and administrative sectors of great cities. Construction and demolition (C&D) wastes are an important portion of solid wastes, due to their great volume and to the damages that they can bring to the environment. Recycle C&D wastes has been adopted as a management solution and the production of recycled aggregates has been a practice quite used, in function of the great volume of aggregates that have been used by the construction industry. However, the great variability presented in the composition of those aggregates is one barrier to diffuse the use of them as an alternative material to make concrete. Intending to contribute in this knowledge area, an experimental program based on a fractional factorial project was done. It consisted in produce concretes with the three main components of C&D waste (concrete, mortar and red ceramic) as recycled aggregates, varying the percentage of substitution of natural aggregates by recycled aggregates and the water/cement ratio. Strength ( $f_c$ ), modulus of elasticity ( $E_c$ ), shrinkage ( $\epsilon$ ) and volume of permeable voids ( $VPP$ ) of concretes were measured and the results were modeled using statistical tools. The results indicated that except the  $f_c$  for concrete made with recycled red ceramic fine aggregate, the recycled aggregates lessens the concrete's behavior for all studied properties. It was also observed that the natural fine aggregate's substitution by recycled fine aggregates influences less in the concrete's behavior than the coarse aggregate's substitution, for all studied properties. To validate the proposed models, using other authors' data, it was observed that such models describe the properties behavior very well, although such models don't produce properties values similar to the values published by the authors. It was also simulated, through the proposed models, the use of the recycled aggregates of C&D waste from some Brazilian cities in concrete production and, in a general way, it was noticed a great viability in the use of the same ones, once the simulated concretes still reached considerable  $f_c$  and  $E_c$ , mainly when the recycled fine aggregates was used. The recycled concrete's durability was also determined using the VPP increments in relation to a 0.46 water/cement ratio reference concrete. This classification suggests that the

concretes with high tenors of substitution don't have a good behavior, being small tenors of substitution of fine aggregates more recommended. In general, it can be concluded that it is possible to use recycled aggregates, considering their variability, to produce concretes with satisfactory mechanical behavior and durability, considering the studied conditions.

Keywords: solid wastes, C&D waste, recycling, recycled aggregates, recycled aggregate concrete, modeling, mechanical properties, durability.

## **CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

1.1 Introdução

1.2 Justificativa

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

1.3.2 Objetivos específicos

# 1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

## 1.1 Introdução

O modelo de desenvolvimento tradicionalmente adotado mundialmente converge para políticas de extrativismo dos recursos naturais sem a inserção equitativa de benefícios sociais e econômicos para o ser humano, sendo este chamado de desenvolvimento explorador.

Faz-se necessário, portanto, que um novo modelo de desenvolvimento seja adotado, para que as gerações humanas futuras possam desfrutar dos benefícios dispostos pela natureza. Esse modelo de desenvolvimento vem sendo chamado de desenvolvimento sustentável.

A filosofia do desenvolvimento sustentável é baseada na conservação ambiental, ou seja, admite-se o aproveitamento controlado dos bens e recursos que constituem o ecossistema, em extensão e ritmo tais que permitam sua recomposição, de forma induzida ou inteiramente natural. Essa filosofia difere da preservação ambiental, na qual se adota o critério da intocabilidade da natureza e do ecossistema pelo homem, acreditando-se que, uma vez rompido o equilíbrio preexistente do ecossistema, este não mais se recomporá. O desenvolvimento sustentável propõe-se então a atender às necessidades da atual geração sem comprometer o direito das futuras gerações atenderem às suas próprias necessidades (VALLE, 2004).

As ações para se alcançar a sustentabilidade na sociedade devem abranger desde a escala individual, onde cada indivíduo faz o seu papel contribuindo da sua forma ao crescimento sustentável, até a escala mundial, mediante debates, encontros, acordos entre organizações, sejam participantes do governo ou não, com o intuito de contribuir para o crescimento sustentável (NETO, 2005). Então, dentro desse conjunto de ações, a indústria da construção civil deve fazer a sua parte, ou seja, buscar a construção sustentável.

Segundo VÁZQUEZ (2001), a construção sustentável está baseada na prevenção e redução dos resíduos através do desenvolvimento de tecnologias limpas, no uso de

materiais recicláveis, reutilizáveis ou sub-produtos, até a coleta e disposição final dos inertes inservíveis.

Com relação à reutilização ou ao reaproveitamento dos resíduos gerados pelos processos transformadores, ou seja, reencaixá-los na cadeia produtiva como subprodutos, os quais teriam aplicabilidade em outro processo, atualmente a Indústria da Construção Civil é a maior responsável pela reciclagem no Brasil e na maioria dos países (JOHN, 2001). Isto porque ela utiliza grande quantidade de insumos que contém sub-produtos, sejam dela ou de outros processos. Como exemplo, pode-se citar a incorporação de escórias de alto forno e produtos pozolânicos na fabricação dos cimentos convencionalmente comercializados, substituindo o clínquer (matéria-prima) em proporções de até 75%. Ainda sobre a indústria cimenteira, algumas utilizam pneus como combustível dos fornos de calcinação da argila.

Entretanto, a própria indústria da construção civil é responsável pela geração de grande quantidade de resíduos, estes também chamados de resíduos de construção e demolição (RCD), no montante de algo em torno de 40% dos resíduos sólidos gerados na economia (JONH, 2001; TERRY, 2004), sendo que a deposição desses resíduos em locais inadequados tem se tornado um grande problema para as municipalidades.

Como exemplos, em 1992, era estimada a produção de aproximadamente 50 milhões de toneladas de RCD na comunidade europeia, 60 milhões nos Estados Unidos e 12 milhões somente no Japão, sendo a grande maioria desses resíduos disposta inadequadamente, impactando de forma negativa grande parcela da população (HANSEN, 1992). Em Hong Kong, no ano de 2004, foram gerados aproximadamente 20 milhões de toneladas de RCD, dos quais 12% foram dispostos em aterros e 88% em áreas públicas. Estima-se que para essa cidade, a geração de RCD é de 4 a 5 vezes a soma dos resíduos sólidos doméstico, comercial e industrial (POON, 2007). De forma semelhante, segundo KARTAM et al. (2004), 90% dos resíduos de construção e demolição produzidos no Kuwait são dispostos inadequadamente.

## **1.2 Justificativa**

Comumente, a gestão de resíduos ocorre com os seguintes objetivos, dispostos de maneira hierárquica: reduzir a geração de resíduos da fonte, reutilizar o resíduo como ele é disposto, reciclar o resíduo, incinerar o resíduo, recuperando a energia ou depositá-lo em aterros (LEACH et al., 1997; SAKAI et al., 1996; MAGRINHO et al., 2006).

Entretanto, a gestão age de maneira corretiva, depositando geralmente a grande maioria desses resíduos em aterros, sem nenhum tratamento prévio. O aumento dos custos do processo de tratamento e depósito desses resíduos, as pressões pela preservação ambiental, o crescimento constante do volume de resíduos a ser depositado com possibilidade de esses estarem contaminados e produzirem danos ao meio-ambiente são fatores que forçam uma solução mais sustentável para o problema. Deve-se fazer um esforço, para que haja uma redução dos resíduos na fonte, junto às empresas que constroem, pois a melhor maneira de administrá-los é fazer com que não existam.

O depósito irregular dos resíduos da construção civil é um problema que aflige as autoridades e atinge as populações não somente no Brasil, mas também em outros países do mundo. Tal deposição afeta diretamente o meio ambiente, sendo co-responsável com outros fatores por enchentes, em virtude do assoreamento do leito dos córregos, por danos à paisagem, obstrução de vias de tráfego, proliferação de doenças, dentre outros prejuízos à saúde e à vida humana (JOHN, 2000).

Muitos depósitos de resíduos da construção civil sofrem o problema da geração do gás sulfídrico ( $H_2S$ ), o qual tem sido identificado como o principal componente do gás que é emitido pelos aterros de inertes, sendo este resultado da decomposição do gesso utilizado na construção civil. Em adição aos problemas de maus odores gerados pelo  $H_2S$ , tem-se descoberto que este provoca muitos efeitos adversos para a saúde humana (EUN et al., 2007).

Em adição, a superexploração das jazidas minerais, de onde se extraem os agregados (recursos naturais não-renováveis) que se utilizam na construção civil, vem, paulatinamente, trazendo prejuízos ao meio-ambiente. Segundo SJÖSTRÖM (1996) citado por JOHN (2000), a construção civil consome entre 14% e 50% dos recursos naturais extraídos no planeta. No Brasil, JOHN (2000) estima que há um consumo anual de 210 milhões de toneladas de agregados somente para produção de argamassas e concretos, devendo, ainda, somar-se o volume utilizado em pavimentações e as perdas. No Reino Unido, no ano de 1992, foram consumidos aproximadamente 240 milhões de toneladas de agregados, sendo a grande maioria obtida por meio de dragagem ou extração em pedreiras (KHALAF e DeVENNY, 2004).

Uma solução, que a cada dia ganha força dentre os pesquisadores do assunto, é a reciclagem do RCD e sua reutilização na própria construção civil como matéria-prima alternativa. Há uma escassez crítica de agregados naturais para a produção de concreto em muitas áreas urbanas, quando ao mesmo tempo, o aumento das quantidades de RCD

gerados nessas mesmas áreas também é considerável (HANSEN e BØEGH, 1985; LAMOND et al., 2002).

Há também a carência de locais para a deposição desses resíduos, fazendo com que as distâncias entre os locais de demolição e as áreas de disposição sejam cada vez maiores, onerando os custos de transporte. Portanto, com a reciclagem, outra fonte de matéria-prima é utilizada, além de se propiciar uma redução na disposição e no volume final dos resíduos a serem dispostos (LAMOND et al., 2002; SANI et al., 2005)

Como resultado de algumas pesquisas, já se sabe que a reciclagem do RCD pode ser aplicada para diversos fins, tais como: serviços de pavimentação, na fabricação de argamassas de assentamento e revestimento, na fabricação de concretos, pré-moldados (blocos, meio-fio, dentre outros). Há países onde o reciclado de RCD é aplicado na fabricação de concretos estruturais (HANSEN, 1992; LIMA, 1999; CARNEIRO et al., 2001; MIRANDA, 2000). Um exemplo vem da Alemanha, onde através de pesquisas, já se demonstrou a viabilidade do uso do concreto com agregado reciclado em funções estruturais, já se tendo inclusive normas reguladoras para o uso do mesmo (DIN 4226-100 e DIN 1045-2) (WEIL et al., 2006). XIAO et al. (2006) também afirmam que é possível o uso do concreto com agregados reciclados na execução de estruturas na engenharia civil.

LAURITZEN (1998) descreve as condições de mercado em que a reciclagem do RCD pode ser lucrativa em função de alguns parâmetros geográficos. De forma geral, as grandes cidades dos países em desenvolvimento, com altas populações e indisponibilidade de recursos naturais, apresentam um bom potencial de reciclagem lucrativa, especialmente quando os agregados naturais tornarem-se mais escassos.

Os dados de PINTO (1999) de algumas cidades brasileiras, tais como São Paulo, Belo Horizonte, Ribeirão Preto, Santo André, Salvador e São José do Rio Preto, vêm a confirmar a afirmação anterior, uma vez que segundo este autor, caso se considere o custo dos componentes necessários para as instalações de uma usina de reciclagem de RCD, dentre os quais pode-se citar o custo de manutenção e reposição, provisão de água e luz, custo de mão-de-obra, juros, amortizações, equipamentos para manejo interno, dentre outros, ainda assim o custo do agregado reciclado será mais barato que o custo do agregado natural.

Caso o investimento seja feito pelo setor público, ter-se-ia uma amortização entre 1 e 2 anos dos custos empregados em usinas de reciclagem de RCD, uma vez que haveria a eliminação dos custos com limpeza urbana do RCD e com a aquisição de

agregados naturais, pois esses seriam substituídos pelos agregados reciclados produzidos pela usina. Dados da usina de reciclagem Estoril, em Belo Horizonte, apontam que os investimentos realizados haviam sido amortizados apenas nos primeiros 6,3 meses de funcionamento, considerando-se somente a substituição de agregados naturais por reciclados e a eliminação do processo de limpeza urbana. Similarmente, na usina de Ribeirão Preto, o resultado acumulado em 32 meses de operação apontava que o valor investido em equipamentos já havia sido amortizado 2,5 vezes (PINTO, 1999).

Fora a viabilidade financeira, tem-se ainda um “ganho ambiental”, pois o reaproveitamento do RCD, em substituição ao agregado natural, satisfaz as necessidades do construtor em adquirir matéria-prima para produção de suas benfeitorias, sem comprometer a capacidade das futuras gerações humanas em satisfazer suas próprias necessidades, pois tal processo auxilia na possibilidade de preservação dos recursos ambientais. Ou seja, com o processo de reciclagem tem-se uma aplicação direta de desenvolvimento sustentável por meio de um aperfeiçoamento dos processos produtivos da indústria da construção civil que utilizam o agregado como insumo (SOUZA, 2000).

Entretanto, existem fatores limitantes para a expansão da reutilização e da reciclagem dos RCD, tais como a variabilidade dos seus constituintes, e conseqüentemente das suas características, a possível contaminação do RCD por agentes deletérios, que podem vir a minorar o desempenho mecânico e de durabilidade dos concretos confeccionados com os reciclados, além do receio em se utilizar matéria-prima reciclada. É necessário, portanto, assegurar que os produtos gerados com os reciclados de RCD tenham um desempenho satisfatório.

Para inserir o conceito de sustentabilidade em setores da economia mais tradicionais, tal como o da indústria da construção civil, se requer que certos paradigmas de desenvolvimento sejam quebrados e as questões ambientais sejam contempladas já nos primeiros passos do planejamento de seus bens de consumo. Este é um desafio que o meio acadêmico deve tomar pra si, buscando alternativas que satisfaçam aos anseios tanto dos produtores, que querem que seus produtos mantenham a qualidade e continuem satisfazendo seus clientes, quanto da sociedade que deseja uma solução para a degradação continuada dos recursos naturais.

### 1.3 Objetivos

#### 1.3.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem como objetivo geral demonstrar a possibilidade do uso dos agregados reciclados de RCD, considerando as suas variabilidades, na produção de concretos com desempenho mecânico e durabilidade aceitáveis.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

Para se alcançar o objetivo geral, é necessário alcançar os seguintes objetivos específicos:

- caracterizar os principais componentes representativos presentes em quaisquer resíduo de construção e demolição;
- modelar o comportamento de duas propriedades mecânicas (resistência à compressão e módulo de deformação, ambos aos 28 dias de idade) dos concretos produzidos com agregados reciclados, quando se substitui os agregados graúdos e miúdos naturais pelos reciclados de RCD e se varia a relação água/cimento;
- modelar o comportamento de duas propriedades de durabilidade (retração por secagem aos 224 dias e o volume de poros permeáveis aos 15 meses) dos concretos produzidos com agregados reciclados, quando se substitui os agregados graúdos e miúdos naturais pelos reciclados de RCD e se varia a relação água/cimento;
- classificar os concretos com agregados reciclados com relação à sua durabilidade, utilizando os valores obtidos para os volumes de poros permeáveis (VPP).



## **CAPÍTULO 2 – CONSIDERAÇÕES SOBRE RESÍDUOS SÓLIDOS**

2.1 Introdução

2.2 Definição

2.3 Classificação

2.3.1 Classificação segundo a NBR 10.004/04

2.3.2 Classificação segundo a fonte geradora

2.3.2.1 Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)

2.3.2.2 Resíduos Sólidos Industriais (RSI)

2.3.2.3 Resíduos Sólidos Especiais

2.4 Características dos Resíduos Sólidos

2.5 Gestão e Gerenciamento de Resíduos Sólidos

2.5.1 Considerações iniciais

2.5.2 Definições

2.5.3 Arranjos institucionais para gestão de resíduos sólidos

2.5.4 Instrumentos legais para gestão de resíduos sólidos

2.5.5 Mecanismos de financiamento para gestão de resíduos sólidos

2.6 Etapas operacionais do gerenciamento dos resíduos sólidos

2.7 Considerações finais

## **2. CONSIDERAÇÕES SOBRE RESÍDUOS SÓLIDOS**

### **2.1 Introdução**

Com o aumento populacional no mundo, há uma constante pressão degradadora sobre os recursos naturais, seja em busca de matéria-prima para fabricação de produtos manufaturados ou industriais, ou em busca de espaço físico para prover moradia (conjuntos habitacionais, condomínios, etc) e toda a infra-estrutura necessária para habitá-la dignamente (vias de acesso, alternativas para se dispor de água e suprimir de maneira adequada os resíduos sólidos e líquidos, dentre outros) ou ainda substituindo áreas de vegetação natural por terras cultiváveis.

Todos esses processos de intervenção do Homem no Meio Ambiente não são desempenhados de maneira que não gerem resíduos, ou seja, todos geram sobras, restos, e como a quantidade de processos interventores é expressiva, a quantidade e o volume gerado desses resíduos é algo imponente, sendo a destinação final dos mesmos, uma das maiores preocupações mundiais atualmente.

Dentre todos os tipos de resíduos, os resíduos sólidos (RS) merecem destaque, uma vez que representam uma substancial parcela dentre todos os resíduos gerados, e quando mal gerenciados, tornam-se um problema sanitário, ambiental e social. O conhecimento das fontes e dos tipos de resíduos sólidos, através de dados da sua composição e da sua taxa de geração, é o instrumento básico para o gerenciamento dos mesmos (KGATHI e BOLAANE, 2001).

Entretanto, a composição e a taxa de geração dos resíduos sólidos é função de uma série de variáveis, dentre elas, a condição sócio-econômica da população, o grau de industrialização da região, a sua localização geográfica, as fontes de energia e o clima. Geralmente, quanto maior o poder econômico e maior a porcentagem urbana da população, maior a quantidade de resíduos sólidos produzidos e quanto menor a renda da população, maior o percentual de matéria orgânica na composição dos resíduos (HOORNWEG, 2000).

Exemplificando, países considerados emergentes, como o Brasil, Turquia e Botsuana, que possuem uma renda *per capita* da ordem de US\$4.630, US\$3.160 e US\$3.260 (WORLD BANK, 2000), respectivamente, produzem 57,4% (ABRELPE, 2006), 69% (METIN et al., 2003) e 93% (KGATHI e BALAANE, 2001) de matéria orgânica em seus resíduos sólidos, respectivamente, enquanto que países tidos como desenvolvidos, como Estados Unidos e Japão, possuindo uma renda *per capita* da ordem de US\$29.240 e US\$32.350 (WORLD BANK, 2000), respectivamente, produzem 23,8% (EPA, 2003) e 42,3% (SAKAI et al., 1996) de matéria orgânica em seus resíduos, respectivamente.

Parece que o tipo de tratamento e disposição final dado aos resíduos sólidos também é função das variáveis acima citadas, uma vez que no Brasil, segundo dados da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2000 (IBGE, 2002), dos 5.507 municípios brasileiros pesquisados na época, 95,8% utilizam os aterros e lixões como forma de tratamento e disposição final, enquanto que os Estados Unidos e Alemanha dispõem 55,4% (EPA, 2003) e 45% (SAKAI et al., 1996), respectivamente, dos seus resíduos em aterros sanitários.

Já outros países, como Holanda, Japão e Cingapura utilizam a incineração como método preferencial de tratamento de seus resíduos, dispondo nos aterros somente as cinzas originadas no processo. Essa opção de tratamento custa de 6 a 7 vezes mais que o uso dos aterros sanitários, em função da complexidade do sistema e do custo de tratamento dos gases gerados, entretanto reduz o volume de lixo em até 90% (BAI e SUTANTO, 2002), prolongando assim a utilização dos aterros por mais tempo.

A prática de disposição dos resíduos sólidos a céu aberto, sem nenhum controle, é realizada principalmente em países em desenvolvimento, tais como Quênia, Índia, Brasil, México e Botsuana, que dispõem 100% (HENRY et al., 2006), 90% (SHARHOLY et al., 2007), 63,6% (IBGE, 2002), 44,1% (BUENROSTRO e BOCCO, 2003) e 38% (KGATHI e BALAANE, 2001), respectivamente, dos seus resíduos em lixões. Tal prática pode acarretar na contaminação do ar, do solo e da água superficial e subterrânea por agentes patológicos, propiciando ainda o crescimento de vetores transmissores de doenças, além de depreciar a paisagem natural (ESIN e COSGUN, 2007).

Sabe-se que os impactos ambientais causados pelo aterro dependem do tipo e do método de operação do mesmo e da natureza do resíduo lá depositado (DASKALOPOULOS e PROBERT, 1998), entretanto estudos comparativos entre os

diversos métodos de tratamento e disposição final utilizando Análise do Ciclo de Vida (ACV) apontam que embora os aterros apresentem um menor custo para a sua implantação, quando comparados com outros métodos de tratamento, este produz o maior impacto ambiental (DASKALOPOULOS et al., 1998; BARLAZ et al., 2003; MENDES et al., 2004; FINNVEDEN et al., 2005; MOBERG et al., 2005; ERIKSSON et al., 2005).

Nenhuma cidade estará hábil a ganhar o respeito dos seus moradores, a atrair investimentos estrangeiros sustentáveis ou a manter a prosperidade da indústria do turismo, se deixar de investir no cuidado com a saúde e no tratamento de epidemias, e isso se inicia no gerenciamento dos seus próprios resíduos.

De uma maneira geral, se faz necessário um melhor entendimento sobre o tema, buscando maneiras de gerenciamento desses resíduos que propiciem um maior alcance populacional, dando acesso à população mais carente aos serviços de coleta, transporte, tratamento e disposição final adequados aos resíduos sólidos gerados, promovendo assim uma melhor qualidade de vida.

## **2.2 Definição**

Segundo a *NBR 10.004/04 - Resíduos Sólidos - Classificação*, resíduos sólidos são definidos como “resíduos nos estados sólidos e semi-sólidos, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível”.

## **2.3 Classificação**

É importante classificar o resíduo a ser trabalhado porque em função dessa classificação será feito o equacionamento das decisões que devem ser desenvolvidas e executadas.

Na literatura, observa-se que os resíduos sólidos podem ser classificados de várias maneiras, como por exemplo, segundo a natureza física ou pelo grau de

biodegradabilidade, que transita entre alta, média e baixa degradação (BIDONE & POVINELLI, 1999), ou ainda em função composição química do resíduo, podendo identificá-lo com mais facilidade, quando dividida ou classificada a sua matéria em orgânica e inorgânica. Pode-se classificá-los também em função da sua origem, embora a classificação em função do seu grau de periculosidade também seja bastante utilizada (SAKAI et al., 1996; HARTLÉN, 1996; HOORNWEG, 2000; KGATHI e BOLAANE, 2001; BAI e SUTANTO, 2002; OJEDA-BENITEZ et al., 2003).

Entretanto, dentre todas, as que merecem destaque são as que classificam os resíduos sólidos segundo a periculosidade dos mesmos e seus impactos à saúde e ao meio ambiente e segundo a sua fonte geradora.

A primeira maneira de classificação citada é a adotada pela ABNT, e a segunda é a adotada pela maioria dos autores da área, por ser, provavelmente, mais específica e detalhada. A seguir encontram-se as duas classificações.

### 2.3.1 Classificação segundo a NBR 10.004/04

Segundo a *NBR 10.004/04 – Resíduos Sólidos – Classificação*, os resíduos sólidos são classificados em:

a) resíduos classe I – Perigosos: são aqueles que apresentam inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, ou seja, são aqueles que apresentam risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices ou riscos ao meio-ambiente, quando gerenciados de forma inadequada;

b) resíduos classe II – Não perigosos: esses resíduos subdividem-se em resíduos classe II A – Não inertes e resíduos classe II B – Inertes;

b1) resíduos classe II A – Não inertes: são aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I – Perigosos ou de resíduos classe II B – Inertes. Esses resíduos podem ter propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

b2) resíduos classe II B – Inertes: São aqueles resíduos que quando submetidos a um contato dinâmico ou estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não tenham nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Na prática, para se classificar um determinado resíduo, segundo a NBR 10.004/04, verifica-se se o resíduo a ser classificado encontra-se entre os constantes nos Anexos A e B desta mesma norma. Em caso positivo, esse resíduo é considerado resíduo classe I – Perigoso. Em caso negativo, então retira-se uma amostra representativa dele, conforme *NBR 10.007/04 – Amostragem de resíduos sólidos* e procede-se a obtenção de extratos lixiviados e solubilizados do mesmo, conforme procedimentos descritos nas NBR 10.005/04 e NBR 10.006/04, respectivamente. De posse dos resultados dessas análises, compara-se os parâmetros encontrados com os que se encontram nos Anexos C a G da NBR 10.004/04 e assim, classifica-se o resíduo.

### 2.3.2 Classificação segundo a fonte geradora

Conforme SCHALCH (2002), BIDONE e POVINELLI (1999), CASTRO NETO e GUIMARÃES (2000), MARTINS (2004) e SANTOS e MARTINS (1995), pode-se classificar os resíduos sólidos, quanto à fonte geradora, em três categorias: resíduos urbanos, resíduos sólidos industriais e resíduos especiais.

#### 2.3.2.1 Resíduos sólidos urbanos (RSU)

Os resíduos sólidos urbanos implicam em resíduos resultantes das residências (domiciliar ou doméstico), resíduos de serviços de saúde, resíduos de construção civil, resíduos de poda e capina, resíduos de portos, aeroportos, terminais rodoviários e ferroviários e os resíduos de serviços, que abrangem os resíduos comerciais, os resíduos de limpeza de bocas de lobo e os resíduos de varrição, de feiras e outros. A seguir tem-se uma breve definição de cada tipo.

a) Resíduo residencial: denominado também de doméstico ou domiciliar, é originado nas residências e é constituído principalmente por restos de alimentação, papéis, papelão, vidros, metais ferrosos e não ferrosos, plásticos, madeira, trapos, couros, varreduras, capinas de jardim, entre outras substâncias (SANTOS e MARTINS, 1995);

b) resíduo de serviços de saúde (RSS): proveniente de hospitais, clínicas médicas e veterinárias, laboratórios de análises clínicas, farmácias, centros de saúde, consultórios odontológicos e outros estabelecimentos afins. Conforme a forma de geração, pode ser divididos em dois níveis distintos: o resíduo comum, que compreende os restos de alimentos, papéis, invólucros, dentre outros, e o resíduo séptico, constituído

de resíduos advindos das salas de cirurgias, centros de hemodiálise, áreas de internação, isolamento, dentre outros. Embora represente uma pequena quantidade do total de resíduos gerados na comunidade, este tipo de resíduo exige atenção especial, com um correto acondicionamento, coleta, transporte, tratamento e destinação final, devido ao potencial risco à saúde pública que pode oferecer. Entretanto, segundo a Associação Brasileira de Engenharia Sanitária (2000), citado por DA SILVA (2005), 76% das cidades brasileiras dispõem o resíduo de serviços de saúde juntamente com o resíduo doméstico nos aterros municipais. Dos municípios que tratam esses resíduos, 43,8% os incineram, 31,3% usam autoclave, 9,3% usam microondas e 6,3% os queimam a céu aberto (ABRELPE, 2006). No Brasil, os RSS possuem legislação própria para o seu manuseio, através da Resolução CONAMA N°5 que atribui responsabilidades específicas para os vários setores envolvidos: geradores, autoridades ambientais e sanitárias. Assim como os demais tipos de resíduos sólidos, a taxa de geração do resíduo de serviço de saúde também depende de vários fatores como o tipo da unidade de saúde, a capacidade, o nível de instrumentação e a localização da mesma. Entretanto, segundo estimativas de MONREAL (1993), citado por DA SILVA (2005), a média de produção desse tipo de resíduo pelos hospitais brasileiros é de 2,63 kg/leito.dia ou 70 a 120 gramas/hab.dia (ABRELPE, 2006);

c) resíduo da construção civil ou resíduos de construção e demolição (RCD): denominado de entulho, são rejeitos provenientes de construções, reformas, demolições de obras de construção civil, restos de obras e os da preparação e da escavação de terrenos e outros. Em termos de quantidade, esse resíduo corresponde a algo em torno de 50% dos resíduos sólidos urbanos produzidos nas cidades brasileiras e do mundo com mais de 500 mil habitantes. (PINTO, 1999; FREITAS et al., 2003; SARDÁ e ROCHA, 2003). Como este tipo de resíduo é o objeto de estudo desta pesquisa, o mesmo será abordado de maneira mais profunda no terceiro capítulo;

d) poda e capina: são produzidos esporadicamente e em quantidade variada. Como exemplos têm-se a folhagem de limpeza de jardins, os restos de poda, dentre outros;

e) resíduo de portos, aeroportos, terminais rodoviários e ferroviários: constituem os resíduos sépticos, que podem conter organismos patogênicos nos materiais de higiene e de uso pessoal, em restos de alimentos, dentre outros, provenientes de locais de grande transição de pessoas e mercadorias;

f) resíduo de serviço comercial: abrange os resíduos resultantes dos diversos estabelecimentos comerciais, tais como escritórios, lojas, hotéis, restaurantes, supermercados, quitandas, dentre outros. No Reino Unido, este tipo de resíduo corresponde a 13% do total dos RSU (BURNLEY et al., 2007);

g) resíduo de varrição, feiras e outros: abrangem os resíduos advindos da limpeza pública urbana, ou seja, são resultantes da varrição regular de ruas, da limpeza e a conservação de galerias, limpeza de feiras, de bocas de lobo, dos terrenos, dos córregos, das praias e feiras, dentre outros.

#### 2.3.2.2 Resíduos sólidos industriais (RSI)

Os resíduos sólidos industriais abrangem os resíduos das indústrias de transformação, os resíduos radiativos e os resíduos agrícolas, descritos a seguir:

a) resíduos das indústrias de transformação: são os resíduos provenientes de diversos tipos e portes de indústrias de processamentos. São muito variados e apresentam características diversificadas, pois dependem do tipo de produto manufaturado devendo, portanto, serem estudados caso a caso;

b) resíduos radioativos (lixo atômico): são os resíduos que emitem radiações acima dos limites permitidos pelas normas brasileiras, geralmente originados dos combustíveis nucleares, que de acordo com legislação que os especificam, são de competência exclusiva da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN);

c) resíduos agrícolas: são os gerados das atividades da agricultura ou da pecuária, como as embalagens de adubos, defensivos agrícolas, ração, restos de colheita e esterco animal. As embalagens de agro-químicos, por conterem um alto grau de toxicidade, estão subordinadas a uma legislação específica.

#### 2.3.2.3 Resíduos sólidos especiais

Existem ainda os resíduos ditos como especiais, em função de suas características diferenciadas, nos quais se inserem os pneus, as pilhas e baterias e as lâmpadas fluorescentes.

a) Pneus: são graves os problemas ambientais causados pela destinação inadequada dos pneus usados, pois se deixados em ambientes abertos, sujeitos a chuvas, os mesmos podem acumular água e tornarem-se locais propícios para proliferação de mosquitos vetores de doenças. Caso sejam encaminhados para os aterros convencionais, podem desestabilizar o aterro, em função dos vazios que provocam na massa de

resíduos e se forem incinerados, a queima da borracha gera enormes quantidades de materiais particulados e gases tóxicos, necessitando assim de um sistema eficiente de tratamento dos gases, que é extremamente caro. Em função dessas dificuldades, alguns países do mundo responsabilizam os produtores de pneus pelo manejo e disposição final dos mesmos (HARTLÉN, 1996). No Brasil, em 1999, o CONAMA publicou a Resolução nº 258, onde “as empresas fabricantes e as importadoras de pneumáticos ficam obrigadas a coletar e dar destinação final, ambientalmente adequada, aos pneus inservíveis existentes no território nacional”. Atualmente, parte dos pneus são queimados em fornos da indústria cimenteira e nas termoelétricas, mas em fornos adaptados para a emissão dos gases dessa queima. Na década de 90, surgiu uma tecnologia nova, nacional, que utiliza solventes orgânicos para separar a borracha do arame e do nylon dos pneus, permitindo sua reciclagem;

b) pilhas e baterias: em função de suas características tóxicas e da dificuldade em se impedir seu descarte junto com o lixo domiciliar, no Brasil, em 1999, foi publicada a Resolução CONAMA nº 257, que atribui a responsabilidade do acondicionamento, coleta, transporte e disposição final de pilhas e baterias aos comerciantes, fabricantes, importadores e à rede autorizada de assistência técnica. Esses resíduos devem ter seu tratamento e disposição final semelhantes aos resíduos perigosos Classe I. Tratamento semelhante ocorre em outros países, tais como a Suécia, onde um acordo entre os fabricantes/importadores e o governo reduziram o descarte de pilhas e baterias no lixo doméstico em 60% no primeiro ano, estendido para 90% no segundo (HARTLÉN, 1996);

c) lâmpadas fluorescentes: essas lâmpadas liberam mercúrio quando são quebradas, queimadas ou enterradas, o que as transforma em resíduos perigosos Classe I, uma vez que o mercúrio é tóxico para o sistema nervoso humano e quando inalado ou ingerido, pode causar uma enorme variedade de problemas fisiológicos. O mercúrio provoca “bioacumulação”, isto é, alguns animais (peixes, por exemplo) que entram em contato com o mesmo, têm suas concentrações aumentadas em seus corpos, podendo atingir níveis elevados e causar problemas de saúde em seres humanos que se alimentem desses animais.

É possível que algumas realocações dos diversos tipos de resíduos sólidos aconteçam na classificação dos mesmos. Como exemplo tem-se a classificação sugerida pela Lei 12.300 do Estado de São Paulo, de março de 2006, que em seu artigo 6º classifica os resíduos sólidos nas seguintes categorias: resíduos urbanos, resíduos

industriais, resíduos de serviços de saúde, resíduos de atividades rurais, resíduos provenientes de portos, aeroportos, terminais rodoviários e ferroviários, postos de fronteira e estruturas similares e resíduos da construção civil.

De forma simplificada, é apresentado na Figura 2.1 um esquema de classificação dos resíduos sólidos, conforme como aqui foi discutido.

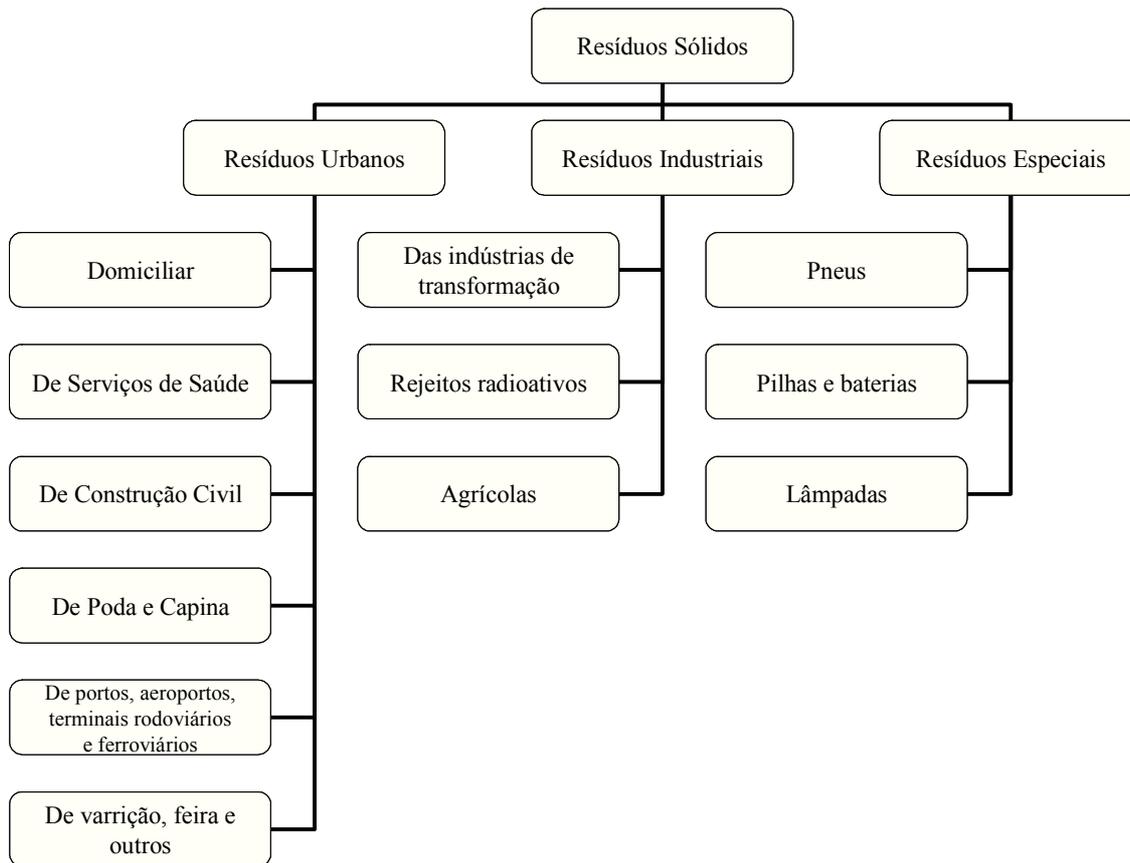


Figura 2.1 Esquema de classificação dos resíduos sólidos segundo a fonte geradora

## 2.4 Características dos resíduos sólidos

Para realizar um correto gerenciamento dos resíduos sólidos (RS) se faz necessário dispor de dados sobre a sua composição, a quantidade e as fontes geradoras dos mesmos, juntamente com as variáveis sócio-econômicas, ou seja, caracterizar os resíduos (BUENROSTRO e BOCCO, 2003). É ainda necessário identificar e conhecer o tipo de resíduo descartado pela fonte geradora no meio ambiente para que se possa caracterizá-lo.

Esta caracterização permite a obtenção de informações referentes às características físicas, químicas e biológicas dos resíduos presentes numa cidade ou

região, possibilitando uma maior visualização das suas implicações anteriores e atuais, e gerando subsídios para um correto tratamento e disposição final (SCHALCH et al., 2002; ANDRADE, 1997).

Dentre todos os tipos de resíduos anteriormente apresentados, os resíduos sólidos urbanos (RSU) parecem ter como característica peculiar e marcante, uma composição heterogênea (SCHALCH et al., 2002), uma vez que os demais (resíduos sólidos industriais e resíduos sólidos especiais) geralmente são gerados a partir de processos controlados, não apresentando grandes variações em suas características. Por esse motivo, serão mais exemplificadas as características dos RSU, embora o conhecimento de tais características também seja extensivo aos demais, para um correto gerenciamento dos mesmos.

As *características físicas* mais relevantes dos RSU estão abaixo descritas.

- **Geração *per capita***: relaciona a quantidade de resíduos gerada diariamente ou anualmente ao número de habitantes de uma determinada região. Para os resíduos domiciliares, a quantidade de resíduos produzidos parece estar diretamente relacionada com o modo de vida da população.

Dados da ABRELPE (2006) apontam que os 14 municípios brasileiros com população acima de 1 milhão de habitantes são responsáveis por 29% dos RSU gerados no país, enquanto que os 21 municípios com população entre 200 mil e 500 mil habitantes somam 10% da geração. Segundo a PNSB 2000 (IBGE, 2001), os municípios de 20 mil a 50 mil habitantes, têm uma geração média *per capita* de 0,64 kg/hab.dia de lixo urbano, enquanto que os municípios com mais de 1 milhão de habitantes geram 1,50 kg/hab.dia, ou seja, 134% a mais.

Já para o estado de São Paulo, o índice médio de geração *per capita* de resíduos sólidos domiciliares para cidades de até 100 mil habitantes é de 0,4 kg/hab.dia enquanto que para cidades acima de 500 mil é de 0,7 kg/hab.dia (CETESB, 2005b). Exceção é feita para a cidade de São Paulo, por ser uma megalópole, gerando assim 1,29 kg/hab.dia (ABRELPE, 2006).

De maneira semelhante, segundo a pesquisa de ESIN e COSGUN (2007), sobre a cidade de Istambul, na Turquia, esta gera aproximadamente 38 milhões de toneladas de resíduos sólidos por ano, o que corresponde a uma geração *per capita* de aproximadamente 1 kg/hab.dia.

Em geral, tais dados estão de acordo com OJEDA-BENITEZ et al. (2003) que diz que o processo de urbanização também causa um aumento na geração de resíduos.

Exemplificando a influência de tal variável, segundo SHARHOLY et al. (2007), não somente mas tremendamente influenciadas pelo processo de urbanização vivenciado pelas cidades indianas nas últimas décadas, atualmente estas produzem oito vezes mais resíduos que produziam na década de 50.

Essas variações na geração *per capita* podem ser ocasionadas por vários fatores, tais como as atividades produtivas predominantes no município, a sazonalidade dessas atividades, o nível de interesse e a participação dos moradores em programas de coleta seletiva e em ações governamentais que objetivem a conscientização da população, quanto à redução da geração de resíduos, dentre outras. Entretanto, parece que o nível sócio-econômico dos habitantes parece ser o fator que exerce maior influência (CETESB, 2005b).

Um excelente exemplo da influência desse fator é dado por WANG e NIE (2001) ao explicitarem o surpreendente aumento da geração de resíduos da população da China após as últimas décadas de intenso crescimento econômico, havendo cidades que a taxa de crescimento anual da geração de lixo urbano se aproxima de 10%.

Outro exemplo é dado por LOUIS (2004) ao analisar o comportamento do padrão de consumo e da geração dos resíduos da sociedade americana após grandes fases de desenvolvimento, como a revolução industrial e as grandes guerras. Exemplificando, estima-se que entre 1920 e 1970 a taxa de geração de resíduos cresceu mais de 5 vezes que a taxa de crescimento populacional.

A maior influência do poder aquisitivo da população parece ser tendência mundial, uma vez que Estados Unidos, Cingapura e Japão, que possuem uma renda *per capita* média de US\$30.587 (WORLD BANK, 2000), geram em média 421,2 kg/hab.ano (EPA, 2003; BAI e SUTANTO, 2002; SAKAI, 1996) de resíduos sólidos domiciliares, enquanto que Brasil e Botsuana, que possuem uma renda *per capita* média de US\$3.945 (WORLD BANK, 2000), geram em média somente 270,4 kg/hab.ano (ISWA, 2005; KGATHI e BOLAANE, 2001) de resíduos sólidos domiciliares.

Um cuidado que se deve ter ao avaliar a geração *per capita* de cidades turísticas é a época da pesquisa devido à população adicional e ao tipo de consumo durante a temporada de férias (METIN et al., 2003), pois a população flutuante pode gerar até 70% a mais de lixo do que a população local (IBAM, 2001).

A Tabela 2.1 traz alguns dados de geração *per capita* de RS domiciliares de alguns países do mundo, com as suas respectivas rendas *per capita*.

Tabela 2.1 – Taxa de geração média anual por habitante dos RS domiciliares do mundo

Renda per capita	País	Renda per capita (US\$)	Geração per capita (kg/hab.ano)
Alta	Suíça	39.980 <sup>(a)</sup>	673,2 <sup>(b)</sup>
	Dinamarca	33.040 <sup>(a)</sup>	578,0 <sup>(b)</sup>
	Israel	16.180 <sup>(a)</sup>	564,9 <sup>(b)</sup>
	Alemanha	26.570 <sup>(a)</sup>	556,6 <sup>(b)</sup>
	Reino-Unido	21.410 <sup>(a)</sup>	550,8 <sup>(b)</sup>
	Holanda	24.780 <sup>(a)</sup>	538,8 <sup>(b)</sup>
	Japão	32.350 <sup>(a)</sup>	536,5 <sup>(d)</sup>
	Finlândia	24.280 <sup>(a)</sup>	530,8 <sup>(b)</sup>
	Itália	20.090 <sup>(a)</sup>	515,0 <sup>(b)</sup>
	Estados Unidos	29.240 <sup>(a)</sup>	511,6 <sup>(c)</sup>
	Portugal	10.690 <sup>(a)</sup>	481,8 <sup>(e)</sup>
	Cingapura	30.170 <sup>(a)</sup>	401,5 <sup>(d)</sup>
	Áustria	26.830 <sup>(a)</sup>	382,7 <sup>(b)</sup>
	Espanha	14.100 <sup>(a)</sup>	367,5 <sup>(b)</sup>
Média	Tailândia	2.160 <sup>(a)</sup>	401,5 <sup>(d)</sup>
	Turquia	3.160 <sup>(a)</sup>	354,1 <sup>(f)</sup>
	México	3.840 <sup>(a)</sup>	334,7 <sup>(h)</sup>
	Estônia	3.360 <sup>(a)</sup>	328,1 <sup>(b)</sup>
	Brasil	4.630 <sup>(a)</sup>	324,0 <sup>(g)</sup>
	Malásia	3.670 <sup>(a)</sup>	295,7 <sup>(d)</sup>
	Botsuana	3.260 <sup>(a)</sup>	216,7 <sup>(j)</sup>
Baixa	China	750 <sup>(a)</sup>	255,5 <sup>(d)</sup>
	Mongólia	380 <sup>(a)</sup>	219,0 <sup>(d)</sup>
	Vietnam	350 <sup>(a)</sup>	200,8 <sup>(d)</sup>
	Índia	440 <sup>(a)</sup>	137,2 <sup>(i)</sup>

a) WORLD BANK, 2000b) ISWA, 2005  
c) EPA, 2003 d) HOORNWEG, 2000  
e) MAGRINHO et al., 2006 f) METIN et al., 2003  
g) ABRELPE, 2006 h) BUENROSTRO e BOCCO, 2000  
i) SHARHOLY et al., 2007 j) KGATHI e BOLAANE, 2001

- **Composição gravimétrica:** traduz o percentual de cada componente do resíduo em relação à massa total da amostra realizada. Esta característica é bastante importante para resíduos bastante heterogêneos, como é o caso dos RSU.

A partir da composição gravimétrica do lixo, pode-se elaborar projetos de redução, de segregação na origem e de aproveitamento dos materiais potencialmente recicláveis, além de subsidiar a escolha do tratamento e destinação final mais adequados aos componentes do lixo (ANDRADE, 1997; MAGRINHO et al., 2006).

Assim como a quantidade, a composição dos resíduos também é função do modo de vida da população. Pode-se ainda identificar as seguintes variáveis como

influenciadoras na heterogeneidade dos resíduos sólidos urbanos: o número de habitantes do local, as condições climáticas, os hábitos e costumes da população, o nível cultural dos habitantes, as variações sazonais, o poder aquisitivo da população, a taxa de eficiência do projeto ou do programa de coleta, o tipo de equipamento de coleta e as leis e regulamentações específicas (BUENROSTRO e BOCCO, 2003; OJEDA-BENITEZ et al., 2003; METIN et al., 2003; IBAM, 2001). Dentre todas, novamente a variável “econômica” destaca-se como preponderante (SCHALCH et al., 2002; BURNLEY et al., 2007).

Exemplificando o que acima foi exposto, HOORNWEG (2000) pesquisou as diferenças na composição dos resíduos sólidos domiciliares dos países de baixa, média e alta renda na Ásia, além de fazer uma projeção para o ano de 2025. Tais dados encontram-se na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 Composição gravimétrica do RS domiciliar dos países de baixa, média e alta rendas da Ásia e projeções para o ano de 2025, em % (HOORNWEG, 2000)

Constituinte	Composição atual			Projeção para 2025		
	Baixa renda	Média renda	Alta renda	Baixa renda	Média renda	Alta renda
Matéria Orgânica	41	58	28	60	50	33
Vidro	2	2	7	3	3	7
Metal	1	3	8	4	5	5
Plástico	4	11	9	6	9	18
Papel	5	15	36	15	20	34
Outros	47	11	12	12	13	11

Observa-se que há uma tendência da quantidade de matéria orgânica aumentar, à medida que a renda da população diminui, conforme pode ser constatado na composição atual e nas projeções para 2025. Constata-se também um menor teor de materiais recicláveis, como papel, plástico, vidro e metais, à proporção que a renda dos países diminui.

Tal fenômeno também é observado ao se comparar a composição dos RS domiciliares de países em desenvolvimento, como Brasil, México, China e Quênia, onde o poder aquisitivo da população é menor que a dos países desenvolvidos, como Estados Unidos, Canadá e o Reino Unido, conforme pode ser visto na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 Composição gravimétrica do RS domiciliar em alguns países, em %.

Composto	Brasil (a)	Alemanha (b)	Canadá (b)	Japão (b)	Suécia (b)	Holanda (c)	EUA (d)
Matéria Orgânica	57,41	51,2	28,7	42,3	37-45	59,4	23,8
Vidro	2,34	11,5	4,4	2,9	4-7	3,8	5,3
Metal	2,07	3,9	10,4	5,1	2-5	0,8	8,0
Plástico	16,49	6,1	8,0	11,2	6-8	4,9	11,3
Papel	13,16	19,9	37,7	25,0	35-40	11,2	35,2
Rochas, solos	0,46	2,9	-	-	-	1,2	-
Borracha, tecido	-	1,5	-	5,5	1-2	0,8	7,4
Madeira	-	-	-	-	1,0	3,4	5,8
Outros	8,08	3,1	10,3	8,0	4-6	14,5	3,4

a) ABRELPE, 2006 b) SAKAI et al., 1996 c) DWMA, 2005 d) EPA, 2003

Tabela 2.3 Composição gravimétrica do RS domiciliar em alguns países, em % - continuação.

Composto	Cingapura (e)	México (f)	China (g)	Portugal (h)	Quênia (i)	Índia (j)	Reino Unido (k)
Matéria Orgânica	38,8	52,4	52,9	35,5	53	41,8	20,2
Vidro	1,1	5,9	2,4	5,4	2,1	2,1	9,3
Metal	3,2	2,9	0,7	2,6	2,3	1,9	7,3
Plástico	5,8	4,4	7,9	11,5	12,6	3,9	10,2
Papel	20,6	14,1	5,7	25,9	16,8	5,7	37,1
Rochas, solos	2,7	-	18,9*	12,7	-	40,3*	6,8
Borracha, tecido	0,9	1,5	2,5	3,4	2,6	3,5	2,1
Madeira	8,9	-	6,7	0,75	-	-	-
Outros	18,0	18,9	2,3	2,25	10,6	0,8	7,0

e) BAI e SUTANTO, 2002 f) BUENROSTRO e BOCCO, 2003 g) WANG e NIE, 2001  
h) MAGRINHO et al., 2006 j) SHARHOLY et al., 2007 i) HENRY et al., 2006  
k) BURNLEY et al., 2007  
\* Os solos vêm misturados com as cinzas provenientes do uso do carvão, que é usado como combustível para fornecimento de calor

Já para METIN et al. (2003), o processo de urbanização parece ser a grande variável interveniente na mudança da composição dos resíduos sólidos domiciliares, uma vez que o teor de matéria-orgânica diminui à medida que as cidades vão se tornando maiores, enquanto que o teor de recicláveis aumenta. Em concordância com o esse processo, LOUIS (2004) atesta que com o processo de crescimento e urbanização da sociedade americana, o teor de papéis, plásticos e materiais duráveis sintéticos passou a ser mais expressivo. Tal processo também tem sido observado na China, uma vez que o teor de materiais recicláveis tem aumentado (WANG e NIE, 2001).

Tais diferenças refletem as mudanças inseridas na sociedade à medida que os países vão enriquecendo, já que estes tornam-se mais urbanizados, modificando a composição dos seus resíduos. O substancial aumento do uso de papel e de embalagens é provavelmente a mais notória mudança, seguida de uma maior proporção de plásticos, itens multi-materiais e produtos de consumo, com suas respectivas embalagens (HOORNWEG, 2000).

As diferenças na composição dos resíduos sólidos urbanos podem, por sua vez, acarretar um grande impacto no sistema de gerenciamento dos resíduos sólidos em diferentes localidades.

Uma recomendação importante, particularmente quando se tem interesse nos dados para questões de transporte e capacidade de aterros, é que a composição do resíduo seja realizada em volume (SAKAI et al., 1996).

Para a realização dessa transformação, se faz necessário o conhecimento de outra característica física dos resíduos, a sua massa específica.

- **Massa específica:** é a razão entre a massa do resíduo e seu volume ocupado, geralmente expressa em  $\text{kg/m}^3$ . Sua determinação é importante para o dimensionamento dos equipamentos e das instalações, podendo ser medida no estado solto ou no estado compactado (ANDRADE, 1997).

Na ausência de dados, podem-se utilizar para a massa específica no estado solto, os valores de  $230 \text{ kg/m}^3$  para o lixo domiciliar, de  $280 \text{ kg/m}^3$  para os resíduos de serviço de saúde e de  $1.300 \text{ kg/m}^3$  para os resíduos da construção civil (IBAM, 2001). Para a China, os resíduos sólidos municipais apresentam uma massa específica entre 220 e  $450 \text{ kg/m}^3$ , sendo  $353 \text{ kg/m}^3$  o seu valor médio (WANG e NIE, 2001).

HOORNWEG (2002) indica que  $500 \text{ kg/m}^3$ ,  $300 \text{ kg/m}^3$  e  $150 \text{ kg/m}^3$  podem ser usados como valores médios das massas específicas dos resíduos sólidos domiciliares gerados em países de baixa, média e alta renda, respectivamente. Ainda segundo o mesmo autor, geralmente países de baixa renda produzem maior quantidade de resíduos em massa, enquanto que países de alta renda produzem maior quantidade de resíduos em volume.

- **Compressividade:** é o quanto o volume do resíduo pode reduzir quando este sofrer compactação. Como referência, pode-se utilizar que quando submetido a uma pressão de  $4 \text{ kg/cm}^2$ , o volume de lixo domiciliar pode ser reduzido de 1/3 a 1/4 do seu volume original (IBAM, 2001).

- **Teor de umidade:** representa a quantidade de água presente nos resíduos, medida em percentual da massa total dos mesmos. Excluindo-se a água obtém-se o teor de resíduo seco, que corresponde à massa total seca dos resíduos, também medida em percentual da massa total. Estes parâmetros se alteram em função das estações do ano e da incidência das chuvas (ANDRADE, 1997; IBAM, 2001). Essa característica é importante uma vez que se relaciona com outras características (massa específica e poder calorífico), tendo implicações nas operações de gerenciamento dos resíduos, principalmente quando se trata o resíduo através da incineração. Segundo BAI e SUTANTO (2002), o teor de umidade dos resíduos sólidos de Cingapura varia de 30 a 60%, sendo que o seu valor típico é de 48,6%, enquanto que para a China esses valores variam entre 45 e 70%, sendo 55,4% o valor médio (WANG e NIE, 2001).

O conhecimento das características químicas dos RSU é bastante importante na avaliação das possíveis opções de recuperação e processamento dos seus constituintes. Dentre as *características químicas* mais relevantes dos RSU, pode-se citar:

- **o poder calorífico**, que indica a quantidade de calor ou energia que pode se desprender de determinada massa de resíduo quando este é submetido à queima. Sabe-se que se o poder calorífico do resíduo for maior que 813 kcal/kg, o mesmo pode ser incinerado diretamente sem qualquer necessidade de outro combustível (WANG e NIE, 2001). Para o Brasil, pode-se estimar o valor de 5000 kcal/kg para o RS domiciliar (IBAM, 2001) e 4000 kcal/kg, para os RSS (ANDRADE, 1997).

Segundo BAI e SUTANTO (2002), os RS domiciliares de Cingapura possuem um poder calorífico da ordem de 1200 a 3100 kcal/kg, sendo que o seu valor típico é de 1900, enquanto que para a China esses valores variam entre 430 e 1529 kcal/kg, sendo 1121 kcal/kg o seu valor médio (WANG e NIE, 2001). Já na Índia, o poder calorífico dos mesmos varia entre 800 e 1000 kcal/kg (SHARHOLY et al., 2007).

Em Cingapura, a incineração é o principal meio de tratamento de resíduos, onde grande parte da energia da queima desses resíduos é recuperada, sendo esta utilizada para operar as centrais incineradoras, e a parte excedente é vendida ao sistema de abastecimento público (BAI e SUTANTO, 2002).

Juntamente com o teor de umidade, esta característica é bastante evidenciada quando se pensa em projetos de incineradores que visem também a recuperação de calor gerado durante a queima dos resíduos.

- **O potencial hidrogeniônico (pH)**, que indica o teor de acidez ou alcalinidade dos resíduos, situando-se, em geral, na faixa de 5 a 7, para o lixo domiciliar (IBAM, 2001).

- **A composição química**, que consiste principalmente na determinação dos (MACHADO JUNIOR et al., 1978 e LI e JENQ, 1993, citados por ANDRADE, 1997):

- teores de carbono, uma vez que a eficiência dos processos de decomposição biológica ou incineração relacionam-se diretamente com o carbono dos resíduos;

- dos teores de nitrogênio, sendo relacionados ao poder calorífico além de auxiliar na avaliação da decomposição do resíduo e na própria decomposição;

- dos teores de hidrogênio, que indicam parcialmente a quantidade de materiais plásticos presentes nos resíduos;

- dos teores de oxigênio, pois relacionam-se também com o poder calorífico e tem influência sobre os processos que abrangem a combustão dos resíduos;

- dos teores de enxofre, pois estes podem poluir o ar ao converter-se em dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) durante a incineração;

- dos teores de cloro, pois estes permitem conhecer as quantidades de ácido clorídrico geradas pela queima dos resíduos;

- dos sólidos voláteis, que indica a porcentagem em massa dos resíduos que podem ser volatilizados e;

- do teor de cinzas, que corresponde à porcentagem em massa do material remanescente após a queima.

Uma relação bastante utilizada é a carbono/nitrogênio, que indica o grau de decomposição da matéria orgânica do lixo nos processos de tratamento e disposição final, encontrando-se, em geral, na ordem de 35/1 a 20/1, também para os resíduos domiciliares (IBAM, 2001).

As *características biológicas* dos resíduos são aquelas determinadas pela população macrobiana e agentes patogênicos presentes no lixo. O conhecimento dessas características é importante, sobretudo porque contribui na avaliação dos riscos à saúde pública causados pela incorreta manipulação desses resíduos, além de servir de ensejo para um correto gerenciamento dos mesmos (ANDRADE, 1997).

O conhecimento dessas características biológicas, juntamente com as características químicas, propicia a seleção dos métodos de tratamento e disposição final mais adequados para cada tipo de resíduo produzido (IBAM, 2001).

Dos grupos de características apresentados, pode-se destacar as características físicas, uma vez que, sem o seu conhecimento, torna-se difícil efetuar a gestão adequada dos serviços de limpeza urbana, uma vez que este constitui o primeiro procedimento para se obter projetos eficazes e eficientes no que diz respeito ao acondicionamento, coleta, transporte, tratamento e/ou disposição final dos resíduos sólidos das cidades.

É oportuno salientar que as informações advindas da caracterização dos resíduos sólidos de uma cidade podem ser reaproveitadas ou comparadas com as de outra cidade, tornando-se uma referência para aquela cidade na qual falte este tipo de pesquisa. Esta comparação torna-se mais eficaz quando as comunidades de localidades distintas possuem características muito semelhantes.

## **2.5 Gestão e gerenciamento de resíduos sólidos**

### **2.5.1 Considerações iniciais**

É antiga a preocupação do Homem com a gestão e o gerenciamento dos seus resíduos sólidos, uma vez que já no ano 500 a.C. os gregos organizaram e publicaram o primeiro texto criando um local específico para disposição desses resíduos e proibindo que os mesmos fossem jogados nas ruas e, em 1898, a cidade de Nova York já tinha um centro municipal de reciclagem dos resíduos sólidos urbanos (LOUIS, 2004).

Nos dias de hoje, a civilização já tem consciência sobre os danos de suas ações sobre o planeta, principalmente com relação ao meio ambiente, muito embora algumas nações ainda não tenham adotado ações com a filosofia de preservação do meio ambiente. Esse despertar para a proteção ambiental é notório em função da quantidade de leis, normas, tratados e protocolos existentes sobre melhores práticas da interferência do Homem no meio ambiente.

Entretanto, as pressões das nações emergentes, que estão se industrializando, se modernizando, são enormes, exigindo cada vez mais recursos naturais e locais para dispor seus resíduos. Ao mesmo tempo, os resíduos produzidos nesses países são mal geridos e gerenciados, administrados muitas vezes com escassez e insuficiência de planejamento, de forma não científica, desorganizada e informal. Há também uma falta

de meios de financiamento e de infra-estrutura técnica e humana (BUENROSTRO e BOCCO, 2003).

Para alguns, gerenciar resíduos diz respeito apenas à aplicação de tecnologias para o tratamento dos mesmos, entretanto, segundo a CETESB (2005), no gerenciamento dos resíduos, deve-se inicialmente buscar a minimização da utilização de recursos, sendo que isto inclui qualquer prática, ambientalmente segura, de redução na fonte (também chamada de prevenção à poluição<sup>1</sup> ou P2), reuso<sup>2</sup>, reciclagem<sup>3</sup> e recuperação<sup>4</sup> de materiais e do conteúdo energético dos resíduos, visando reduzir a quantidade ou volume dos mesmos a serem tratados e posteriormente adequadamente dispostos. Essa filosofia é amplamente difundida e utilizada nos sistemas de gestão e gerenciamento de resíduos sólidos em vários países do mundo, como se pode observar nos trabalhos de BAI e SUTANTO (2002), SAKAI (1996), EIGHMY e KOSSON (1996), KGATHI e BOLAANE (2001), HJELMAR (1996), ADAMS et al. (2000) e VEHLLOW (1996).

Segundo SCHALCH (2002), a redução dos resíduos na fonte geradora é a principal e mais eficaz forma de minimizá-los, sendo a reciclagem desses resíduos ou o reuso dos mesmos uma segunda opção, caso as técnicas de redução na fonte não se apliquem, uma vez que estas últimas evitam a geração de resíduos mas não evitam que esses materiais ainda devam ser manipulados e transportados para poderem ser reaproveitados (SAKAI et al., 1996).

A preferência pela redução dos resíduos na fonte se explica porque tem-se como premissa básica que, com este tipo de gerenciamento, não se irá requerer no futuro consumo de recursos e nem de energia que hoje se despendem para se tratar e dispor, de forma ambientalmente segura, os resíduos atualmente gerados. A busca pelo

---

<sup>1</sup> Uso de processos, práticas, técnicas, materiais, produtos, serviços ou energia para evitar, reduzir ou controlar (de forma separada ou combinada) a geração, emissão ou descarga de qualquer poluente ou rejeito, para reduzir os impactos ambientais adversos (SGS, 2005).

<sup>2</sup> É qualquer prática ou técnica que permita a reutilização do resíduo, sem que o mesmo seja submetido a um tratamento que altere as suas características físico-químicas (CETESB, 2005). É o uso do material coletado após seu primeiro uso e antes deste sofrer um processo de remanufaturamento (VESILIND et al., 1994, citado por KGATHI e BOLAANE, 2001).

<sup>3</sup> É qualquer técnica ou tecnologia que permita o reaproveitamento de um resíduo, após o mesmo ter sido submetido a um tratamento que altere as suas características físico-químicas. Pode ser classificada como: *reciclagem dentro do processo*, quando se permite o reaproveitamento do resíduo como insumo no próprio processo que o gerou ou *reciclagem fora do processo*, quando se permite o reaproveitamento do resíduo como insumo em um processo diferente daquele que o gerou (CETESB, 2005).

<sup>4</sup> A política dos 3R's, de Reduzir, Reutilizar e Recuperar, adotada pelo governo britânico, no Brasil, o terceiro R é entendido como Reciclagem e não como Recuperação. Entretanto, a Recuperação envolve a reciclagem, a compostagem de resíduos orgânicos e também a incineração, quando esta é utilizada com a finalidade de se gerar ou recuperar energia (CASTRO, 2004).

desenvolvimento sustentável passa por uma reorientação dos atuais padrões de produção e consumo, através da adoção de medidas de prevenção à poluição (SCHALCH, 2002).

As principais medidas para a redução dos resíduos na fonte incluem *modificações no produto*, tais como substituição do produto ou mudança na composição do produto; *modificações de material*, tais como purificação do material ou substituição do material e *modificações na tecnologia*, tais como modificações no processo, modificações no *layout*, tubulações ou equipamentos ou ainda modificações no cenário operacional e *modificações nas práticas operacionais*, tais como a adoção de práticas de gerenciamento, prevenção de perdas, segregação de fluxo de resíduos, aperfeiçoamentos do manejo de material ou plano de produção (FREEMAN, 1990, citado por SCHALCH, 2002).

Na impossibilidade de implementar ações de P2, outras medidas de minimização de resíduos, tais como a reciclagem e o reuso, devem ser consideradas, pois promovem a conservação de recursos naturais e reduzem os impactos ambientais causados pelo armazenamento, tratamento e disposição final de resíduos. O aumento no nível de reciclagem contribui para a redução do uso de matéria-prima natural, da emissão gases poluentes à atmosfera e da demanda de energia.

Exemplificando, segundo estudos de CALDERONI (1997) e OLIVEIRA (2000), citados por PIMENTEIRA et al. (2005), o Brasil tem o potencial de economizar 27 TWh de energia somente através da reciclagem. Isso pode ser explicado quando se vê que 35% do total de resíduos sólidos domésticos gerados no país correspondem a resíduos recicláveis, sendo que destes, somente 27% é reciclado, embora dados da ABRELPE (2006) apontem que 79% do volume de papel, 16,5% do plástico, 48% do PET, 46% do vidro, 22% da embalagem longa vida, 95,7% do alumínio, 47% do aço e 39% dos pneus coletados no Brasil são reciclados.

Finalmente, medidas adequadas de controle ambiental devem ser consideradas para o tratamento e disposição final dos resíduos e poluentes remanescentes de uma forma ambientalmente segura. Pode ser observado na Figura 2.2, esquematicamente, o modelo de gerenciamento ambiental proposto, cuja estratégia visa priorizar as ações de P2 dentro do contexto da minimização de resíduos e poluentes.

Convém salientar que as práticas de reciclagem fora do processo, tratamento e disposição dos resíduos gerados, não são consideradas atividades de prevenção à poluição, uma vez que não implicam na redução da quantidade de resíduos e poluentes

na fonte geradora, mas atuam de forma corretiva sobre os efeitos e as conseqüências oriundas do resíduo gerado (CESTESB, 2005a).

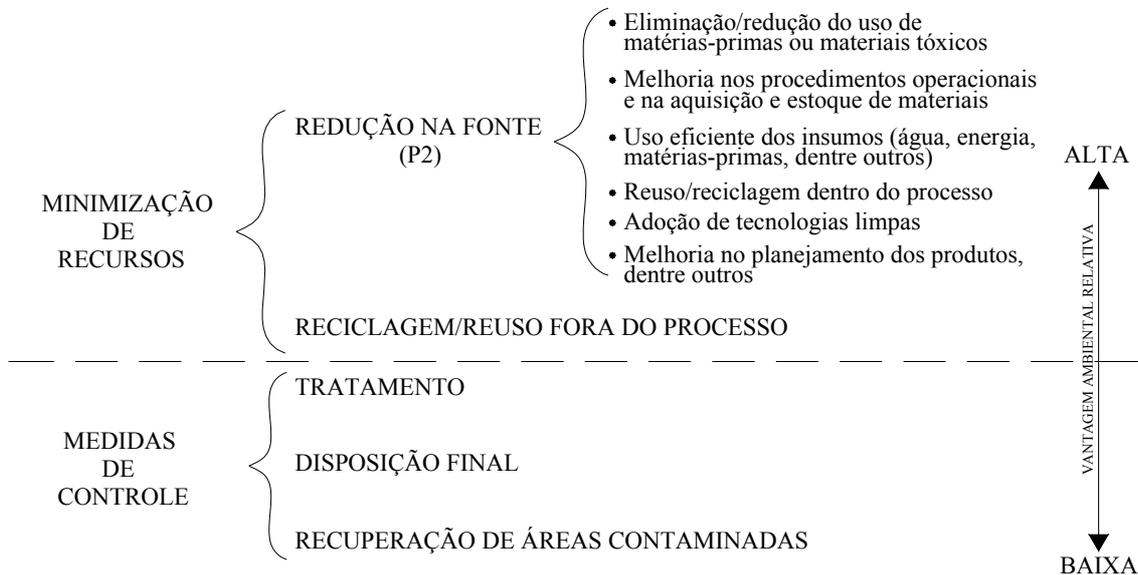


Figura 2.2 Modelo de gerenciamento ambiental dos resíduos (CETESB, 2005a)

Uma maneira de se introduzir esses conceitos no âmbito das organizações empresariais é a incorporação de um Sistema de Gestão Ambiental (SGA) ao sistema de gestão das empresas. Este tipo de sistema tem como principal instrumento de verificação a auditoria ambiental, sendo que seus requisitos encontram-se estabelecidos pela norma ISO 14.001 (SGS, 2005).

Em função do próprio processo de estabelecimento do SGA, necessariamente as organizações melhoram o seu desempenho ambiental. Isto ocorre em função da estrutura cíclica da norma, que exige que o SGA seja monitorado e revisto periodicamente, de forma a direcionar, de maneira efetiva, as atividades da organização, em resposta às alterações sugeridas por fatores externos. Fica então evidente que essa natureza dinâmica do SGA, especificada pela norma ISO 14.001, conduz à melhoria contínua, evitando ou reduzindo as degradações do meio ambiente e melhorando as condições de saúde das populações (SGS, 2005).

Entretanto, o conceito de prevenção ainda é bastante focado no setor industrial, uma vez que as indústrias são conscientes que a otimização da produção e a redução do consumo de matéria-prima são mecanismos que podem torná-los mais competitivos no atual mercado globalizado (SAKAI et al., 1996).

Para os resíduos sólidos urbanos, mesmo com o emprego dos conceitos e técnicas de minimização de recursos acima discutidos, sempre haverá uma quantidade destes resíduos que deverá ser tratada e disposta adequadamente. Nesse caso, também há uma variedade de processos que podem ser empregados, cada um com suas vantagens e desvantagens.

Nos países em desenvolvimento, há uma tendência de se tratar e dispor os resíduos sólidos basicamente utilizando os aterros, e muitas vezes, lixões, enquanto que nos países desenvolvidos, a incineração é a mais utilizada forma de tratamento.

Exemplificando, 63,6% dos municípios brasileiros utilizam os lixões como forma de tratamento e disposição final dos seus resíduos e 32,2% utilizam os aterros adequados (13,8% em aterros sanitários e 18,4% em aterros controlados) (IBGE, 2002). Situação semelhante ocorre no México, onde 54% dos resíduos vão para os aterros e 44% para lixões (BUENROSTRO e BOCCO, 2003). Na China, até 1990, 97% dos resíduos sólidos urbanos eram simplesmente dispostos em áreas com nenhum ou com um nível muito limitado de engenharia (WANG e NIE, 2001).

Por outro lado, Estados Unidos, Alemanha, Holanda, Suécia, Dinamarca, Japão e Cingapura, que são países mais desenvolvidos que Brasil, México e China, incineram 14%, 25%, 53,2%, 55%, 58%, 74% e 87%, respectivamente, dos seus resíduos sólidos (EPA, 2003; SAKAI et al., 1996; DWMA, 2005; BAI e SUTANTO, 2002).

Nota-se também a influência do fator geográfico no tratamento e na disposição dos resíduos, uma vez que Holanda, Japão e Cingapura, que são países que detêm pequena extensão territorial, incineram acima de 50% dos seus resíduos sólidos enquanto que os Estados Unidos, apenas 14%.

Muitos são os fatores que afetam os impactos ambientais oriundos dos sistemas de gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos, tornando difícil uma comparação direta entre todas as alternativas. Entretanto, uma abordagem que tem sido bastante usada para comparar o desempenho dos diversos sistemas disponíveis é a Análise do Ciclo de Vida (ACV), uma vez que a mesma considera e quantifica todas as conseqüências ambientalmente relevantes oriundas do produto, sistema ou processo, durante toda a sua vida (BARLAZ et al., 2003). Então, baseados na ACV, certos pesquisadores fizeram estudos comparativos entre alguns métodos de gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos, conforme abaixo descrito.

Segundo MENDES et al. (2004), o uso de aterros como opção de tratamento/disposição tem um maior impacto ambiental que a incineração, uma vez que

contribui de maneira substancial para o aquecimento global, em função da grande emissão de metanos, e possui um maior poder de acidificação do solo e de contaminação da água, em função da enorme quantidade de contaminantes que são originados no processo de decomposição do lixo.

Mesmo os aterros dotados de sistema de coleta e queima do biogás e de coleta e tratamento de chorume, uma considerável quantidade de gás, em torno de 60%, e de chorume é perdida para o meio ambiente (DASKALOPOULOS et al., 1998). Além disso, o gás oriundo dos aterros contém entre 48 e 56% de metano, possuindo um valor calorífico aproximado de metade do gás natural (HAMER, 2003).

Entretanto, quando os resíduos biodegradáveis são desviados para a compostagem ou biogasificação e somente os outros resíduos são destinados ao aterro, observa-se uma importante redução dos impactos ambientais, uma vez que a compostagem reduz o volume dos resíduos de 50 a 85%, aumentando assim a vida útil dos aterros, e a biogasificação produz de duas a quatro vezes mais metano em 3 semanas que o aterro produziria em 6 a 7 anos (SHARHOLY et al., 2007).

Coerente com os resultados anteriores, nos cenários considerados por BARLAZ et al. (2003), onde se considerou a separação do material orgânico e de recicláveis, com o encaminhamento dos mesmos para os processos de compostagem e reciclagem, respectivamente, observou-se um decréscimo dos possíveis impactos ambientais, em função do decréscimo do consumo de energia, de emissões de gases que provocam o efeito estufa, dentre outros parâmetros.

Em um amplo estudo sobre os sistemas de tratamento dos resíduos sólidos urbanos da Suécia, FINNVEDEN et al. (2005) e MOBERG et al. (2005) apontam o uso dos aterros como última alternativa ambientalmente preferível a ser adotada, priorizando o uso da reciclagem, compostagem e incineração, respectivamente.

Em concordância com os demais, ERIKSSON et al. (2005) sugerem que os aterros devam ser evitados como opção de tratamento de resíduos uma vez que as outras opções disponíveis possuem um melhor desempenho, no que diz respeito aos impactos ambientais causados, ao uso dos recursos energéticos e à economia.

Entretanto, o desempenho ambiental do sistema de gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos é apenas uma consideração dentre outras. Custos geralmente são a maior consideração, havendo ainda os valores sociais. Portanto, interpretações e julgamentos ainda permanecem necessários ao processo para se determinar qual a melhor opção.

De uma forma ou de outra, os resíduos são hoje melhores gerenciados que no passado. Como exemplo disso, as emissões de gases que provocam o efeito estufa oriundos do gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos nos Estados Unidos são estimadas em 36 milhões de toneladas de carbono equivalente, para o ano de 1974, enquanto que para 1997, esse valor se reduz a 8 milhões, apesar da geração desses resíduos quase que quadruplicar nesse período. Se os resíduos hoje fossem gerenciados da mesma maneira que eram em 1974, essas emissões seriam da ordem de 60 milhões de toneladas de carbono equivalente (WEITZ et al., 2002).

A Tabela 2.4 traz alguns dados sobre a participação de cada processo no gerenciamento dos resíduos sólidos de alguns países.

Tabela 2.4 Gerenciamento dos resíduos sólidos em alguns países do mundo.

País	Processo				
	Incineração	Reciclagem	Compostagem	Recuperação	Aterro
Reino Unido <sup>(a)</sup>	2%	21%	7%		70%
Alemanha <sup>(b)</sup>	25%	-	-	30%	45%
Holanda <sup>(c)</sup>	8,7%	83,4%	2,3%	-	5,3%
Canadá <sup>(b)</sup>	14,2%		1,9%	-	83,9%
Japão <sup>(b)</sup>	74,3%	10,7%		-	14,9%
Suécia <sup>(b)</sup>	53%	18%	-	-	27%
Dinamarca <sup>(b)</sup>	58%	22%	-	-	20%
EUA <sup>(d)</sup>	14%	23,5%	7,1%	-	55,4%
China <sup>(e)</sup>	2%	10%	9%	-	79%
Portugal <sup>(f)</sup>	20,9%	3,4%	8,4%	-	67,3%
a) ADAMS, 2000    b) SAKAI et al., 1996    c) DWMA, 2005 d) EPA, 2003    e) WANG e NIE, 2001    f) MAGRINHO et al., 2006					

### 2.5.2 Definições

Embora pareça similar, há uma tênue diferença entre a gestão e o gerenciamento dos resíduos sólidos. Segundo LEITE (1997), “o conceito de gestão de resíduos sólidos abrange atividades referentes à tomada de decisões estratégicas e à organização do setor para esse fim, envolvendo instituições, políticas, instrumentos e meios”; já o termo gerenciamento de resíduos sólidos “refere-se aos aspectos tecnológicos e operacionais da questão, envolvendo fatores administrativos, gerenciais, econômicos, ambientais e de desempenho: produtividade e qualidade, por exemplo, e relaciona-se à prevenção, redução, segregação, reutilização, acondicionamento, coleta, transporte, tratamento, recuperação de energia e destinação final de resíduos sólidos”.

SCHALCH (2004) denomina gestão de resíduos sólidos ao conjunto de propostas, princípios, normas e funções que têm por objetivo controlar a produtividade e o manejo desses resíduos; e o gerenciamento desses resíduos, nada mais é que o conjunto de ações efetivamente empregadas para que os objetivos propostos na gestão sejam alcançados.

Assim, pode-se definir Modelo de Gestão de Resíduos Sólidos como um “conjunto de referências político-estratégicas, institucionais, legais e financeiras capaz de orientar a organização do setor”, ou seja, os componentes dos modelos de gestão envolvem fundamentalmente três aspectos: os **arranjos institucionais**, que contemplam os diversos órgãos (ministérios, agências, conselhos, dentre outros) nos diversos níveis (federal, estadual e municipal) que participam das tomadas de decisões na área de resíduos sólidos, os **instrumentos legais**, que contemplam os diversos textos legais (leis, decretos, resoluções, estatutos, dentre outros) abordando a questão dos resíduos sólidos, e por fim, os **mecanismos de financiamento**, que contemplam os fundos de financiamento, os quais dão o suporte financeiro para se executar as atividades relacionadas ao gerenciamento dos resíduos sólidos (LEITE, 1997). Esse Modelo de Gestão de Resíduos Sólidos parece ser seguido em uma grande maioria de países, conforme pode ser visto na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 Estrutura do Modelo de Gestão de Resíduos Sólidos em algum países do mundo

País	Arranjos institucionais	Instrumentos legais	Mecanismos de financiamento
Brasil <sup>(a)</sup>	- Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal - Agências estaduais e municipais	- Ver Anexo A	65% dos municípios brasileiros recebem do contribuinte algum dividendo pela coleta de lixo e limpeza urbana que geralmente vem inserido na mesma guia do Imposto Predial Territorial Urbano (IPTU). Outros municípios criaram uma taxa específica para a coleta de lixo, tendo como base a produção de lixo <i>per capita</i> em cada bairro e também o uso e a localização do imóvel.
Austrália <sup>(b)</sup>	- Ministério do Ambiente - Autoridade de Proteção Ambiental (agências estaduais)	- Ato de Gerenciamento e Minimização de Resíduos (1995) - Ato para a Recuperação de Recursos e Evitar Resíduos (2001)	Pagamento de taxa para o gerenciamento dos resíduos, de acordo com o material produzido.
Cingapura <sup>(c)</sup>	Ministério do Meio Ambiente	- Ato de Controle à Poluição Ambiental (abril/1999) - Ato de Saúde Pública e Meio Ambiente	Pagamento de uma taxa, que é fixa por residência, para o lixo doméstico e cobrada por volume para os demais usuários.
Japão <sup>(d)</sup>	Ministério da Saúde e do Bem-Estar	- Lei da Limpeza Pública e da Disposição de Resíduos (outubro/1991)	Normalmente os serviços de limpeza pública (coleta, reciclagem, tratamento e disposição final) são mantidos pelos usuários e por outras formas de financiamento que os governos provinciais e central se empenham em obter. <sup>e</sup>

Tabela 2.5 Estrutura do Modelo de Gestão de Resíduos Sólidos em alguns países do mundo – continuação

País	Arranjos institucionais	Instrumentos legais	Mecanismos de financiamento
Estados Unidos <sup>(f, g)</sup>	Agência de Proteção Ambiental	- Ato para Recuperação e Conservação dos Recursos (1976) - Ato para Disposição dos Resíduos Sólidos (1980) - Emenda para Resíduos Sólidos e Perigosos (1984)	O orçamento é sustentado por fundos formados pela cobrança de taxas, de onde pode-se destacar a taxa de propriedade, taxas de vendas aplicadas ao comércio, taxas de serviços municipais e taxas de arrecadação especial. Também é comum a cobrança de emolumentos do usuário, baseado nos custos de coleta, tratamento e disposição final. <sup>e</sup>
Botsuana <sup>(h)</sup>	Ministério do Governo das Terras Locais e Habitação	- Ato para o Gerenciamento dos Resíduos (1998)	Pagamento de uma taxa, para o gerenciamento do lixo doméstico, e quem solicitar o gerenciamento do lixo não doméstico por parte dos governos locais, pagará uma taxa adicional. Pagamento de multas para usuários que dispuserem seus resíduos em locais inapropriados para o mesmo.
Suécia <sup>(i)</sup>	Conselho Nacional de Proteção ao Meio Ambiente	- Ato de Proteção Ambiental (outubro/1994) - Regulamentações de Proteção Ambiental	A operação e a manutenção dos sistemas de gerenciamento dos RS, nos Estados-membros da Comunidade Européia, devem ser auto-sustentáveis, ou seja, é o próprio usuário dos serviços quem financia o sistema através do pagamento de tarifas e taxas, definidos por cada país da comunidade. <sup>e</sup>
Reino Unido <sup>(j)</sup>	- Governo Conservativo - Governo do Trabalho (maio/1999)	- Ato de Proteção Ambiental (1990) - Ato do Meio Ambiente (1995) - Melhor valor (1999)	A operação e a manutenção dos sistemas de gerenciamento dos RS, nos Estados-membros da Comunidade Européia, devem ser auto-sustentáveis, ou seja, é o próprio usuário dos serviços quem financia o sistema através do pagamento de tarifas e taxas, definidos por cada país da comunidade. <sup>e</sup>
China <sup>(k)</sup>	- Ministério da Construção (órgão majoritário) - Ministério do Comércio (reciclagem) - Administração Estadual de Proteção Ambiental (controle da poluição)	- Ato da Prevenção e Controle da Poluição dos Resíduos Sólidos ao Meio Ambiente (1995)	A gestão dos resíduos sólidos é considerado um serviço público e, portanto é pago pelo governo, nos níveis nacional e local. Entretanto, recentemente algumas cidades têm aplicado uma pequena taxa por família por mês pelo tratamento e disposição dos RS.
Portugal <sup>(l)</sup>	- Ministério do Ambiente (Instituto Nacional de Resíduos) - 30 Entidades de Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos; sistema de reciclagem chamado de Sistema Ponto Verde (SPV)	- Decreto-Lei 488/85 - Lei 11/87 - Decreto-Lei 310/95 - Portaria 15/96 - Decreto-Lei 239/97 - Plano estratégico dos resíduos sólidos urbanos (1997) - Decreto-Lei 366-A/97 - Decreto-Lei 152/2002	Há a aplicação do princípio poluidor-pagador, fazendo com que os produtores sejam responsáveis pela disposição final dos seus resíduos. <sup>1</sup> Como Portugal faz parte da Comunidade Européia, a operação e a manutenção dos sistemas de gerenciamento dos RS devem ser auto-sustentáveis, ou seja, é o próprio usuário dos serviços quem financia o sistema através do pagamento de tarifas e taxas, definidos por cada país da comunidade. <sup>e</sup>
a) MMA, 2007                      b) TERRY, 2004                      c) BAI e SUTANTO, 2002 d) SAKAI, 1996                    e) LEITE, 1997                      f) EIGHMY e KOSSON, 1996 g) LOUIS, 2004                    h) KGATHI e BOLAANE, 2001    i) HARTLÉN, 1996 j) ADAMS et al., 2000            k) WANG e NIE, 2001            l) MAGRINHO et al., 2006			

O modelo de gestão deverá ter como objetivos a preservação e/ou aumento da qualidade de vida da população, a preservação do meio ambiente, a promoção da sustentabilidade econômica das operações de limpeza urbana da cidade e a contribuição para a solução dos aspectos sociais envolvidos com a questão. Para o cumprimento desses objetivos, alternativas devem ser geradas, sendo que estas têm a obrigação de atender simultaneamente a duas condições fundamentais: que sejam as mais econômicas

e que sejam tecnicamente corretas para o ambiente e para a saúde da população (IBAM, 2001).

Uma vez definido o modelo de gestão dos resíduos sólidos, com seus respectivos arranjos institucionais, instrumentos legais e mecanismos de financiamento, deve-se ter uma estrutura para o gerenciamento desses resíduos, de acordo com o modelo de gestão adotado. Esse gerenciamento envolve uma complexa relação interdisciplinar, abordando diversas áreas do conhecimento, tais como aspectos políticos e geográficos, planejamento local e regional, elementos de sociologia e demografia, dentre outros, portanto, este deve ser realizado de forma integrada (LEITE, 1997).

Pode-se, por conseguinte, definir o gerenciamento integrado dos resíduos sólidos como *“o conjunto de ações normativas, operacionais, financeiras e de planejamento realizadas de maneira articulada por uma administração (municipal, estadual, federal, economia mista, etc), apoiada em critérios sanitários, ambientais e econômicos, para coletar, tratar e dispor o lixo de uma cidade, ou seja, é acompanhar de forma criteriosa todo o ciclo dos resíduos, da geração à disposição final, empregando técnicas e tecnologias compatíveis à realidade do local”* (LEITE, 1997).

Uma outra definição é dada pelo Instituto Brasileiro de Administração Municipal onde o gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos *“é o envolvimento de diferentes órgãos da administração pública e da sociedade civil com o propósito de realizar a limpeza urbana, a coleta, o tratamento e a disposição final do lixo, elevando assim a qualidade vida da população e promovendo o asseio da cidade, levando em consideração as características das fontes de produção, o volume e os tipos de resíduos (para a eles ser dado tratamento diferenciado e disposição final técnica e ambientalmente corretas), as características sociais, culturais e econômicas dos cidadãos e as peculiaridades demográficas, climáticas e urbanísticas locais”* (IBAM, 2001).

Observa-se que em todas as definições até agora apresentadas, as questões relativas à minimização de resíduos não são abordadas, ficando nítida a concepção de que gerenciar resíduos sugere apenas a adoção de medidas de controle. A inserção de diretrizes, na gestão e no gerenciamento dos resíduos sólidos, que promovam a minimização da geração desses resíduos se apresenta indispensável.

Então, para que se tenha um gerenciamento integrado, as ações normativas, operacionais, financeiras e de planejamento e prevenção, que envolvem os resíduos sólidos urbanos, devem estar estreitamente interligadas e devem se processar de modo

articulado. Além dessas ações, no gerenciamento integrado devem-se contemplar questões econômicas e sociais, ou seja, têm-se a obrigação de se atentar para as políticas públicas que estão associadas ao gerenciamento do lixo, sejam elas de âmbito da saúde, do trabalho e renda, do planejamento urbano, dentre outras (IBAM, 2001).

Para os países em desenvolvimento, segundo BUENROSTRO e BOCCO (2003), uma séria limitação para o bom funcionamento do sistema integrado de resíduos é a falta de organização administrativa no sistema público sanitário, por consequência de uma ausência de planejamento e de uma má gestão por parte de funcionários, que geralmente possuem um baixo nível educacional e pouco treinamento em gerenciamento de resíduos. Esse último ponto resulta nos baixos salários pagos pelo setor e, conseqüentemente, atraem pessoas que não têm as qualificações apropriadas.

No gerenciamento integrado, devem ser propagados programas de educação ambiental, enfocando a redução da geração de lixo, a redução de desperdício, o reaproveitamento e a reciclagem de materiais e ainda um correto acondicionamento dos resíduos gerados. Tais programas devem sensibilizar os cidadãos a ter uma responsabilidade ambiental, não como uma tarefa imposta por razões burocráticas mas como um exercício de cidadania.

Apesar desses programas serem mais dirigidos à população, convém que também sejam estendidos aos demais agentes envolvidos na gestão, dentre eles: os grandes geradores, responsáveis pelos próprios rejeitos; os catadores, organizados em cooperativas, que atendem à coleta de recicláveis; os estabelecimentos, que tratam da saúde, gerenciando seus resíduos de forma diferenciada e; à própria prefeitura, que através de seus funcionários, instituições e empresas contratadas, atua como protagonista no gerenciamento integrado do sistema (IBAM, 2001).

Um exemplo de aplicação desses conceitos foi realizado em Botsuana, onde o modelo de gestão adotado possui a estrutura acima apresentada, com os arranjos institucionais, os instrumentos legais e os mecanismos de financiamento, sendo ainda desenvolvida uma política de educação ambiental, a qual envolve a sensibilização da população para problemas ambientais, através de iniciativas, como por exemplo, a promoção do uso e re-uso de sacolas de tecido ao invés das de plástico, tentando torná-la ambientalmente mais responsável (KGATHI e BOLAANE, 2001).

### 2.5.3 Arranjos institucionais para gestão de resíduos sólidos

Como pode ser visto na Tabela 2.5, o modelo dos arranjos institucionais apresentado pela grande maioria dos países onde dados bibliográficos foram encontrados, segue um padrão hierárquico, onde os órgãos federais trabalham em sintonia (pelo menos devem!) com outros órgãos (estaduais, municipais, provincianos, dentre outros). Não diferente, o Brasil também segue tal modelo, conforme abaixo descrito.

Com a Lei Federal 6.938 de 31/08/1981 foi criado o SISNAMA (Sistema Nacional do Meio Ambiente) que representa um conjunto de órgãos, entidades, regras e práticas da união, estados, municípios e distrito federal, que são responsáveis pelo meio ambiente. O SISNAMA conta com os órgãos e entidades de escopo municipal, estadual e federal, estando estruturado conforme abaixo (SGS, 2005):

a) órgão superior – Conselho do Governo: a sua função é auxiliar o Presidente da República na formulação da Política Nacional do Meio Ambiente;

b) órgão consultivo e deliberativo – CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente: a sua finalidade é estudar e propor diretrizes e políticas governamentais para o meio ambiente e deliberar na abrangência de sua competência, sobre normas, padrões e critérios de controle ambiental, intercedendo por intermédio de suas resoluções;

c) órgão central - Ministério do Meio Ambiente, Recursos Hídricos e da Amazônia Legal: encarregado de planejar, coordenar e supervisionar as ações relativas à política nacional do meio ambiente;

d) órgão executor – IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis: entidade com personalidade jurídica de direito público e autonomia administrativa. É encarregado da execução da política nacional do meio ambiente e sua fiscalização;

e) órgãos seccionais: são entidades estaduais responsáveis pela execução de programas e projetos de controle e fiscalização das atividades potencialmente poluidoras. Exemplos: Secretarias do Meio Ambiente, CETESB/SP, FEEMA/RJ;

f) órgãos locais: são órgãos ou entidades municipais responsáveis por avaliar e estabelecer normas, critérios e padrões relativos ao controle e manutenção da qualidade do meio ambiente.

No Brasil, tradicionalmente cabe aos municípios gerir os resíduos sólidos produzidos em seu território, com exceção dos resíduos industriais, uma vez que a Lei Nacional do Meio Ambiente (Lei nº 6.938 de 31/08/1981) responsabiliza o gerador pela

manipulação e destino final de seu resíduo (princípio poluidor-pagador). Entretanto, cabe aos órgãos de controle ambiental dos estados e municípios interferir no problema de forma suplementar, através da fiscalização, exigindo um adequado manuseio, estocagem, transporte e destinação final desses resíduos (IBAM, 2001).

O sistema de limpeza urbana das cidades pode ser administrado de três maneiras: diretamente pelo município, através de empresa pública específica e através de uma empresa de economia mista criada para desempenhar especificamente essa função. Os serviços podem ser ainda objetos de concessão ou terceirização junto à iniciativa privada. Na concessão, a concessionária planeja, organiza, executa e coordena o serviço, podendo inclusive terceirizar operações e arrecadar os pagamentos referentes à sua remuneração, diretamente junto ao usuário/beneficiário dos serviços. Já na terceirização, a prefeitura exerce as funções administrativas, tais como planejamento, coordenação e fiscalização, deixando às empresas privadas a operação propriamente dita. Existe ainda a possibilidade de consórcio com outros municípios, sendo utilizado principalmente para a destinação final dos resíduos (IBAM, 2001).

Dados da ABRELPE (2006) indicam que 47,6% dos municípios brasileiros fazem o gerenciamento de seus resíduos urbanos por conta própria, entretanto 41,9% terceirizaram tais serviços e 6,7% fazem o gerenciamento sobre o sistema de concessão.

Esse tipo de parceria entre os setores público e privado, como é o caso da terceirização, é uma alternativa que apresenta suas vantagens, uma vez que os pontos positivos do setor privado (dinamismo, acesso à financiamento, conhecimento de novas tecnologias, gerenciamento eficiente e espírito empreendedor) são combinadas com a responsabilidade social, consciência ambiental, conhecimento local e com a preocupação com a geração de empregos oriundas do setor público (AHMED e ALI, 2004).

Os governantes estão cada vez mais se conscientizando que não podem controlar o gerenciamento dos resíduos sozinhos. Para responder a essa demanda, cada vez mais companhias privadas estão trabalhando em parcerias com os governos no desenvolvimento de programas de gerenciamento de resíduos (HOORNWEG, 2000). Segundo AHMED e ALI (2004), este processo ocorre naturalmente para os países em desenvolvimento, uma vez que com a inserção de empresas privadas no setor, é estimulada a competitividade, gerando uma redução nos custos de operação e uma maior eficiência no fornecimento do serviço.

Entretanto, com a necessidade da prefeitura de garantir recursos para cobrir as despesas com este serviço, que para algumas cidades chega a mais de 20% do orçamento do município, alguns municípios instituíram a cobrança de taxas pelos serviços de limpeza urbana e coleta de lixo. Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) de 2000 (IBGE, 2002), 45,4% dos municípios brasileiros cobram pelos serviços de limpeza urbana e coleta de lixo, sendo que para os municípios com mais de 200.000 habitantes, esse percentual sobe para acima de 75%. Os dados apresentados pela ABRELPE (2006) são bastante semelhantes, uma vez que segunda tal pesquisa, 64,8% dos municípios brasileiros cobram algum tributo específico (taxa de lixo ou de limpeza pública) como fonte de recursos para esses serviços.

Quanto aos resíduos industriais, que são responsabilidade dos fabricantes, supõe-se que, quando uma indústria comercializa um determinado produto, os custos provenientes da correta disposição final dos resíduos produzidos na sua fabricação, já estejam embutidos no seu preço de venda (IBAM, 2001).

#### 2.5.4 Instrumentos legais para gestão de resíduos sólidos

Para que haja um desenvolvimento das operações do sistema de limpeza urbana nos municípios com qualidade e um programa bem estruturado de educação ambiental, se faz necessário a existência de instrumentos legais que os fundamentem. Esses instrumentos podem ser de três formas (IBAM, 2001):

- de ordem política e econômica, que estabelece as formas legais de institucionalização dos gestores do sistema e as formas de remuneração e cobrança dos serviços;

- um código de posturas, que orienta, regula, dispõe procedimentos e comportamentos corretos por parte dos contribuintes e dos agentes de limpeza urbana, definindo também penas e multas para as infrações cometidas e;

- um aparato legal, para regular os cuidados com o meio ambiente e, em especial, para a implantação de atividades que apresentem risco para a saúde pública e para o meio ambiente.

No Brasil existe uma série de textos normativos, nas esferas federal, estadual e municipal, que evidenciam uma enorme preocupação com o meio ambiente e, especificadamente, com o manejo dos resíduos sólidos urbanos. O Anexo A traz uma

lista com as principais leis, decretos, resoluções e normas brasileiras voltadas à proteção ambiental e aos resíduos sólidos.

Não diferente do Brasil, outros países também dispõem de diversos instrumentos para que os objetivos planejados no plano de gestão e gerenciamento de resíduos sólidos sejam concretizados. Países como Dinamarca (HJELMAR, 1996), Alemanha (VEHLOW, 1996), Suécia (HARTLÉN, 1996), Cingapura (BAI e SUTANTO, 2002), Botsuana (KGATHI e BOLAANE, 1996), Estados Unidos (EIGHMY e KOSSON, 1996; ADAMS et al., 2000), Japão (SAKAI, 1996), China (WANG e NIE, 2001), Portugal (MAGRINHO et al., 2006), dentre outros, já possuem seus instrumentos legais que determinam as diretrizes que devem ser seguidas pelos usuários e prestadores dos serviços de coleta, manejo, tratamento e disposição final dos resíduos.

Um outro instrumento que também é utilizado no gerenciamento dos resíduos, adotado em diversos países, é o chamado “selo verde”, onde se informa e se encoraja os consumidores a escolher produtos que são ambientalmente amigáveis, ajudando a criar um mercado que incentive as indústrias a desenvolverem produtos dessa natureza (BAI e SUTANTO, 2002).

Um outro exemplo vem do Reino Unido, onde a aplicação de uma legislação denominada “Melhor Valor” tem melhorado o gerenciamento dos resíduos. Tal legislação obriga os governantes locais a consultar a população sobre os serviços de gerenciamento dos resíduos prestados pelas empresas contratadas e o resultado da consulta é usado como um dos fatores decisórios para continuação e recontração das empresas. O emprego desse instrumento exige que as empresas melhorem continuamente seus serviços na gestão dos resíduos, tanto em termos de custo quanto em qualidade (ADAMS et al., 2000).

#### 2.5.5 Mecanismos de financiamento para gestão de resíduos sólidos

Em vários países do mundo, a gestão dos resíduos sólidos é considerada um serviço público, sendo portanto totalmente custeado pelo governo. Entretanto, uma correta e eficiente gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos exige relevantes recursos financeiros que nem sempre as administrações públicas estão aptas ou dispostas a pagar, portanto na maioria dos países que adotam essa filosofia, a gestão e o gerenciamento desses resíduos ocorre de forma ineficiente.

Sabendo que a sustentabilidade econômica é um importante fator para garantir a qualidade dos serviços de limpeza urbana, alguns países têm defendido a implementação do sistema “pague pelo quanto que você joga fora<sup>5</sup>” ou simplesmente sistema “poluidor-pagador”. Tal sistema consiste em tributar o gerador do resíduo na proporção do volume descartado.

Essa abordagem possui um outro significado bastante relevante onde, conceitualmente, a cobrança de uma taxa deveria encorajar as pessoas a reduzir a geração de resíduos e a reciclar sempre que possível.

Como já foi mencionado, no Brasil, 45,4% dos municípios recebem do contribuinte algum dividendo pela coleta de lixo e limpeza urbana. Geralmente esses valores são inseridos na mesma guia do Imposto Predial Territorial Urbano (IPTU), através de uma taxa que tem a mesma base de cálculo deste imposto (a área do imóvel). Como não se pode ter mais de um tributo com a mesma base de cálculo, essa taxa foi considerada inconstitucional pelo Supremo Tribunal Federal e desde então sua cobrança vem sendo contestada em várias cidades brasileiras (IBAM, 2001).

Essa dificuldade em arrecadar recursos repercute diretamente no serviço prestado à população, gerando um efeito seletivo, onde se prioriza os setores comerciais, as unidades de saúde e a população de renda mais alta, raramente atendendo às áreas mais carentes.

Um exemplo de mudança na forma de arrecadação para sustentar os serviços de limpeza urbana foi aplicada na cidade do Rio de Janeiro, onde se criou a taxa de coleta de lixo, tendo como base a produção de lixo *per capita* em cada bairro da cidade e também o uso e a localização do imóvel, criando um diferencial de sete vezes entre a taxa mais alta e a mais barata cobrada (IBAM, 2001).

## **2.6 Etapas operacionais do gerenciamento dos resíduos sólidos**

Como já mencionado, primeiramente deve-se buscar a minimização da geração dos resíduos ou até mesmo a sua não geração. Entretanto, sabe-se que raros são os processos produtivos de rendimentos máximos, ou seja, na sua grande maioria, sempre se tem a produção de resíduos.

---

<sup>5</sup> Do inglês: “pay as you throw” (PAYT)

No século XIX, a cidade de Nova York já adotava a abordagem que hoje é conhecida como gerenciamento de resíduos, através da varrição, separação na fonte, coleta, transporte, recuperação de recursos e disposição final (LOUIS, 2004). Nos dias de hoje, algumas cidades ainda focam seus esforços somente na coleta, no transporte e na disposição final desses resíduos, sendo estas geralmente localizadas em países em desenvolvimento.

Como exemplo, tem-se as cidades quenianas e indianas, que coletam somente em torno de 50% a 70% dos resíduos sólidos gerados, ainda que consumindo de 30% a 95% do orçamento destinado ao gerenciamento dos mesmos (HENRY et al., 2006; SHARHOLY et al., 2007). No Brasil, dados da ABRELPE (2006) apontam que 94,4% dos RSU são coletados.

Para outros municípios, entretanto o desafio é a separação dos diversos tipos de resíduos sólidos já na fonte, como é o caso das cidades portuguesas, onde geralmente cerca de 96% dos RSU coletados vêm misturados (MAGRINHO et al., 2006). De uma maneira geral, a abordagem dada ao gerenciamento dos RSU atualmente é similar à utilizada no passado, com as mesmas etapas operacionais, entretanto inseriu-se uma etapa que marca a diferença entre as épocas: o tratamento dos resíduos.

Então, simplificadamente, no momento presente, as principais etapas operacionais do gerenciamento dos RS, após a separação dos diversos tipos de resíduos e um correto acondicionamento dos mesmos em recipientes adequados, são a coleta, o transporte, a recuperação/reciclagem, o tratamento e por fim, uma correta destinação final dos resíduos já tratados.

Obviamente que dependendo do tipo de resíduo, a execução de cada uma dessas etapas pode ser feita de maneira diferente, incorporando-se ou excluindo-se algum estágio ou processo. De uma maneira geral, todas as etapas se dispõem a um mesmo fim: a manutenção da saúde e da qualidade de vida da população.

Um dos maiores temas de pesquisa atualmente é o tipo de tratamento que se dá aos resíduos. Normalmente, países de pequeno espaço físico tratam seus resíduos através da incineração. A reciclagem nestes países aparece de maneira mais discreta, embora tenha um importante papel social pois gera renda para muitas pessoas. (METIN et al., 2003).

Entretanto, parece haver uma tendência nos países em que à medida que os mesmos vão se industrializando e se desenvolvendo, as etapas operacionais do sistema de gestão e gerenciamento dos seus resíduos sólidos também vão se modificando,

passando de limitadas etapas de reciclagem, combustão sem recuperação de energia e aterros sem coleta e controle dos gases e líquidos produzidos, para sistemas bem estruturados de reciclagem, compostagem, incineração com recuperação de energia e aterros com coleta, controle e utilização de gases e líquidos percolados (WEITZ et al., 2002).

Uma vez que não é do escopo deste trabalho explicar minuciosamente a respeito das etapas operacionais do gerenciamento dos resíduos sólidos, buscou-se compilar as principais tarefas realizadas em cada etapa, através de diagramas de blocos, para dois dos principais tipos de resíduos sólidos urbanos (os RS domiciliares, pela sua quantidade em relação ao total de RSU e os RSS, que embora componham uma parcela pequena dos RSU, são importantes em função do risco que apresentam à sociedade, caso não sejam bem gerenciados) e para os resíduos industriais, conforme pode ser observado nas Figuras 2.3, 2.4 e 2.5, respectivamente.

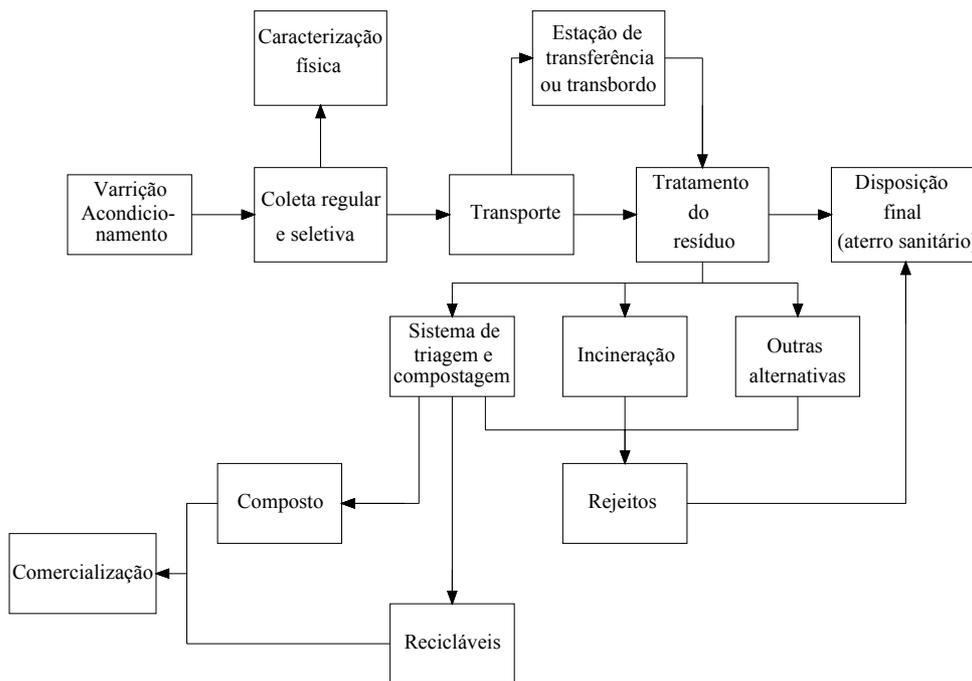


Figura 2.3 Esquema das etapas operacionais do gerenciamento dos resíduos sólidos domiciliares (adaptado de SCHALCH, 2002)

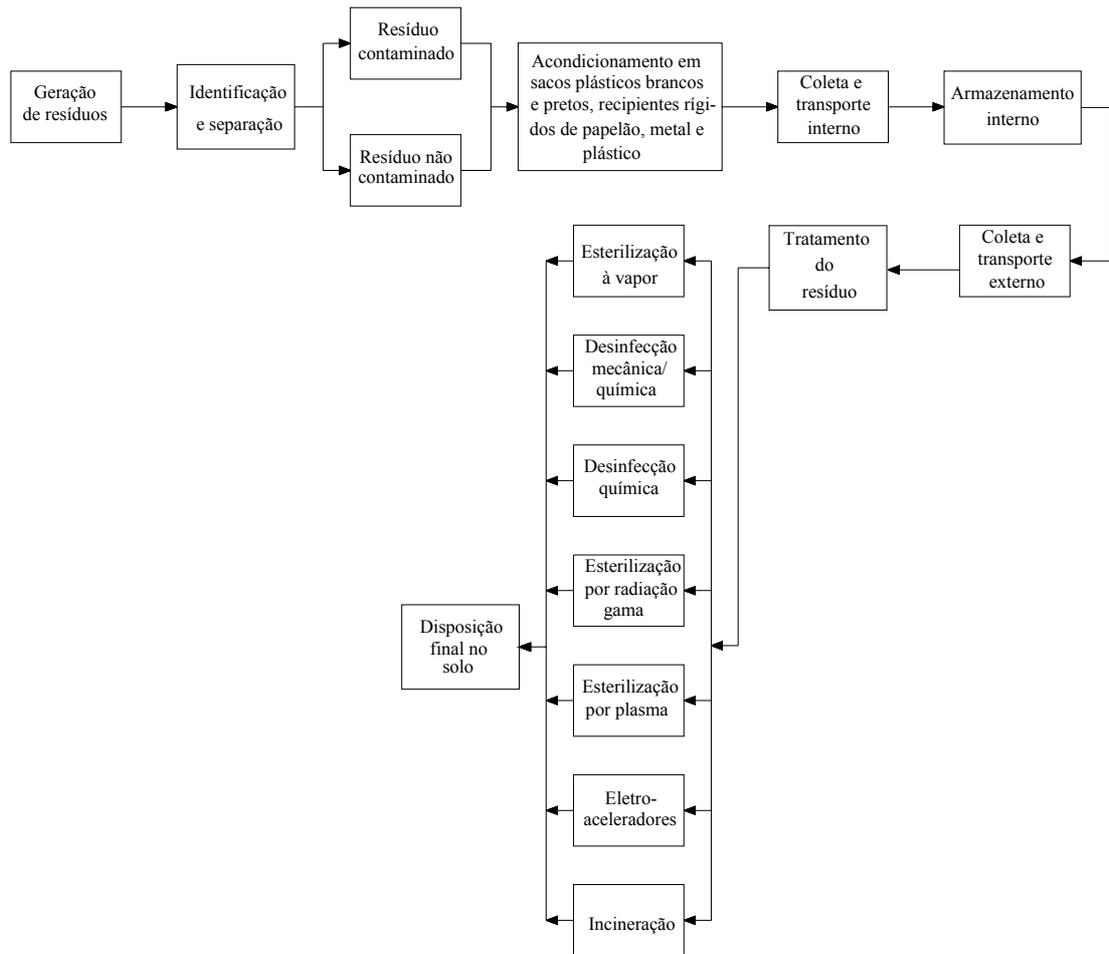


Figura 2.4 Esquema das etapas operacionais do gerenciamento dos resíduos sólidos de serviço de saúde (adaptado de SCHALCH, 2002 e ANDRADE, 1997)

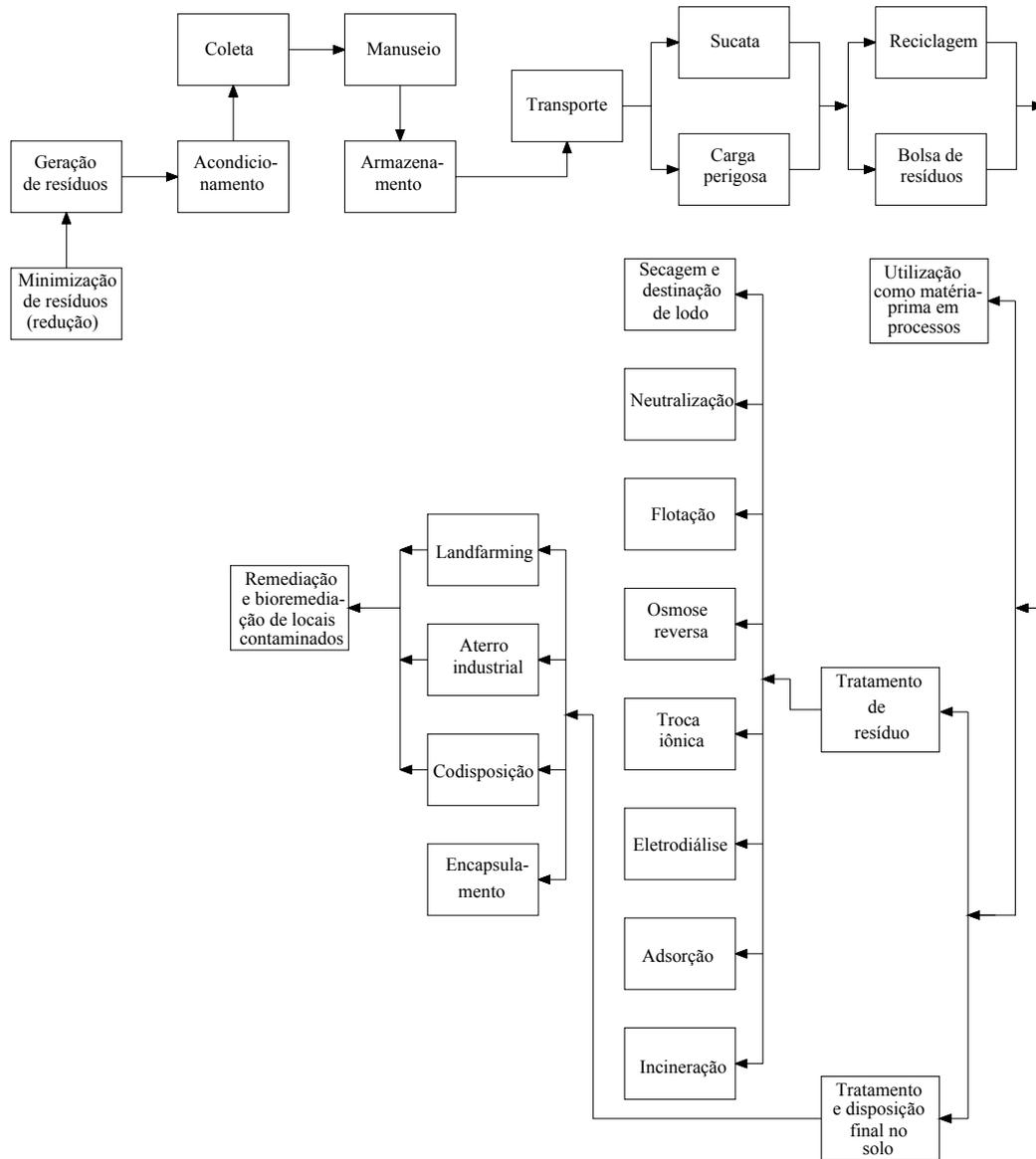


Figura 2.5 Esquema das etapas operacionais do gerenciamento dos resíduos sólidos industriais (SCHALCH, 2002)

## 2.7 Considerações finais

Atualmente os resíduos sólidos são gerados em enorme quantidade em nossa sociedade e representam uma considerável fonte de problemas se não gerenciados com propriedade. Uma correta classificação e caracterização desses resíduos é parte fundamental para um apropriado gerenciamento dos mesmos. Dentre as subdivisões dos resíduos sólidos, o resíduo das atividades da indústria da construção civil é uma parte relevante sendo, portanto, pertinente um maior detalhamento sobre o mesmo.

## **CAPÍTULO 3 – CONSIDERAÇÕES SOBRE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

3.1 Considerações iniciais

3.2 Definição, classificação, geração e composição dos resíduos da construção civil

3.3 Gestão e gerenciamento dos resíduos da construção civil

3.3.1 Coleta e transporte dos resíduos da construção civil

3.3.2 Tratamento e disposição final dos resíduos da construção civil

3.4 Considerações sobre a reciclagem dos resíduos de construção e demolição

3.4.1 Classificação dos agregados reciclados de resíduo de construção e demolição

3.4.2 Considerações sobre a produção dos agregados reciclados de resíduo de construção e demolição

3.4.3 Considerações sobre os agregados reciclados de concreto

3.4.4 Características dos agregados reciclados dos resíduos da construção civil

3.4.4.1 Quanto à porosidade e à absorção de água

3.4.4.2 Quanto à massa unitária e à massa específica

3.4.4.3 Quanto a outras características

3.5 Considerações finais

### **3. CONSIDERAÇÕES SOBRE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

#### **3.1 Considerações iniciais**

A indústria da construção civil é um setor produtivo que possui considerável papel na economia do Brasil. Entre os anos de 1980 e 1996, o setor foi responsável por 65% da formação do investimento bruto nacional. Em 1999, o setor já alcançava a marca de 70% do investimento da economia brasileira (CONSTRUBUSINESS, 1999 citado por NETO, 2005). No ano de 2001, o setor foi responsável por 15,6% do PIB, sendo que as edificações residenciais representaram um montante entre 6% e 9% do PIB nacional (NETO, 2005).

Para alavancar tamanha grandiosidade, a indústria da construção civil é atualmente a maior consumidora de recursos naturais da sociedade, absorvendo de 20 a 50% desses recursos explorados no mundo (JOHN, 2001). No caso da madeira, a Indústria da Construção Civil consome aproximadamente 2/3 de toda a madeira natural extraída da natureza (ZORDAN, 1997).

As atividades de construção demandam uma notável quantidade de materiais inertes, tais como areia e cascalho, que usualmente são fornecidos através da extração de sedimentos aluviais. A extração desses sedimentos modifica o perfil dos rios e o seu equilíbrio, além de introduzir problemas ambientais, tais como modificações em sua estrutura hidrológica e hidrogeológica. A extração de material inerte de formações rochosas em áreas acidentadas e montanhosas também é uma perigosa atividade ao meio ambiente, uma vez que altera a paisagem e potencialmente provoca problemas de estabilidade nas mesmas (BIANCHINI et al., 2005). Segundo TU et al. (2006), se nada for feito, a indústria do concreto irá consumir anualmente de 8 a 12 bilhões de toneladas de agregados naturais até o ano 2010.

Como em todo processo industrial, o uso dos insumos da indústria da construção civil gera resíduos, e em grande escala, que necessitam ser gerenciados. Segundo JOHN

(2001), o macrocomplexo da indústria da construção civil é responsável por 40% dos resíduos gerados na economia. Em 1992, era estimada a produção de aproximadamente 50 milhões de toneladas de resíduos das atividades da construção civil na comunidade europeia, 60 milhões nos Estados Unidos e 12 milhões somente no Japão (HANSEN, 1992). Em Taiwan, é estimada a geração anual de 640.000 toneladas de resíduos somente de concreto (LIN et al., 2004); no Iran, em 1994, eram produzidos cerca de 350 mil toneladas de resíduos de cerâmica vermelha, como tijolos e telhas (KHALOO, 1994), enquanto que em Hong Kong, em 2004, foram gerados em torno de 20 milhões de toneladas de RCD (POON, 2007). SENTHAMARAI e MANOHARAN (2005) estimam que 30% da produção diária da indústria cerâmica da Índia torna-se resíduo.

Na Austrália, os resíduos da indústria da construção civil correspondem a aproximadamente 37% do total de resíduos sólidos produzidos (TERRY, 2004). Dados da Autoridade de Proteção Ambiental (EPA) da Austrália apontam que são produzidos em torno de 15 milhões de toneladas desses resíduos por ano naquele país (RAVINDRARAJAH et al., 2000), sendo que nas grandes cidades australianas, estes correspondem de 11 a 15% do total de resíduos enviados aos aterros (SHAYAN e XU, 2003).

Em Hong Kong, no Kuwait e no Reino Unido, este tipo resíduo corresponde a 38%, 58% e 60%, respectivamente (TAM e TAM, 2006; RAHAL, 2007; DHIR et al., 2004a) de todo o resíduo sólido produzido, enquanto que no Brasil, este número se aproxima de 50% (PINTO, 1999; FREITAS et al., 2003; SARDÁ e ROCHA, 2003). Nos Estados Unidos, estima-se que os RCD correspondem de 10 a 30% do total de resíduos gerados no país (BROVIAK, 2005).

Para se ter uma idéia da grandeza da geração desses resíduos, no Reino Unido este setor produz em torno de 109 milhões de toneladas por ano, sendo que esta quantidade equivale a 66% dos 165 milhões de toneladas de agregados naturais consumidos anualmente na construção civil (DHIR et al., 2004a). Entretanto, os agregados reciclados correspondem a aproximadamente 25% do total dos agregados utilizados no país, sendo que em torno de 65% destes são utilizados como material de sub-base e de enchimento e 17% na produção de asfaltos (BARRITT, 2006). Segundo LAMOND et al. (2002), somente aproximadamente 123 milhões de toneladas de resíduo de concreto são reutilizados na Comunidade Europeia, Estados Unidos e Japão.

Várias são as fontes geradoras dos resíduos na construção civil, podendo-se destacar:

- as perdas no processo construtivo, sejam por deficiência da tecnologia utilizada, pela baixa qualidade da mão-de-obra empregada, pelo detalhamento insuficiente em projetos, pela utilização de produtos defeituosos, ocasionando a superprodução ou a substituição de materiais e componentes, ou seja, perdas que geram desperdício de material que saem das obras na forma de entulhos. Segundo LAURITZEN (1994), citado por KARTAM et al. (2004), na construção de edifícios, aproximadamente de 20 a 50 kg de resíduos são produzidos por metro quadrado de pavimento construído;

- a falta de qualidade dos materiais e serviços executados que levam ao mau funcionamento da edificação, acarretando o aparecimento de manifestações patológicas, que, quando corrigidas, geram entulhos (LEITE, 2001);

- o crescimento populacional, que demanda por novas moradias, as quais, quando são construídas, geram resíduos;

- a demolição de edificações que sua vida útil já se exauriu. Entenda-se aqui vida útil não só como o tempo em que a edificação satisfaz a critérios técnicos de desempenho (capacidade estrutural, por exemplo), pois a edificação também está sujeita a uma degradação social, que pode ser entendida como mudanças nas necessidades dos usuários com o decorrer do tempo. Segundo LAURITZEN (1994), citado por KARTAM et al. (2004), pode-se considerar a geração de uma a duas toneladas por metro quadrado de pavimento demolido;

- as grandes catástrofes mundiais, sejam elas de origens naturais ou antropogênicas (guerras, terremotos, tsunamis, dentre outras). Na Alemanha, durante o período de reconstrução imediatamente após à 2ª guerra mundial, era necessário satisfazer à enorme demanda por materiais de construção, além de remover todo o entulho das cidades destruídas, que era estimado em 400 a 600 milhões de m<sup>3</sup> (KHALAF e DeVENNY, 2004). Segundo HANSEN (1992), até o final de 1955 foram utilizados em torno de 11,5 milhões de m<sup>3</sup> de reciclados de resíduos da construção civil na edificação de, aproximadamente, 175 mil unidades habitacionais. Na Turquia, estima-se que foram gerados aproximadamente 13 milhões de toneladas após o grande terremoto de 1999, que destruiu várias casas e edifícios. (ESIN e COSGUN, 2007). Mais recentemente, após a devastadora tsunami de 26 de dezembro de 2004, 99.500 casas foram totalmente destruídas e 46.300 sofreram danos, somente no Sri Lanka. Estima-se que a quantidade de entulho gerada chegou a 300 mil toneladas

(PILAPITIYA et all, 2006) e que serão necessários US\$1,5 bilhões para reconstruir e recuperar totalmente o país (WOLF, 2005).

Devido ao importante papel da indústria da construção civil no desenvolvimento das nações, é conveniente que se busquem e adotem medidas urgentes para inserir as atividades desenvolvidas por este setor no novo modelo de desenvolvimento que se procura, o desenvolvimento sustentável. Para TERRY (2004), a legislação é o maior fator que afeta o gerenciamento de resíduos na indústria da construção civil. Sem uma legislação efetiva em vigor e uma forte fiscalização e cobrança, não é possível montar nenhum esquema de gerenciamento de resíduos.

*“Nenhuma sociedade poderá atingir o desenvolvimento sustentável sem que a construção civil, que lhe dá suporte, passe por profundas transformações”* (JOHN, 2001).

### **3.2 Definição, classificação, geração e composição dos resíduos da construção civil**

No capítulo anterior tem-se a definição de resíduos sólidos (RS) através da norma *NBR 10.004 – Resíduos Sólidos – Classificação*. Observa-se que o resíduo da indústria da construção civil não está explicitamente incluído dentro da definição de RS desta norma, contudo não há dúvidas que este o é. Pela definição da norma, pode-se incluí-lo como um resíduo industrial, uma vez que provém da indústria da construção civil, entretanto talvez seja mais prudente incluí-lo como um resíduo que resulta de atividades de serviços.

A Resolução 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), a qual dispõe sobre a gestão dos resíduos da construção civil, define que estes resíduos *“são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica, dentre outros, comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha”* (MMA, 2007).

Estima-se que a maioria dos resíduos da construção civil seja proveniente de serviços de demolição e dos canteiros de obra, ou seja, dos serviços de construção (PINTO, 1999), daí também chamar os resíduos da construção civil de resíduos de

construção e demolição (RCD). Essa denominação é igualmente utilizada em outros países do mundo. Por exemplo, em concordância com a estimativa acima citada, BAKOSS e RAVINDRARAH (1999) apontam que 55% dos resíduos produzidos por este setor na Austrália provêm de serviços de demolição enquanto que 40% provêm dos de construção.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através da *NBR 10.004/04 – Resíduos Sólidos – Classificação*, classifica os resíduos sólidos em Resíduos Classe II B (não perigosos e inertes) quando estes, ao serem “*submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente [...], não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor*”.

Existe uma grande tendência em se classificar os resíduos de construção e demolição como resíduos inertes, em função da grande quantidade de componentes minerais não poluentes e inertes quimicamente, entretanto essa tendência já é vista com certo receio, pois tais resíduos podem estar contaminados com materiais de pintura, substâncias de tratamento de superfícies, ou até mesmo metais pesados, que podem lixiviar e contaminar a água e o solo.

OLIVEIRA (2002) concluiu em sua pesquisa que os resíduos de construção civil constituídos exclusivamente de resíduos de concreto mineralizam a água e alteram o solo, ou seja, são não-inertes, sugerindo que estes sejam classificados como resíduos Classe II A (não perigosos e não inertes). HANSEN (1992) também menciona que os RCD podem conter componentes, os quais são considerados tóxicos do ponto de vista ambiental. Então, parece que esses resíduos podem ser classificados como inertes ou não-inertes, dependendo apenas da origem e constituição do mesmo.

A Resolução 307 do CONAMA classifica os resíduos da construção civil em 4 classes (MMA, 2007):

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

a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infra-estrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;

b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento, dentre outros), argamassa e concreto;

c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios, dentre outras) produzidas nos canteiros de obras.

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

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

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

Um ponto que demonstra a relevância dos resíduos de construção e demolição é a sua crescente participação no total dos resíduos sólidos urbanos. Exemplificando, dados da cidade de Salvador apontam que de 1990 para o ano 2000, o entulho aumentou a sua participação na composição dos resíduos sólidos urbanos (RSU) de 4,4% para 49,8% (QUADROS e OLIVEIRA, 2001).

Essa tendência parece ocorrer em outras partes do mundo, uma vez que em Hong Kong, a indústria da construção produz aproximadamente 37.100 toneladas de resíduos todos os dias, o que corresponde a quatro vezes mais que os resíduos domésticos lá produzidos (POON et al., 2004), enquanto que na Malásia, esses resíduos correspondem juntamente com os resíduos industriais a 28% do total dos RSU, enquanto que o resíduo doméstico totaliza 37% do total (BEGUN et al., 2006).

Diversas pesquisas apontam que os resíduos de construção civil representam atualmente em torno de 50% do total dos RSU produzidos em cidades brasileiras, com uma taxa média de geração em torno de 0,52 tonelada/habitante.ano (PINTO, 1999; FREITAS et al., 2003; SARDÁ e ROCHA, 2003; SILVEIRA, 1993 e XAVIER, 2000, citados por NETO, 2005).

Na Europa, há controvérsias sobre a geração de RCD, uma vez que HENRICHSEN (2000) estima que a taxa média varia entre 0,6 e 2,0 tonelada/habitante.ano, estimando que 1,0 tonelada é a potencial quantidade lá produzida, enquanto que o relatório final da *European Thematic Network* (ETNRC, 1999) aponta uma geração de 0,48 tonelada/habitante.ano.

Já nos Estados Unidos, a provável taxa de geração de RCD nos anos 90 era de 0,43 tonelada/habitante.ano (HANSEN, 1992) enquanto que no Kuwait essa taxa varia de 1,1 a 1,8 toneladas/habitante.ano nos dias de hoje (KARTAM et al., 2004). Essa

elevada taxa apresentada pelo Kuwait, quando comparada com as demais taxas internacionais, provavelmente é devido ao alto nível de atividades construtivas realizadas após a Guerra do Golfo e ao baixo gerenciamento dos materiais da construção civil nas obras do país.

A Tabela 3.1 sumariza a quantidade de RCD coletados e reciclados/reutilizados na União Européia, nos Estados Unidos e no Kuwait, enquanto que na Tabela 3.2 encontram-se dados de algumas cidades brasileiras.

Tabela 3.1 Quantidade de RCD coletado e reciclado na União Européia, Estados Unidos e Kuwait (ETNRC, 1999; HANSEN, 1992; KARTAM et al., 2004).

País	RCD (Mt/ano)	% reutilizada ou reciclada
Alemanha <sup>(a)</sup>	59	17
Reino Unido <sup>(a)</sup>	30	45
França <sup>(a)</sup>	24	15
Itália <sup>(a)</sup>	20	9
Espanha <sup>(a)</sup>	13	<5
Holanda <sup>(a)</sup>	11	90
Bélgica <sup>(a)</sup>	7	87
Áustria <sup>(a)</sup>	5	41
Portugal <sup>(a)</sup>	3	<5
Dinamarca <sup>(a)</sup>	3	81
Grécia <sup>(a)</sup>	2	<5
Suécia <sup>(a)</sup>	2	21
Finlândia <sup>(a)</sup>	1	45
Irlanda <sup>(a)</sup>	1	<5
Luxemburgo <sup>(a)</sup>	0	n.d.
Total Europa <sup>(a)</sup>	181	28
Estados Unidos <sup>(b)</sup>	68	n.d.
Kuwait <sup>(c)</sup>	8,3	21
a) ETNRC, 1999 b) HANSEN, 1992 c) KARTAM et al., 2004		

A geração dos resíduos de construção e demolição é influenciada por muitos e diversos fatores, onde dentre eles pode-se citar: as práticas de construção e demolição adotadas; os fatores de mercado e econômicos, tais como o tamanho do mercado, a disponibilidade e custo dos agregados naturais comparados com os custos de entrega dos agregados reciclados; a estrutura reguladora que fornece incentivos para minimizar a geração de resíduos nos canteiros de obra e desestímulos para dispor os resíduos nos aterros; as percepções com respeito à qualidade dos materiais reciclados e a ausência do uso de códigos de prática, especificações e mecanismos de garantia de qualidade (BAKOSS e RAVINDRARAJAH, 1999).

Tabela 3.2 Dados sobre RCD de diversas cidades brasileiras

Município	RCD (t/dia)	RCD/RSU	População (ano)	Taxa de geração (t/hab.ano)
Jundiaí/SP <sup>(a)</sup>	712	62%	293.373 (96)	0,89
São José dos Campos/SP <sup>(a)</sup>	733	67%	486.467 (95)	0,55
Ribeirão Preto/SP <sup>(a)</sup>	1.043	70%	456.252 (95)	0,83
São José do Rio Preto/SP <sup>(a)</sup>	687	58%	323.627 (96)	0,77
Santo André/SP <sup>(a)</sup>	1.013	54%	625.564 (96)	0,59
Vitória da Conquista/BA <sup>(a)</sup>	310	n.d.	242.155 (98)	0,47
São Carlos/SP <sup>(b)</sup>	381	n.d.	197.187 (01)	0,70
Salvador/BA <sup>(c)</sup>	2.746	50%	2.556.429 (03)	0,39
Feira de Santana/BA <sup>(c)</sup>	276	50%	481.000 (n.d.)	0,21
São Paulo/SP <sup>(d)</sup>	5.260	34%	10.405.867 (00)	0,18
Blumenau/SC <sup>(e)</sup>	331,51	n.d.	271.730 (02)	0,45
Belo Horizonte/MG <sup>(f)</sup>	1.200	51%	2.010.000 (n.d.)	0,22
Florianópolis <sup>(g)</sup>	636,12	n.d.	285.281 (00)	0,81
Maceió/AL <sup>(h)</sup>	1.100	45%	700.000 (n.d.)	0,57
Porto Alegre/RS <sup>(i)</sup>	1000	n.d.	1.200.000 (n.d.)	0,31
Campinas/SP <sup>(j)</sup>	1.258	n.d.	850.000 (93)	0,54
a) PINTO (1999)                      g) XAVIER (2000) citado por NETO (2005) b) NETO (2005)                      h) SLUM (1997) citado por VIEIRA (2003) c) FREITAS et al. (2003)            i) LOVATO (2007) d) PMSP (2005)                      j) SILVEIRA (1993) citado por NETO (2005) e) SARDÁ e ROCHA (2003) f) CONSTRUÇÃO (1996), citado por LEITE (2001)				

Exemplificando um desses fatores, o nível de atividade do setor da construção civil e a situação econômica da região ou do país, TERRY (2004) cita o caso da Austrália, onde no início dos anos 90 a quantidade de resíduos deste setor que era disposta nos aterros decresceu em mais de 20%, em função da desaceleração econômica do país durante tal período, em vez de uma redução da geração do resíduo por um melhor gerenciamento dos mesmos. Entretanto, a partir de 1996 a geração desses resíduos cresceu mais de 28%, o que pode ser explicado pelo aumento no nível de atividade do setor.

Outro exemplo vem das práticas de construção adotadas. No Brasil, a tecnologia construtiva normalmente aplicada favorece o desperdício na execução das novas edificações quando comparadas com as empregadas em países mais desenvolvidos, em função dos processos de racionalização e de modulação na construção lá empregados e da maior industrialização desse setor nesses países. Como resultado disso, enquanto em países desenvolvidos a média de geração de resíduos provenientes de novas edificações

encontra-se abaixo de 100 kg/m<sup>2</sup>, no Brasil este índice gira em torno de 300 kg/m<sup>2</sup> edificado (IBAM, 2001).

A composição dos resíduos de construção e demolição também é variável, em função da região geográfica, da época do ano, do tipo de obra, dentre outros fatores. Quando oriundos de obras de construção, a composição é dependente do estágio da obra, uma vez que no estágio de concretagem da estrutura há uma maior incidência de fragmentos de concreto, aço, formas de madeira, dentre outros, enquanto que no estágio de acabamento, há predominância de restos de argamassa, tijolos, telhas, cerâmicas, dentre outros (POON et al., 2001). Caso a obra seja uma reforma, haverá uma incidência maior de materiais cerâmicos, madeira, rochas naturais, vidro, metais e plásticos (ESIN e COSGUN, 2007).

No Brasil, estima-se que em média 65% do material descartado é de origem mineral, 13% madeira, 8% plásticos e 14% outros materiais. As construtoras são responsáveis pela geração de 20 a 25% desse entulho, sendo que o restante provém de reformas e de obras de autoconstrução (TECHNE, 2001, citado por VIEIRA, 2003).

Para as obras de demolição, as características dos seus resíduos também variam de acordo com o tipo de estrutura a ser demolida e da técnica utilizada. Entretanto, de uma maneira geral, os resíduos de demolição consistem de um alto percentual de material inerte, como tijolos, areia e concreto. Metais, madeira, papéis, vidro, plásticos e outros materiais também aparecem, mas em menor percentagem (POON et al., 2001).

De uma maneira geral, a grande maioria dos resíduos de construção e demolição tem grande potencial para ser reciclado. Na Europa, HENRICHSEN (2000) afirma que mais de 90% dos RCD podem ser reciclados embora, em média, em 1995, estima-se que somente 30% desses resíduos foram reciclados. A Tabela 3.3 mostra a composição do RCD de algumas cidades brasileiras localizadas em regiões distintas do país.

Através dos dados da Tabela 3.3 pode-se observar que argamassa, concreto e material cerâmico correspondem juntos, em todas as cidades apresentadas, a mais de 60% do total do resíduo gerado. Na Europa, esses componentes ainda correspondem a algo em torno de 50% do total dos RCD lá gerados (HENRICHSEN, 2000). Na Malásia, restos de concreto e de agregados e restos de blocos de concreto e cerâmicos correspondem a 67% dos materiais desperdiçados (BEGUN et al., 2006) enquanto que no Kuwait, restos de concreto e de blocos cerâmicos correspondem a 60% dos RCD (KARTAM et al., 2004).

Tabela 3.3 Composição do RCD de diversas cidades brasileiras

Constituintes	São Carlos/SP (a)	São Paulo/SP (b)	Porto Alegre/RS (c)	Ribeirão Preto/SP (d)	Salvador/BA (e)	Campina Grande/PB (f)	Maceió/AL (g)
Argamassa	63,67%	25,2%	44,2%	37,4%	53,0%	28%	27,82%
Concreto	4,38%	8,2%	18,3%	21,1%		10%	18,65%
Material Cerâmico	29,09%	29,6%	35,6%	20,8%	9,0%	34%	48,15%
Cerâmica polida	0,39%	-	0,1	2,5%	5,0%	1%	3,06%
Rochas, Solos	0,13%	32%	1,8%	17,7%	27,0%	9%	-
Outros	2,34%	5%	-	0,5%	6,0%	18%	2,32%
(a) PINTO, 1986 (b) BRITO FILHO, 1999 (c) LOVATO, 2007 (d) ZORDAN, 1997 (e) QUADROS e OLIVEIRA, 2001 (f) NÓBREGA, 2002 (g) VIEIRA, 2003							

No Brasil, uma pesquisa que ratifica os resultados citados anteriormente foi realizada pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), em convênio com dez universidades brasileiras, onde se determinou as perdas de alguns materiais de construção, em quase cem canteiros de obras. Os resultados apontam que, em média, 9% do concreto usinado, 17% dos blocos e tijolos, 85,5% do cimento no serviço de emboço, 79% do cimento no serviço de contrapiso, 22% das placas cerâmicas aplicadas no piso, 16% das placas cerâmicas aplicadas na parede e 12% das placas cerâmicas aplicadas na fachada são desperdiçados (SOUZA et al., 1999), em suma, parte dessas perdas tornam-se entulho da obra.

Os dados citados anteriormente representam a média nacional de desperdício de materiais, que como resultado também apresentam o concreto, a argamassa e os materiais cerâmicos como os principais constituintes do resíduo gerado. Esses dados confirmam a cultura construtiva brasileira, onde as maiores perdas ocorrem nas fases de concretagem, alvenaria, emboço/reboco e revestimento, nas quais os grandes insumos utilizados são estes que aparecem em grandes quantidades nos resíduos de construção e demolição.

Estes materiais parecem que também são os mais desperdiçados nos canteiros de obras internacionais, conforme VAN ACKER (1996), citado por BUTTLER (2003), que afirma que a parte mineral dos resíduos sólidos de material de construção gerados na União Européia são compostos aproximadamente por 41% de concreto, 40% de alvenaria, 12% de asfalto e 7% de cerâmica e azulejos.

Então, de uma maneira geral, pelo acima exposto, os RCD possuem importante participação na gestão e no gerenciamento dos resíduos sólidos municipais, uma vez

que estes constituem em torno de 50% dos mesmos. A geração e a composição dos RCD são dependentes de diversos fatores, entretanto estima-se que no Brasil são produzidos em torno de 0,5 tonelada/hab.ano de RCD e que concreto, argamassa e cerâmica vermelha são seus principais constituintes.

### **3.3 Gestão e gerenciamento dos resíduos da construção civil**

Como já foi abordado, a geração de resíduos da construção civil é bastante significativa dentro do contexto dos resíduos sólidos. Atualmente grande número de cidades brasileiras promove a gestão desses resíduos de maneira emergencial, retirando-os dos seus locais de descarte, que geralmente são impróprios e irregulares, uma vez que comprometem a paisagem do local, o tráfego de pedestres, de veículos e a drenagem urbana, além de servirem de pretexto para o depósito irregular de outros resíduos não-inertes, propiciando o aparecimento e a multiplicação de vetores de doenças, arriscando assim a saúde da população vizinha.

Esse tipo de gestão tem se tornada rotineira e é uma prática que possui elevados custos, principalmente em função dos equipamentos utilizados serem totalmente inadequados (equipamentos pesados, caminhões basculantes, pás carregadeiras, entre outros) a esse tipo de serviço (PINTO, 2001). Além disso, essa prática não promove a sustentabilidade, uma vez que não incentiva a redução, reutilização ou a reciclagem desses resíduos.

Então, se faz necessário que novas práticas de gestão e gerenciamento desses resíduos sejam adotadas, baseadas nos princípios da sustentabilidade. Um exemplo da aplicação desses novos princípios foi adotado na cidade de *San Jose*, Estados Unidos, onde os construtores, para receberem o alvará de construção, são obrigados a fazer um depósito em dinheiro, sendo o valor calculado em função da área a ser construída ou reformada. Tal quantia é somente devolvida após o construtor demonstrar o quanto de RCD foi evitado que fosse depositado no aterro, sendo que o valor a ser devolvido corresponde ao percentual de RCD gerado que não foi destinado ao aterro (BROVIAK, 2005).

Caminhando nesse sentido, um importante marco na quebra do paradigma da gestão inapropriada desses resíduos foi a promulgação da Lei Federal nº 10.257, em 2001, conhecida como “estatuto das cidades”, a qual determinava importantes diretrizes para o desenvolvimento sustentável das cidades brasileiras, prevendo a necessidade de

proteção e preservação do meio-ambiente, exigindo dos municípios, políticas setoriais articuladas, e dentre elas, pode-se citar a que trata da gestão dos resíduos sólidos, onde os resíduos da construção civil estão inseridos (CEF, 2005).

Outro importante passo, agora mais específico para a gestão dos resíduos da construção civil, foi a aprovação da Resolução nº 307, em 2002, pelo CONAMA, que tornou obrigatória, para todos os municípios do país, a implantação de Planos Integrados de Gerenciamento dos Resíduos da Construção Civil pelo poder público local. Essa resolução define responsabilidades e deveres, impondo aos geradores a obrigatoriedade da redução, reutilização e reciclagem dos resíduos, quando, prioritariamente, a geração desses resíduos não puder ser evitada.

Antes de desenvolver as estratégias de gerenciamento dos resíduos se faz necessário caracterizar o volume e a composição dos resíduos da região. Isso é particularmente importante quando se considera a política de minimização de resíduo e de materiais específicos para a reciclagem (SAKAI et al., 1996).

Portanto, a primeira ação para elaborar o Plano Integrado de Gerenciamento dos Resíduos da Construção Civil é realizar um diagnóstico da geração desses resíduos, determinando os agentes envolvidos na geração, na coleta, no transporte e na recepção dos mesmos, além de estimativas dos impactos ambientais e econômicos resultantes dessas atividades. Através desse diagnóstico se poderá também tipificar os geradores e transportadores desses resíduos, identificando os fluxos dos mesmos dentro da malha urbana (CEF, 2005).

NETO (2005) sugere uma metodologia para diagnosticar a situação dos resíduos da construção civil nos municípios baseado na sua geração, composição, manejo e disposição. A metodologia consiste em:

- buscar indicadores básicos do município, através do conhecimento dos aspectos locais e de suas peculiaridades, por meio de levantamentos bibliográficos e índices estatísticos;
- identificar a origem da matéria-prima utilizada nos processos produtivos da construção civil, buscando os impactos ambientais causados pela extração dos recursos naturais utilizados;
- determinar a quantidade de resíduos da construção civil gerada através da criação de indicadores por meio de 3 bases de dados: cálculo da geração de entulho por meio de áreas licenciadas nos últimos 4 anos, cálculo do movimento de cargas das

empresas coletoras e cálculo do volume descartado nos aterros municipais em um período de 4 meses;

- determinação da composição do RCD, para subsidiar possíveis programas de coleta seletiva ou dimensionamento de usinas de reciclagem; e
- levantamento de áreas de descarte irregular, fornecendo a real dimensão dos impactos causados por esses resíduos nos municípios.

Já o Governo Federal, através do seu Manual de Orientação para implantar um sistema de manejo e gestão nos municípios, sugere a estimativa da quantidade de RCD gerada pelo município, utilizando a soma de 3 indicadores (CEF, 2005):

- a quantidade de resíduos oriundos de edificações novas construídas na cidade, num determinado período de tempo (2 anos, por exemplo), onde para tanto utilizam-se registros da prefeitura relacionados à aprovação de projetos de edificação (alvarás de construção), com a área construída correspondente e uma taxa de geração de resíduos de 150 kg/m<sup>2</sup> construído, índice este resultante de pesquisas sobre perdas na construção civil em diversas regiões brasileiras;

- a quantidade de resíduos gerados em reformas, ampliações e demolições, onde a quantidade é estimada a partir das informações obtidas dos agentes coletores, principalmente aqueles organizados em forma de empresas que atuam na cidade, e por fim;

- a quantidade dos resíduos removidos de deposições irregulares, sendo esta quantidade obtida com o setor responsável pela limpeza urbana.

A Tabela 3.2, no início deste capítulo, exemplifica a taxa de geração de RCD de algumas cidades brasileira, sendo que no Brasil, em média, gera-se 0,52 toneladas/habitante.ano.

Com o conhecimento da estimativa da quantidade gerada de RCD, da forma como se faz o seu manejo e dos locais de descarte, deve-se centrar os esforços em duas ações principais (CEF, 2005):

- instituir um Programa Municipal (serviço público) que assuma a coleta e a destinação final adequada dos resíduos provenientes dos pequenos geradores, sendo que para tanto deve-se disponibilizar um conjunto de entrega voluntária em zonas que atraíam a maior parcela possível dos RCD gerados em sua área de abrangência e;

- constituir uma estrutura de gestão dos grandes volumes de RCD com a iniciativa privada, caracterizando assim, como um conjunto de atividades privadas regulamentadas pelo poder público municipal, sendo que essas atividades relacionam-se

ao transporte, manejo, transformação e disposição final desses grandes volumes de RCD.

Essas duas ações devem ser acompanhadas de um programa de Educação Ambiental dos geradores e coletores, de forma que estes adquiram uma nova postura no manejo desses resíduos, tendo um compromisso com a qualidade ambiental da cidade. Deve-se ainda, instalar um programa de fiscalização rigoroso, verificando o comprometimento por parte dos geradores, coletores e receptores desses resíduos (CEF, 2005).

Pode ser observado, na Figura 3.1, a proposta da gestão integrada do RCD apresentada por NETO (2005).

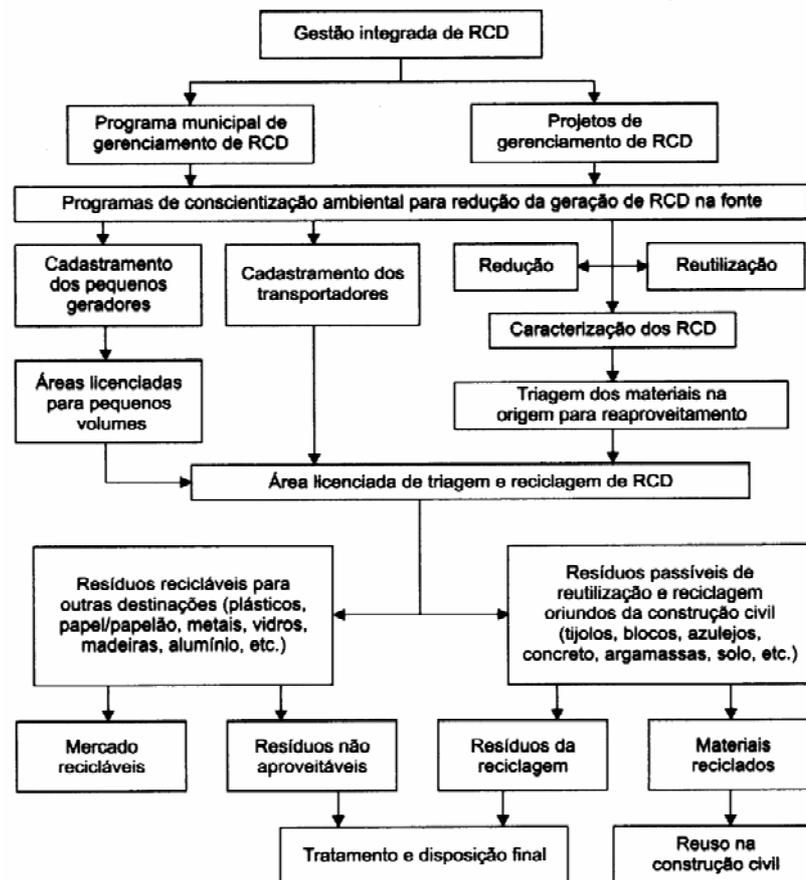


Figura 3.1 Fluxograma da gestão integrada do RCD (NETO, 2005)

Algumas cidades brasileiras já possuem leis específicas para o gerenciamento dos RCD, como é o caso das cidades de São Paulo, Belo Horizonte, Recife e Curitiba (NETO, 2005).

Entretanto, para que esses resíduos sejam reciclados e conseqüentemente reaproveitados como matéria-prima, as características do produto reciclado devem ser compatíveis ao uso a que ele se propõe. A reciclagem dos RCD contaminados com materiais não-inertes produz reciclados de pouca qualidade. Então, é fundamental a separação dos diversos tipos de resíduos produzidos, onde a fase inerte é a que possui maior potencial de reciclagem para produção de reciclados de boa qualidade a serem reaproveitados na própria construção civil.

Essa separação deve ser feita preferencialmente no próprio canteiro de obras onde o resíduo foi gerado, entretanto essa é uma etapa que os construtores e demolidores são relutantes a desempenhar, uma vez que é exigido um maior empenho dos mesmos. Além disso, parece que muitos aterros não estão preparados para receber o material segregado, misturando-os novamente nos processos de estocagem e manuseio.

Coerente com o acima exposto, os resultados da pesquisa de POON et al. (2001), realizada na cidade de Hong Kong, acerca da separação dos RCD no próprio canteiro de obras, indicam que os empresários do setor são resistentes a desempenhar essa função. Mesmo quando se cogita em cobrar taxas extras pela deposição de resíduos contaminados, a idéia de se fazer a separação no próprio canteiro de obra ainda não é considerada. A alegação dos mesmos é que tal etapa demandará maior espaço no canteiro, exigirá um maior nível de gerenciamento e absorverá maior mão-de-obra, o que aumentará os custos.

### 3.3.1 Coleta e transporte dos resíduos da construção civil

Normalmente, a coleta e o transporte do RCD são feitos por empresas contratadas pelo construtor. Em geral, essas empresas dispõem caçambas metálicas no local da obra, sendo estas recolhidas com certa periodicidade. Entretanto, os pequenos produtores de entulho (os pequenos construtores e os que constroem, reformam e demolem clandestinamente) nem sempre utilizam os serviços dessas empresas coletoras, e depositam seus resíduos ao longo das vias públicas, estradas, nas periferias das cidades e nas margens de rios e córregos, provocando imensos danos à paisagem do local, atrapalhando o tráfego de pedestres e de veículos, assoreando o leito dos corpos d'água, prejudicando a drenagem urbana. Há casos também onde as próprias empresas de coleta, por questões de custo, uma vez que normalmente os locais de deposição são afastados dos centros urbanos, colocam os RCD coletados em locais clandestinos.

### 3.3.2 Tratamento e disposição final dos resíduos da construção civil

Geralmente não se tem um tratamento para esse tipo de resíduo, sendo este, na grande maioria das vezes, simplesmente disposto em terrenos topograficamente irregulares, com o intuito de aterrá-los.

Contudo, um procedimento que vem ganhando força, o qual também serve como forma de tratamento para esses resíduos, é a reciclagem dos mesmos, uma vez que a mesma propicia uma economia do uso da matéria-prima natural, uma redução do consumo de energia e emissão de CO<sub>2</sub> na produção e no transporte de materiais, um decréscimo dos inconvenientes gerados pela deposição indevida do entulho, reduzindo os custos da limpeza pública e da compra dos agregados a serem utilizados, além da preservação dos aterros de inertes, aumentando assim a sua vida útil (RAKSHVIR e BARAI, 2006).

As principais aplicações dos agregados reciclados, segundo HANSEN (1992) e XIAO et al. (2006), são: como material de enchimento para aterros, como material drenante em projetos de drenagem, como material de base ou sub-base para estradas e como agregados para uso na confecção de novos concretos, para uso em edificações, em obras de arte ou em peças pré-moldadas. Dentre todas, o uso como material de base e sub-base parece ser o mais aceito, embora o consumo de agregados por este setor corresponda somente a 20% do montante total de agregados consumidos.

## **3.4 Considerações sobre a reciclagem dos resíduos de construção e demolição**

O setor da construção civil é um dos setores produtivos que mais aproveita os resíduos, transformando-os assim em subprodutos. Há dados do aproveitamento de resíduos de vidro e de borracha, com excelente desempenho, como agregados miúdos e graúdos na confecção de concretos (DHIR et al., 2004b), aproveitamento de resíduos das indústrias de ferro-silício (sílica ativa), da cinza da casca de arroz e da queima do caulim (metacaulim), como adições, e de escórias de aciaria, de alto-forno e de cobre (MEHTA e MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997), como adições e também como agregados na confecção de concretos, dentre tantos outros tipos de resíduos utilizados e ainda pesquisados.

Como em todo processo de reciclagem de resíduos, não diferente para os resíduos de construção e demolição, deve-se fazer inicialmente uma análise da transformação desses resíduos em produtos viáveis para serem absorvidos em determinados mercados. Portanto, antes de se propor ou implementar o processo de reciclagem, deve-se analisar alguns pontos, tais como (JOHN e ÂNGULO, 2003):

- o mercado de geração dos resíduos, estimando a sua geração e os custos associados aos mesmos, além de analisar o processo de gestão dos mesmos. Nessa etapa é verificada a disponibilidade e a sazonalidade dos resíduos a serem reciclados, além dos processos de transporte e estocagem, uma vez que freqüentemente há misturas nessas etapas;

- deve-se caracterizar os resíduos, determinando suas características físicas, químicas, microestruturais e outras características que sejam consideradas relevantes;

- deve-se fazer uma seleção de usos potenciais para os resíduos, em função das suas características e das condições de mercado locais;

- deve-se selecionar alternativas com potenciais técnicos e com viabilidade de mercado para serem pesquisados, com critérios para seleção das alternativas mais promissoras;

- por fim, deve-se desenvolver e avaliar o produto, preferencialmente quanto ao desempenho técnico, à sustentabilidade e à viabilidade econômica.

Do ponto de vista puramente econômico, a reciclagem dos RCD somente será atrativa quando os produtos reciclados forem competitivos com os naturais em relação a custo e quantidade. Portanto, materiais reciclados serão mais competitivos em regiões onde houver escassez de materiais naturais e áreas para aterros (TAM e TAM, 2006).

O estudo da reciclagem dos resíduos de construção começou há bastante tempo, uma vez que têm-se registros de reaproveitamento de resíduos da construção civil pelos Fenícios, no Império Romano e na Grécia Antiga. Contudo, este ganhou impulso a partir das catástrofes deste século, como terremotos e guerras, e também pela necessidade de se buscar uma solução mais sustentável para a deposição de tais resíduos.

Somente a partir de 1928 teve-se o início de desenvolvimento de pesquisas sobre o aproveitamento de RCD de forma sistemática, avaliando o consumo de cimento, a quantidade de água e o efeito da granulometria dos agregados provenientes da reciclagem dos resíduos de alvenaria e concreto. A primeira aplicação relevante que se

tem registro foi após a 2ª Guerra Mundial, na reconstrução de cidades européias (SCHULZ e HENDRICKS, 1992).

Os países europeus e o Japão, em função da carência de espaço físico para alojamento dos resíduos e da sua densidade demográfica, possuem políticas mais elaboradas e consolidadas que o Brasil para controle e alternativas de reutilização do RCD.

O Japão tem uma longa história conduzindo pesquisa e desenvolvendo o reuso dos RCD, sendo que aproximadamente 2/3 dos resíduos de concreto lá produzidos são reutilizados, entretanto, ainda assim, quase em sua totalidade como material para base e sub-base de rodovias (KAWANO, 2000).

Na Europa, países como Alemanha, Reino Unido e Holanda, já desenvolveram programas de reciclagem de resíduos de construção e demolição, enquanto que em outros, tais como Itália, França e Espanha, a quantidade de materiais inertes reciclado é ainda limitado, não excedendo 10% do total utilizado (CORINALDESI, 2002 e BRESSI, 2003 citados por BIANCHINI et al., 2005). A Tabela 3.1 traz a quantidade de resíduos de construção e demolição produzida e reciclada/reutilizada na Europa, Estados Unidos e Kuwait.

Um relatório apresentado em 1999 à Comissão Européia, que trata sobre o assunto, estimou que a quantidade de resíduos de construção e demolição que não é reciclada é de 130 milhões de toneladas por ano (ETNRC, 1999). A área exigida para dispor essa quantidade de resíduo equivale à área central de Paris com os resíduos acumulados a uma altura de 1,3 metros (SYMONDS, 1999, citado por KATZ, 2004).

Segundo dados publicados por VÁZQUEZ (2000), 72% dos resíduos de construção e demolição da Europa ainda são depositados em aterros, sendo que mais da metade dos países europeus aterram mais de 90% dos seus RCD e em 80% de todos os casos isso é feito sem nenhuma forma de seleção preliminar ou de proteção ambiental.

Entretanto, a escassez de matéria-prima força a reutilização de materiais, como é o caso dos resíduos de cerâmica em Bangladesh, que segundo AKHTARUZZAMAN e HASNAT (1983), são extensivamente lá usados na confecção de concretos, tendo um desempenho bastante satisfatório.

Um outro fator determinante para a reutilização desses resíduos é a economia financeira gerada. Como exemplo, o Conselho de *Sutherland*, distrito da cidade de Sydney/Austrália, que recicla em média 80% dos seus resíduos de construção e demolição, não compra materiais naturais para a confecção de pavimentos rodoviários

de baixa carga desde 1991. Além desse uso, os resíduos são reutilizados na construção de calçadas, sarjetas, como material granular para drenagem, dentre outros empregos, originando uma economia anual de aproximadamente US\$ 63.000 (BAKOSS e RAVINDRARAJAH, 1999).

Outro exemplo vem da Bélgica, onde os resíduos também são transformados em agregados reciclados e reutilizados nos serviços de pavimentação, com uma economia de até 45% nos custos dos projetos, sendo que 70% dessa economia provém da diminuição de custos de transporte, 20% da aquisição de material mais barato e 10% do não pagamento das taxas para despejo dos resíduos nos aterros (HANSEN, 1992).

Atualmente, poucos construtores têm concentrado esforços em considerar o meio-ambiente e em desenvolver a reciclagem dos materiais de construção, uma vez que a principal prioridade dos mesmos é completar a construção no menor tempo possível. Infelizmente, seus livros-caixas não revelam o potencial de economia que se tem resultante da redução dos resíduos gerados. De fato, com um apropriado gerenciamento dos resíduos gerados pode-se alcançar uma alta produtividade na construção, economizando-se tempo e aumentando-se a segurança, enquanto que simplesmente dispor tais resíduos demanda tempo e recursos extras que podem atrasar o progresso da construção (BEGUN et al., 2006). Ainda segundo dados da pesquisa do autor anteriormente citado, a reciclagem dentro do canteiro de obras trouxe uma economia de 2,5% no orçamento total do empreendimento pesquisado.

Além da economia financeira, há também uma economia de energia, uma vez que o consumo desta é menor no processo de reciclagem que em todo o processo de fabricação dos agregados naturais (HANSEN, 1992).

O processo de reciclagem dos RCD pode trazer também inconvenientes tais como poluição visual e sonora, além de problemas com a geração de poeira, em função da inserção de máquinas e equipamentos de reciclagem em locais indesejáveis. Entretanto, com uma otimização das técnicas utilizadas nos processos de reciclagem, como a aspersão de uma fina névoa d'água sobre os agregados durante o processo de britagem, tais inconvenientes podem facilmente serem contornados (HANSEN, 1992).

Atualmente a maioria das pesquisas sobre a reciclagem dos RCD está voltada para a obtenção de agregados reciclados. Entretanto existem estudos sobre a viabilidade da produção de pó a partir dos RCD para uso como componente do cimento, uma vez que muitos dos seus constituintes possuem propriedades cimentícias, tais como os materiais cerâmicos, vidros e partículas de cimento não hidratadas, que uma vez

expostos a elevadas temperaturas, podem produzir fases capazes de gerar reações pozolânicas e hidráulicas (DHIR et al., 2004a).

HENDRIKS e JANSSEN (2001) e TAM e TAM (2006) discutem várias maneiras de reutilizar os diversos constituintes do RCD, onde algumas são citadas abaixo:

- o entulho de concreto, sendo reutilizado sem beneficiamento algum, em construção de estradas ou como material de aterro para áreas baixas, dentre outras aplicações. Após a britagem do resíduo de concreto e sua separação em agregados de diversos tamanhos, o resíduo pode ser usado como agregado para produção de concreto asfáltico, de sub-bases de rodovias e de concreto com agregados reciclados;

- a madeira, quando a parte não danificada pode ser reutilizada na própria construção civil e a parte não reaproveitável pode ser reduzida a pequenos tamanhos com o intuito de ser processada na fabricação de papel e papelão. Alternativamente, a madeira pode ser incinerada, como aproveitamento de energia, ou decomposta por gasificação ou pirólise, que após a hidrólise, pode ser usada na indústria química;

- o resíduo de asfalto pode ser reaproveitado na construção de estradas tanto no processamento de novos asfaltos quanto na confecção de sub-bases, como material granular;

- os metais podem ser reaproveitados para produzir novos metais;

- os vidros, que não devem ser permitidos que sejam processados e façam parte dos agregados reciclados em função da reação sílica-álcali, embora haja trabalhos que apontem o seu uso como microfíler na produção de concretos. Estes também podem ser reciclados em novos vidros, em fibras de vidro, telhas e blocos de pavimentação ou ainda como adição na fabricação de asfaltos;

- o resíduo de alvenaria, incluindo tijolos, cerâmicas e pedras, pode ser utilizado na produção de concretos, embora haja uma redução na resistência à compressão, e de concretos especiais, como o concreto leve com alto poder de isolamento térmico. Pode ser utilizado também como agregado na fabricação de tijolos, com o aproveitamento até da sua parte fina, como material de enchimento, além de poder ser queimado e transformado em cinzas com reutilização na própria construção civil;

- o papel e o papelão, quando bem separados e coletados, podem ser reciclados, geralmente como material de embalagens;

- resíduos de plástico, oriundos de poliestireno (PS), polipropileno (PP), polietileno (PE) e policloreto de vinila (PVC) podem ser reciclados embora existam outras resinas que são difíceis de serem reprocessadas; e

- os resíduos perigosos devem ser incinerados ou aterrados com procedimentos específicos. Alguns resíduos como os de óleo, de tintas e solventes, agentes abrasivos e baterias podem ser reciclados.

Dentro da construção civil, a confecção de concretos é o setor que mais consome agregados, entretanto este segmento pouco utiliza os agregados reciclados. Como exemplo, no ano 2000, menos de 1% de todo o concreto produzido na Europa era feito com agregados reciclados (HENRICHSEN, 2000). Especificamente na Alemanha, no ano de 1998, somente 10% dos 670 milhões de toneladas de materiais inertes utilizados na construção civil naquele ano foram materiais reciclados (WEIL et al., 2006). Ainda segundo este último autor, o uso dos agregados reciclados no lugar dos naturais, na produção de concretos, reduziria em até 44% o uso de matéria-prima natural.

Essa pouca utilização é resultado de alguns fatores desfavoráveis quanto ao uso dos agregados recicláveis, tais como a grande variabilidade das características dos mesmos e a possível contaminação por agentes deletérios ao concreto, uma vez que estes contaminantes podem ser incorporados no novo concreto, comprometendo assim, seu desempenho mecânico e sua durabilidade (KHALAF e DeVENNY, 2004), além do receio em utilizar matéria-prima reciclada, principalmente em elementos com função estrutural.

Uma vez que a composição do RCD é variável, dependendo de uma série de fatores, tais como a localização regional da obra, da época do ano, do tipo de obra, tipo de técnica construtiva empregada, dentre outros, tal variabilidade é refletida nos agregados reciclados produzidos. Isto repercute em algumas características dos agregados reciclados, tais como a forma, a textura, a massa específica, a absorção de água, o teor de umidade, a permeabilidade, a sua resistência mecânica, dentre outras, as quais também passam a variar consideravelmente (LIN et al., 2004).

Dados de SCHULZ e HENDRICKS (1992) apontam que os reciclados produzidos nas oito usinas de reciclagem de RCD pesquisadas na Holanda apresentaram considerável variação na composição. Em pesquisa similar à anterior, mas realizada na Austrália, RAVINDRARAJAH et al. (2000) concluíram que a qualidade do agregado reciclado varia notoriamente devido à quantidade e qualidade da argamassa aderida ao agregado reciclado de concreto.

Ainda segundo os mesmos autores, a melhor maneira de se obter um agregado reciclado de boa qualidade é se assegurar que os contaminantes sejam removidos antes que o material seja britado, de preferência, no próprio canteiro de obras. Entretanto, depois de britados, ainda existem maneiras de solucionar esse inconveniente, através da adoção de processos de eliminação dessas impurezas, onde os mais utilizados são o processo a seco e o úmido (SCHULZ e HENDRICKS, 1992).

BAKOSS e RAVINDRARAJAH (1999) enumeram 3 métodos de classificação e limpeza dos agregados reciclados, sendo eles a separação magnética, a separação a seco e a separação à úmido. Os separadores magnéticos removem as barras de aço e outros metais que por ventura estejam inseridos no material reciclado. Na separação à seco, as pequenas partículas e as de reduzida massa específica são removidas com a ajuda de jatos de ar que são disparados contra o material reciclado. Por fim, na separação à úmido os contaminantes de baixa densidade, tais como madeira e plásticos, são removidos através do uso de jatos de água e de tanques de flutuação.

Segundo KHALAF e DeVENNY (2004), a demolição das estruturas deveria realmente ser considerada nas etapas de planejamento da edificação, antes da construção, para assegurar que um mínimo de resíduos fosse gerado. Aspectos técnicos de reciclagem deveriam ser considerados durante o projeto, a construção e a manutenção das edificações. Isso envolveria elementos projetados que seriam simples de demolir e separar.

O método de demolição chamado “demolição seletiva” ou desconstrução é uma opção a ser utilizada quando se deseja qualidade do resíduo, uma vez que este propicia a remoção ou desmontagem dos diversos constituintes das edificações, posteriormente demolindo separadamente as fases não desmontáveis, não misturando assim os diversos componentes da demolição. Uma outra vantagem do método é a redução da quantidade de resíduo encaminhado aos aterros, entretanto este é mais moroso e caro que os tradicionalmente utilizados. Segundo HANSEN (1992), o trabalho adicional exigido pelo método proporciona um aumento de 25% no custo da demolição.

O uso dos projetos arquitetônicos e estruturais de como realmente as edificações encontram-se após reformas e manutenções, comumente chamados de *as-built*, são fortemente recomendados para a execução de uma demolição que propicie um bom aproveitamento dos seus resíduos (LAMOND et al., 2002).

Existem várias técnicas e equipamentos que podem ser utilizados para a demolição das edificações, tais como demolições manuais utilizando equipamentos

portáteis até a utilização de veículos auto-propelidos, explosivos, demolição por calor e por jatos d'água (LAMOND et al., 2002).

Como já citado anteriormente, por haver uma predominância da parte mineral na composição dos RCD, há um favoritismo em processar esses resíduos, transformando-os em agregados. Em função disso e de pressões da sociedade, várias cidades já dispõem de usinas de reciclagem de RCD, sendo que no Brasil, as pioneiras são a usina de Itatinga, na cidade de São Paulo, as duas de Belo Horizonte e as dos municípios de Santo André, Ribeirão Preto, São José dos Campos e Londrina, sendo estas, resultado de programas de gestão dos RCD desses municípios (BIDONE, 2001, citado por NETO, 2005; CARNEIRO et al., 2001).

Segundo HANSEN (1992) e KARTAM et al. (2004), as condições para que as operações de reciclagem de RCD em usinas sejam bem sucedidas são:

- suprimento abundante e constante de material reciclável;
- existência de altas taxas para o depósito deste tipo de material em aterros;
- cuidadosa separação dos componentes recicláveis como agregados dos não recicláveis, seja na obra ou em local pré-determinado;
- fácil acesso para o transporte dos RCD e dos reciclados;
- disposição de uma área industrial satisfatória, de preferência próxima ao aterro, para instalação da usina;
- inacessibilidade ou escassez, além de altos custos de aquisição dos agregados naturais;
- mercado para absorção dos reciclados, onde os produtos feitos com agregados reciclados apresentem vantagens competitivas com relação ao custo e à qualidade.

SHULZ e HENDRICKS (1992) também acordam que a continuidade no fornecimento dos resíduos a serem processados é um aspecto importante, uma vez que uma redução na capacidade de utilização da usina de 100% para 60% pode acarretar um aumento no preço do agregado produzido de 45 a 90% em função do rateio dos custos operacionais.

No Reino Unido, o balanço financeiro do gerenciamento dos RCD já mostra que o custo de processamento desses resíduos, transformando-os em agregados reciclados, já está se tornando mais barato que o custo combinado da disposição desses resíduos e da compra de novos agregados. Isso ocorre basicamente devido ao aumento das taxas para disposição desses resíduos em aterros e à introdução de um novo imposto sobre os agregados (DHIR et al., 2004b).

Esse favoritismo do uso dos agregados reciclados, com relação ao custo, parece acontecer também no Brasil. Confirmando essa tendência, PINTO (2001), em sua pesquisa, comparou os preços dos agregados naturais comercializados em 19 cidades brasileiras com o provável preço de venda dos agregados reciclados, considerando-se os custos de manutenção e operação das usinas de reciclagem, tais como provisão de água e luz, mão-de-obra, juros, amortizações e equipamentos para manejo interno, dentre outros. Em todas as cidades pesquisadas, os agregados naturais apresentaram preços mais elevados que os reciclados, com um acréscimo médio em torno de 192%.

Alguns pesquisadores (BAIRAGI et al., 1993; TOPÇU, 1997; LIMBACHIYA et al., 2000) recomendam a substituição de até 50% dos agregados naturais pelos reciclados. As normas holandesas permitem a substituição de até 20% dos agregados naturais pelos reciclados sem que nenhuma medida especial seja tomada. Já as normas japonesas sugerem que até 30% do total de agregados da mistura pode ser substituído sem nenhum efeito danoso (HANSEN, 1992).

Considerando o percentual de substituição de 50%, e adotando os custos apresentados por LEVY (2005) para os materiais utilizados na produção de concreto, tem-se uma economia de 8,5%. Caso se seja mais conservador e substitua-se somente 20% dos agregados graúdos, essa economia regride para 2%. Tais percentuais de economia ainda não são suficientes para convencer os construtores a se “arriscarem” no pioneirismo do uso dos agregados reciclados como insumo para a produção de concretos.

Contudo, para que os mesmos sejam definitivamente incorporados no mercado como uma matéria-prima a ser utilizada na construção civil é necessário convencer os projetistas e construtores, além do consumidor final dos seus produtos, que a utilização dos mesmos apresenta alguma vantagem competitiva e baixos riscos técnicos e ambientais, sendo necessário superar o preconceito contra o uso de materiais tidos como de segunda qualidade ou de segunda mão, explorando o lado ecológico da reciclagem.

#### 3.4.1 Classificação dos agregados reciclados de resíduo de construção e demolição

Para ser satisfatório para determinadas aplicações, o material reciclado produzido deve atender a certas exigências de granulometria e a uma presença mínima de contaminantes, além de outras exigências de estabilidade e durabilidade.

No caso do uso para a produção de concretos, primeiramente este deve ser resistente o suficiente para a classe do concreto a ser produzido além de ser dimensionalmente estável a mudanças no teor de umidade. O agregado reciclado também não deve possuir reações deletérias com o cimento ou com a armadura, e por fim, deve ter uma forma e granulometria satisfatória para produzir um concreto com aceitável trabalhabilidade (HANSEN, 1992).

Levando em conta as considerações citadas anteriormente, algumas instituições classificam os agregados reciclados, conforme abaixo apresentado.

O *Building Contractors Society of Japan* classifica os agregados reciclados conforme o atendimento por parte dos mesmos às especificações contidas nas Tabelas 3.4 e 3.5 (BCSJ, 1977, citado por HANSEN, 1992). Entretanto, KAWANO (2000) cita uma nova classificação proposta pelo Ministério da Construção do Japão, dividindo os agregados reciclados em classes, conforme Tabela 3.6.

Tabela 3.4 Classificação dos agregados reciclados conforme os requisitos de qualidade propostos pelo BCSJ (1977), citado por HANSEN (1992).

Item	Agregado graúdo reciclado	Agregado miúdo reciclado
Massa específica seca	não menor que 2200 kg/m <sup>3</sup>	não menor que 2000 kg/m <sup>3</sup>
Absorção d'água	não maior que 7%	não maior que 13%
Perda de substâncias no teste de lavagem	não maior que 1%	não maior que 8%
Percentual de volume sólido	não menor que 53%	-

Tabela 3.5 Categorias de acordo com os constituintes dos agregados graúdos reciclados (BCSJ, 1977, citado por HANSEN, 1992).

Tipo de agregado	Impureza I	Impureza II
Graúdo reciclado	10 kg/m <sup>3</sup>	2 kg/m <sup>3</sup>
Miúdo reciclado	10 kg/m <sup>3</sup>	2 kg/m <sup>3</sup>
Impureza I: plástico, torrão de argila, argamassa de cal e outros materiais plásticos de $\gamma < 1950 \text{ kg/m}^3$ .		
Impureza II: asfalto, plástico, pinturas, tecido, papel, madeira e materiais similares com $\gamma < 1200 \text{ kg/m}^3$ retido na peneira 1,2mm.		

Já o código dinamarquês sobre a classificação e uso dos agregados reciclados permite a utilização dos mesmos para a produção de concretos estruturais, distinguindo entre concretos que têm resistência à compressão até 20 MPa (chamado de GP1) e concretos que têm resistência à compressão até 40 MPa (chamado de GP2). Para o grupo GP1, os materiais reciclados devem possuir massa específica saturada superfície seca acima de 2200 kg/m<sup>3</sup>, sendo que tais materiais geralmente consistem de concretos

estruturais britados. Para o grupo G2, os materiais devem ter massa específica acima de  $1800 \text{ kg/m}^3$ , sendo que estes tipicamente consistem restos de demolição não contaminados, mais precisamente misturas de concreto e alvenaria (HANSEN, 1992).

Tabela 3.6 Classificação dos agregados reciclados proposta pelo Ministério da Construção do Japão (KAWANO, 2000)

Agregado graúdo			Agregado miúdo		
Classe	Absorção d'água	Perda de massa	Classe	Absorção d'água	Perda de massa
I	<3%	<12%	I	<5%	<10%
II	<3% e	<40%	II	<10%	-
	<5% e	<12%			
III	<7%	-			

A Norma Britânica, *BS EN 8500-2:2002 Concrete – complementary British Standard to BS EN 260-1: Specification for constituent materials and concrete* classifica os agregados para concreto em dois grupos, baseados na sua composição, os quais são os agregados reciclados de concreto (ARC), que compreendem mais de 95% de sua composição de concreto britado e os agregados reciclados (AR), que se referem aos agregados que contêm menos que essa proporção de concreto britado (DHIR et al., 2004a).

A norma alemã *DIN 4226-100 (2002)* classifica o agregado reciclado em: tipo 1, sendo aquele que deve conter um mínimo de 90% em massa de restos de concreto e não mais que 10% em massa de restos de cerâmica e; em tipo 2, sendo que este deve conter pelo menos 70% em massa de restos de concreto e não mais que 30% em massa de restos de cerâmica. Outros componentes, tais como materiais leves, são limitados a não mais que 1% em massa (WEIL et al., 2006).

Classificação distinta faz o RILEM (1994), uma vez que os agregados Tipo I são entendidos implicitamente como oriundos de resíduos de alvenaria; os Tipo II são entendidos implicitamente que sua origem se deu a partir de resíduos de concreto e os do Tipo III são entendidos implicitamente como oriundos de uma mistura de agregados reciclados e agregados naturais, na proporção de pelo menos 80% de agregados naturais e de no máximo 10% de agregados do Tipo I.

Ainda sendo escrita no presente momento, a norma europeia *EN 12.620* classificará os agregados graúdos reciclados de forma mais detalhada, conforme o teor de seus constituintes, como pode ser visto nas Tabelas 3.7 e 3.8 (LAY, 2006). Há

reivindicações por parte de alguns comentaristas da norma para que as categorias de classificação sejam estendidas aos agregados miúdos. Entretanto, estima-se que seu conteúdo completo somente será divulgado ao meio técnico e acadêmico no final de 2007.

Tabela 3.7 Categorias de acordo com os constituintes dos agregados graúdos reciclados (LAY, 2006).

Constituinte	Conteúdo (% em massa)	Categoria
R <sub>C</sub>	≥90	R <sub>C</sub> 90
	≥70	R <sub>C</sub> 70
	<70	R <sub>C</sub> D
	sem requisito	R <sub>C</sub> SR
R <sub>C</sub> + R <sub>U</sub>	≥90	R <sub>CU</sub> 90
	≥70	R <sub>CU</sub> 70
	≥50	R <sub>CU</sub> 50
	<50	R <sub>CU</sub> D
	sem requisito	R <sub>CU</sub> SR
R <sub>B</sub>	<10	R <sub>B</sub> 10
	<30	R <sub>B</sub> 30
	<50	R <sub>B</sub> 50
	>50	R <sub>B</sub> D
	sem requisito	R <sub>B</sub> SR
R <sub>A</sub>	<1	R <sub>A</sub> 1-
	<5	R <sub>A</sub> 5-
	<10	R <sub>A</sub> 10-
FL <sub>S</sub> +FL <sub>NS</sub>	<1	FL <sub>total</sub> 1
	<3	FL <sub>total</sub> 3
FL <sub>NS</sub>	<0,01	FL <sub>NS</sub> 0,01
	<0,05	FL <sub>NS</sub> 0,05
	<0,1	FL <sub>NS</sub> 0,1
X+R <sub>G</sub>	<0,2	XR <sub>G</sub> 0,2
	<0,5	XR <sub>G</sub> 0,5
	<1	XR <sub>G</sub> 1

Tabela 3.8 Constituintes dos agregados graúdos reciclados (LAY, 2006).

Constituinte	Descrição
R <sub>C</sub>	Concreto, produtos de concreto, argamassa, tijolo de concreto
R <sub>U</sub>	Pedra natural, agregado reciclado limpo (sem argamassa)
R <sub>B</sub>	Tijolos, telhas, unidades de alvenaria de silicato de cálcio, concreto aerado não flutuante
R <sub>A</sub>	Material betuminoso
R <sub>G</sub>	Vidro
FL <sub>S</sub>	Material rochoso flutuante (<1 mg/m <sup>3</sup> )
FL <sub>NS</sub>	Material não rochoso flutuante (<1 mg/m <sup>3</sup> )
X	Outros: materiais coesivos (solos e argilas), metais, madeira não flutuante, plástico, borracha

De maneira a especificar o que é mais ou menos o agregado reciclado, segundo as recomendações da *EN 12.620*, pode-se citar o exemplo a seguir, onde o agregado de nomenclatura  $R_{CU}90$ ,  $R_B10$ ,  $R_A5$ ,  $FL_{total}1$ ,  $FL_{NS}0,1$  e  $XR_G1$ , significa um agregado com mais de 90% em massa de concreto e agregado limpo, menos de 10% de alvenaria, menos de 5% de material betuminoso e assim por diante.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou somente em 2004 a primeira edição da série de normas que se referem aos resíduos da construção civil, sendo estas as NBR 15.112 a 15.116. Entretanto, somente a NBR 15.116 trata a respeito dos requisitos dos agregados reciclados para a sua utilização na pavimentação e em concretos sem função estrutural.

Segundo as especificações desta última norma, para se produzir agregados a partir dos resíduos da construção civil, estes devem estar classificados como classe A, de acordo com a Resolução CONAMA 307. Uma vez produzidos, os agregados reciclados podem ser classificados como Agregado de Resíduo de Concreto (ARC), caso a sua fração gráuda seja composta de no mínimo 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas, ou como Agregado de Resíduo Misto (ARM), caso a sua fração gráuda seja composta de menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas.

#### 3.4.2 Considerações sobre a produção dos agregados reciclados de resíduo de construção e demolição

Segundo BRITO et al. (2005), o processo de britagem e moagem para fabricação dos agregados reciclados afeta bastante as características desses agregados. O número de micropartículas soltas entre os grãos do agregado reciclado e o surgimento de microfissuras em sua superfície oriundas do processo de britagem são efeitos que prejudicam e comprometem o desempenho dos mesmos (KATZ, 2004). Outro exemplo é dado por XIAO et al. (2005), mencionando que a forma e as propriedades da superfície dos agregados reciclados exercem influência sobre a curva tensão-deformação e sobre o módulo de deformação dos concretos com eles gerados.

BAKOSS e RAVINDRARAJAH (1999) enumeram 3 tipos de britadores usados para reciclar RCD: os cônicos, os de mandíbula e os de impacto. Ainda segundo tais autores, o tipo de britador utilizado na produção dos agregados reciclados afeta a forma das partículas dos mesmos, assim como a granulometria do reciclado.

Quanto à distribuição granulométrica, os britadores de mandíbula são os melhores produtores de agregados reciclados para concreto, embora estes britadores sejam mais sensíveis à presença de resíduos metálicos e de madeira que os britadores de impacto, os quais são tidos como os melhores para a produção de agregados destinados à pavimentação (HANSEN, 1986; LAMOND et al., 2002).

Quando utilizados especificamente para britar concreto, recomendam-se britadores de mandíbula para concretos leves e de baixa resistência, e britadores de impacto para concretos convencionais e de alta resistência (HANSEN, 1986).

A granulometria desejável para os agregados reciclados a serem utilizados na produção de concretos pode somente ser alcançada através de sucessivas britagens do resíduo. Já a mais desejável forma das partículas pode somente ser alcançada através de uma britagem primária seguida de uma secundária. Entretanto, sob o ponto de vista econômico, uma única britagem é usualmente o melhor processo (SCHULZ e HENDRICKS, 1992).

Em função da quantidade que o concreto representa no total de resíduos de construção e demolição e do comportamento diferenciado que os agregados provenientes da reciclagem do mesmo apresentam, convém explicar mais profundamente sobre os agregados reciclados de concreto.

#### 3.4.3 Considerações sobre os agregados reciclados de concreto

Segundo ETXEBERRIA et al. (2006), 50% do total em massa dos resíduos de construção e demolição são restos de concreto. Geralmente é aceito que quanto menor a qualidade do concreto original, menor será a qualidade do agregado produzido pela britagem e moagem do mesmo (HANSEN e NARUD, 1983). Este menor desempenho possivelmente ocorre porque, para os agregados reciclados de concreto, as qualidades da argamassa e da zona de transição, bem como o teor de argamassa do concreto original, exercem influência no desempenho de algumas propriedades dos mesmos.

Segundo RAVINDRARAJAH e TAM (1985) e HANSEN e NARUD (1983), em geral, os agregados reciclados de concreto possuem um teor de argamassa em torno de 40 a 50% do seu volume. Já ETXEBERRIA et al. (2006) afirmam que mais de 50% dos agregados reciclados de concreto possuem argamassa aderida ao agregado natural. Ainda segundo esse último autor, essa argamassa antiga é a responsável pelo pior desempenho dos concretos produzidos com os mesmos.

Como pode ser visto na Figura 3.2, no concreto produzido com agregado reciclado de concreto existem dois tipos de interface entre o agregado e a argamassa: uma interface entre o agregado natural e a argamassa antiga e uma outra interface entre a argamassa antiga e a nova argamassa, diferentemente do que ocorre no concreto convencional feito somente com o agregado natural, onde só existe um único tipo de interface (RYU, 2002a; RYU, 2002b; OTSUKI e MIYAZATO, 2000; OTSUKI et al., 2003; TAM et al., 2005; ETXEBERRIA et al., 2006).

A interface entre a argamassa e o agregado é chamada de zona de transição e é considerado o ponto mais fraco do concreto, pois é ela quem governa as propriedades do concreto convencional, tais como resistência à compressão, resistência à flexão, módulo de deformação, dentre outras (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

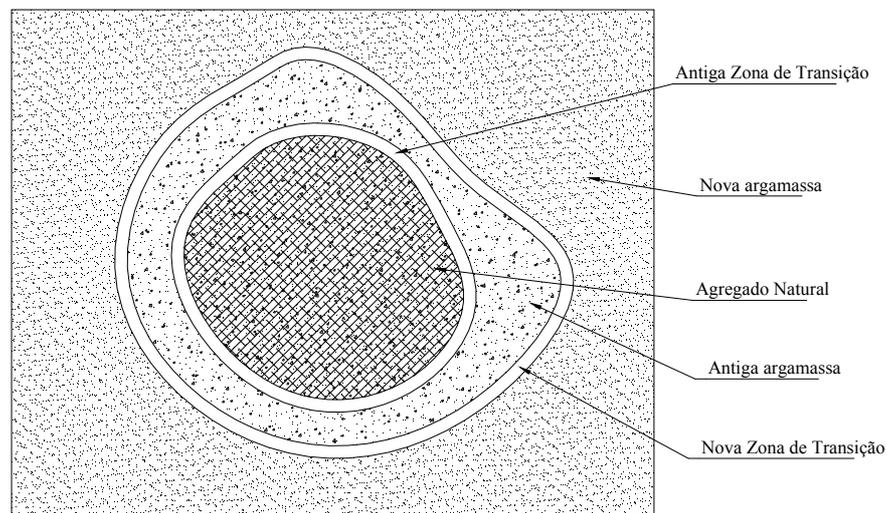


Figura 3.2 Zonas de transição do agregado reciclado de concreto

Através de ensaios laboratoriais, OTSUKI et al. (2003) comprovaram em concretos produzidos com agregados reciclados de concreto que, para as propriedades estudadas (resistência à flexão e módulo de deformação), a zona de transição também é o fator limitante de desempenho para este tipo de concreto.

Um outro fator que governa as propriedades do concreto é a relação água/cimento, que quando elevada, propicia a formação de um filme de água na superfície do agregado, promovendo o aparecimento de uma interface porosa e pouco resistente, dentre outras consequências (OTSUKI et al., 2003).

Segundo XIAO et al. (2005), a presença desses tipos de interface aumenta o desenvolvimento progressivo de microfissuras, as quais demandarão ao agregado

reciclado uma maior quantidade de água, propiciando uma menor massa específica e uma possível redução na qualidade e durabilidade dos concretos executados com estes (LIN et al., 2004).

Obviamente que concretos de alta resistência que foram preparados com uma baixa relação água/cimento ou com a adição de pozolanas, produzem agregados reciclados menos porosos e mais densos que os concretos ditos convencionais (POON et al., 2004). Coerente com isso, OTSUKI et al. (2003) obtiveram uma redução de 14% na absorção de água de agregados reciclados de concreto simplesmente aumentando a resistência da argamassa dos concretos originais em 112%.

Um outro ponto importante é a idade em que se faz a reciclagem. Em um estudo laboratorial em concretos de diferentes idades, mas de um mesmo traço, RASHWAN e ABOURIZK (1997) observaram que os agregados reciclados produzidos com os mesmos tornavam-se mais finos à medida que a idade dos concretos eram maiores. Isto é atribuído possivelmente ao fato que quanto maior o período de endurecimento, mais frágil, com relação à sua fratura, o concreto fica.

Então, para uma mesma força de britagem, concretos mais velhos, portanto mais resistentes, fraturam-se em partículas relativamente mais finas, e quanto mais fina a granulometria do agregado, maior o teor de argamassa aderida aos agregados naturais e conseqüentemente maior o teor de argamassa presente no agregado reciclado (HANSEN e NARUD, 1983). O processo de britagem dos resíduos de concreto gera, em média, aproximadamente 25% de produtos finos que conseguem passar pela malha de 5mm de diâmetro (RAVINDRARAJAH e TAM, 1987b).

Ratificando a afirmação acima, TOPÇU e SENDEL (2004) encontraram em seu experimento um teor de argamassa de 30% para os agregados graúdos e 60% para os agregados miúdos. Já KATZ (2003) encontrou um teor crescente de argamassa à medida que se diminuía a granulometria dos agregados reciclados, sendo este nos valores de 6,6%, 14,7% e 25,5% para os agregados graúdos, médios e miúdos, respectivamente.

Parece que a quantidade de vezes que o agregado reciclado passa pelos britadores também altera o teor de argamassa. Dados da pesquisa de NAGATAKI et al. (2000) apresentam que os agregados graúdos reciclados provenientes de uma, duas e três britagens apresentaram os teores de argamassa de 47,7%, 37,8% e 27,3%, respectivamente, independentemente da resistência à compressão do concreto original.

É importante conhecer o teor de argamassa no agregado reciclado porque esta afeta algumas propriedades dos concretos, tais como o módulo de deformação, o grau de fissuração e a retração por secagem (TOPÇU e SENDEL, 2004).

#### 3.4.4 Características dos agregados reciclados dos resíduos da construção civil

Para ser satisfatório no uso em determinadas aplicações, o material reciclado produzido deve atender a certas exigências de granulometria e a uma presença máxima de contaminantes, além de outras exigências de estabilidade e durabilidade.

As características físicas, químicas e mecânicas dos agregados reciclados dependem de uma série de fatores, como a composição do resíduo e o tipo de equipamento utilizado para britar o mesmo, entretanto, de uma maneira geral, os agregados reciclados são mais porosos, menos densos e mais fracos que os agregados naturais. Algumas das principais diferenças entre os agregados reciclados de RCD e os agregados naturais estão comentadas a seguir.

##### 3.4.4.1 Quanto à porosidade e à absorção de água

Os agregados reciclados apresentam forma mais irregular e alongada e uma textura superficial mais áspera e porosa que os agregados naturais, além de geralmente apresentarem uma superfície fissurada (RAVINDRARAJAH e TAM, 1987b; CARNEIRO et al., 2001; ZAHARIEVA et al., 2003; TU et al., 2006). Segundo os dados de GÓMEZ-SOBERÓN (2003) medidos em agregados reciclados de concreto, o mesmo apresentou um diâmetro médio dos poros em torno de 40% maior que os dos agregados naturais.

Tais características refletem-se diretamente na absorção de água dos agregados reciclados, geralmente apresentando valores bem superiores aos dos agregados naturais. Segundo TAM et al. (2005), agregados com altas taxas de absorção geralmente conduzem a concretos com inferiores desempenhos, afetando propriedades como resistência, durabilidade, deformação e retração. Já para os agregados reciclados de cerâmica vermelha, parece que a porosidade dos mesmos é diretamente proporcional à porosidade dos artefatos cerâmicos que os originaram e assim, conseqüentemente, à resistência mecânica dos mesmos (SCHULZ e HENDRICKS, 1992).

Ensaio realizados por ZAHARIEVA et al. (2003) em agregados graúdos reciclados de RCD encontraram uma porosidade de 12,5% enquanto que para os agregados graúdos naturais utilizados foi de 0,3%, ou seja, 41 vezes superior. Em uma pesquisa similar, mas utilizando somente agregados reciclados de concreto, GÓMEZ-SOBERÓN (2002) obteve uma porosidade total da ordem de 14,1%. Já VÁZQUEZ (2000) encontrou uma porosidade para os agregados graúdos reciclados de concreto e de cerâmica vermelha da ordem de 16,8% e 27,1%, respectivamente, enquanto que a do agregado graúdo natural foi da ordem de 2,2%.

Estudos de AKHTARUZZAMAN e HASNAT (1983), BRITO et al. (2005), VÁZQUEZ (2000) e PADMINI et al. (2002) apresentaram absorções de água da ordem de 11,2%, 12%, 14,4% e 18%, respectivamente, para agregados graúdos reciclados de cerâmica vermelha. Para SCHULZ e HENDRICKS (1992) estes valores variam entre 22 e 25%.

KHALAF e DeVEENY (2004b) afirmam que a porosidade dos agregados reciclados de cerâmica depende do tipo de argila utilizada na confecção do artefato cerâmico e da temperatura e duração da queima do mesmo. Segundo dados experimentais destes autores, os agregados reciclados provenientes da britagem de tijolos de 10 furos e de tijolos comuns apresentaram uma absorção de água da ordem de 7,2% e 11,5%, respectivamente, correspondendo a uma absorção 182% e 351%, respectivamente, superiores à absorção do agregado natural (granito).

Geralmente os agregados reciclados de concreto possuem absorções de água bem maiores que as dos agregados naturais. Esse aumento da absorção é atribuído à argamassa aderida aos agregados naturais do concreto que foi reciclado, uma vez que a primeira é bem mais porosa que o segundo (RAVINDRARAJAH e TAM, 1985; HANSEN, 1986; KATZ, 2003; RAKSHVIR e BARAI, 2006).

Para um mesmo teor de argamassa, geralmente os agregados reciclados que são provenientes de concretos de alta resistência apresentam uma absorção menor que os provenientes de concretos de baixas resistências. Isso basicamente ocorre devido a uma melhora nas propriedades da matriz de cimento (NAGATAKI et al., 2000).

POON et al. (2002) mediram as absorções de água dos agregados miúdos e graúdos reciclados de concreto, obtendo-se valores de 14% e 7,5%, respectivamente. Coerente com o resultado anterior, LIN et al. (2004) também obtiveram uma absorção de água maior para os agregados miúdos (11,9%) do que para os graúdos (7%), sendo os mesmos provenientes da britagem de concreto. Entretanto, RAVINDRARAJAH e

TAM (1987a) encontraram pequenas diferenças entre as absorções dos agregados miúdos (6,20%) e graúdos (5,68%) reciclados de concreto.

RAHAL (2007), PADMINI et al. (2002), GÓMEZ-SOBERÓN (2002), VÁZQUEZ (2000) e XIAO et al. (2005) obtiveram uma absorção de água para seus agregados graúdos reciclados de concreto da ordem de 3,5%, 4,2%, 6,3%, 7,5% e 9,3%, respectivamente. RASHWAN e ABOURIZK (1997) também determinaram a absorção de água de agregados graúdos e miúdos reciclados de concreto, sendo que para todos os resultados encontrados, a absorção dos agregados graúdos foi maior que a dos miúdos, e ambas maiores que a dos agregados naturais. Já GÓMEZ-SOBERÓN (2002) encontrou que a absorção dos agregados miúdos reciclados de concreto eram maiores que as dos graúdos, embora ambas maiores que a dos naturais.

As especificações do RILEM (1994) estabelecem um limite máximo para a absorção de água dos agregados graúdos reciclados de cerâmica e de concreto, em 20% e 10%, respectivamente. Já para os padrões japoneses, a absorção máxima dos agregados reciclados graúdos e miúdos de concreto devem ser 7% e 13%, respectivamente (HANSEN, 1992). Segundo a NBR 15116, a absorção máxima para os agregados graúdos e miúdos de resíduo de concreto (ARC) são 7% e 12%, respectivamente. Para os agregados de resíduo misto, esses valores sobem para 12% e 17%, para o graúdo e miúdo, respectivamente.

Outra característica marcante desses agregados reciclados é a velocidade com que absorvem a água. Segundo SCHULZ e HENDRICKS (1992), em até 30 minutos de submersão em água, os agregados reciclados de cerâmica absorvem 98% de toda a água que absorveriam em 24 horas de imersão. Não diferente para os agregados reciclados de concreto, BAIRAGI et al. (1993) afirmam que para este tipo de agregado a absorção também ocorre de maneira muito rápida nos primeiros 30 minutos de submersão, sendo que neste período os mesmos absorvem 76% de toda a água que absorveriam em 24 horas, enquanto que para 4 horas de submersão, esse valor sobe para 94%.

Em sua pesquisa experimental, utilizando agregados reciclados de RCD para confeccionar concreto, ZAHARIEVA et al. (2003) observaram que essa água absorvida pelos agregados reciclados era gradualmente transferida para a pasta de cimento, quando o período de cura era pequeno, ou seja, a resistência à compressão dos concretos com agregados reciclados era menos afetada que a dos concretos convencionais, para um período de cura pequeno, quando comparado com uma cura normal.

Como se pode observar pelo exposto, não existe consenso sobre as diferenças e valores das taxas de absorção de agregados miúdos e graúdos reciclados. Isto ocorre, provavelmente, em função da grande variabilidade da composição e porosidade dos RCD, bem como da forma de britagem dos mesmos. O único consenso é que os agregados miúdos e graúdos reciclados possuem absorções mais elevadas que as dos agregados naturais, e isto deve ser levado em conta na produção de concretos com agregados reciclados.

#### 3.4.4.2 Quanto à massa unitária e à massa específica

Geralmente os agregados reciclados apresentam uma massa unitária e uma massa específica menores que as dos agregados naturais. Para a massa específica, esta redução ocorre em função das características das matérias-primas dos mesmos, uma vez que são menos densas que os agregados graúdos naturais. Já para a massa unitária, além da redução pela própria densidade do material e da alta porosidade característica dos agregados reciclados, a forma irregular das partículas dos agregados contribui para a redução da mesma. Entretanto, essas reduções são dependentes também da granulometria dos agregados reciclados.

Segundo estudos de BRITO et al. (2005), com agregados graúdos reciclados de cerâmica vermelha, os mesmos apresentaram uma massa unitária e uma massa específica 25% e 23%, respectivamente, menores que as dos agregados naturais, para uma mesma distribuição granulométrica. Em um estudo semelhante com agregados reciclados de cerâmica, provenientes de tijolos comuns e de tijolos de 10 furos, KHALAF e DeVENNY (2004b) encontraram uma massa específica 30,9% e 21,1% menores, respectivamente, quando comparados com a massa específica do agregado natural (granito).

Seguindo essa tendência, KHALOO (1994) obteve massas específicas e massas unitárias em torno de 33% e 22%, respectivamente, menores para os agregados graúdos reciclados de cerâmica vermelha quando comparados com as dos agregados naturais. Já ZAKARIA e CABRERA (1996) obtiveram massas unitárias 20,5% menores para os mesmos tipos de agregados.

Para os agregados reciclados de concreto, parece que esta redução nas massas específica e unitária dos mesmos, quando comparados com as dos agregados naturais, também ocorre. Exemplificando isso, BAIRAGI et al. (1993) e LIMBACHIYA et al.

(2000) encontraram para os agregados graúdos reciclados de concreto, uma massa unitária 8,9% e 7,5% inferiores as dos agregados naturais, respectivamente, e uma massa específica 13,6% e 12,5% inferiores, respectivamente. Já RAVINDRARAJAH e TAM (1987b) apresentaram uma menor massa unitária para o agregado miúdo reciclado de concreto, com valor 11% menor que a do agregado miúdo natural utilizado.

A possível explicação para esse fenômeno, tanto para os agregados reciclados de concreto quanto de argamassa, seria que ambos são constituídos por uma considerável parcela de matriz de cimento. Como comumente essa matriz de cimento é menos densa que os agregados naturais, além do que geralmente há uma inclusão de poros, tornando, portanto, esses agregados menos densos que os naturais. De uma maneira geral, a massa específica e a massa unitária desses agregados reciclados vão depender bastante da matriz de cimento.

Dentre os agregados reciclados de concreto e de argamassa, os primeiros geralmente apresentam valores de massa específica e unitária ligeiramente superiores aos dos segundos, em função da presença do agregado graúdo natural, que é mais denso, e da proporção matriz:agregado natural, que é menor. Coerente com isso, RAVINDRARAJAH e TAM (1985) apresentaram massas unitárias, para agregados graúdos reciclados de concreto e de argamassa, 8,4% e 16,7% inferiores, respectivamente, que a do agregado natural.

Quando provenientes de uma mesma matéria-prima, também nota-se uma diferenciação entre os valores das massas específica e unitária dos agregados graúdos e miúdos reciclados. Esta diferença ocorre basicamente em função da maior ou menor presença da argamassa aderida ao agregado natural e do arranjo dos grãos (empacotamento), devido à forma dos mesmos. Coerente com isso, HANSEN (1992) cita a massa específica de agregados miúdos e graúdos reciclados de um mesmo concreto, nos valores de  $2490 \text{ kg/m}^3$  e  $2340 \text{ kg/m}^3$ , respectivamente.

Ratificando o que foi citado anteriormente, alguns autores, tais como HANSEN e NARUD (1983), HANSEN e BØEGH (1985), RAVINDRARAJAH e TAM (1987a), TAVAKOLI e SOROUSHIAN (1996a), GÓMEZ-SOBERÓN (2002), KATZ (2003), OTSUKI et al. (2003), ZAHARIEVA et al. (2003), POON et al. (2004), XIAO et al. (2005) e TU et al. (2006) apresentaram em suas pesquisas agregados reciclados de concreto com uma massa específica e uma massa unitária menores que as dos agregados naturais por eles utilizados.

#### 3.4.4.3 Quanto a outras características

De uma forma geral, algumas das demais características dos agregados reciclados, tais como a resistência a impactos, ao esmagamento e à abrasão, a perda de massa, dentre outras, também são consideravelmente inferiores que às dos agregados naturais, tanto para os agregados reciclados de concreto (RAVINDRARAJAH e TAM, 1985; RAVINDRARAJAH e TAM, 1987b; HANSEN, 1992; NAGATAKI et al., 2000) quanto para os reciclados de cerâmica (ZAKARIA e CABRERA, 1996; SENTHAMARAI e MANOHARAN, 2005). Para os agregados reciclados de argamassa, possivelmente o desempenho dos mesmos seria também minorado para essas outras características.

### 3.5 Considerações finais

Apesar dos RCD possuírem uma composição variável, estes apresentam grande potencial para a reciclagem, sendo a produção de agregados reciclados a sua maior vertente. Em geral, os agregados reciclados são mais porosos, menos resistentes, apresentando ainda uma maior absorção de água que os agregados naturais. Entretanto, estes agregados geralmente apresentam um custo de produção inferior ao dos agregados naturais, sendo que com a sua utilização, ainda há um “ganho ambiental”, uma vez que deixa-se de extrair matéria-prima natural e dá-se um destino final a um tipo de resíduo que tem considerável participação nos RSU. De uma forma geral, estes agregados apresentam grande potencial de utilização como insumo na construção civil.

O uso de agregados reciclados na fabricação de concretos aparece nos dias de hoje como uma proposta bastante praticável. Todavia, o seu uso ainda não é difundido em função das desconfianças dos construtores e clientes quanto ao bom desempenho dos produtos confeccionados com os mesmos. Contudo, acredita-se que a produção de concretos de desempenho mecânico e de durabilidade aceitáveis a partir de agregados reciclados é perfeitamente viável, bastando se conhecer e controlar as principais variáveis intervenientes, tais como a variabilidade dos seus constituintes.

## **CAPÍTULO 4 – CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO COM AGREGADOS RECICLADOS**

### 4.1 Propriedades do concreto

4.1.1 Massa específica

4.1.2 Trabalhabilidade

4.1.3 Porosidade, absorção de água, permeabilidade e volume de vazios

4.1.4 Resistência à compressão

4.1.5 Módulo de deformação

4.1.6 Resistência à tração

4.1.7 Resistência à abrasão

4.1.8 Retração por secagem

4.1.9 Resistência ao fogo

4.1.10 Profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos

4.1.11 Outras propriedades

### 4.2 Modelagem de propriedades do concreto com agregados reciclados

### 4.3 Considerações finais

## **4 CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO COM AGREGADOS RECICLADOS**

Uma vez que o desempenho do concreto quando é feita a substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados é modificado, faz-se necessário entender o comportamento desses concretos com relação a algumas propriedades, tanto de natureza mecânica quanto com relação à sua durabilidade.

### **4.1 Propriedades do concreto**

#### **4.1.1 Massa específica**

Como visto no capítulo anterior, os agregados reciclados geralmente possuem uma massa específica menor que a dos agregados naturais. Como consequência, os concretos produzidos por estes agregados também geralmente apresentam uma massa específica menor que a dos concretos produzidos com os agregados naturais, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Em contribuição, alguns estudos apontam que o teor de ar incorporado nos concretos com agregados reciclados é maior que nos concretos convencionais (HANSEN, 1986; SCHULZ e HENDRICKS, 1992; KATZ, 2003).

Parece que há uma relação linear entre a massa específica da partícula do agregado reciclado e a massa específica do concreto com ele produzido, sendo isso particularmente importante para o controle de qualidade do mesmo (SCHULZ e HENDRICKS, 1992). Tal comportamento é comprovado em estudos realizados por POON et al. (2002) e BAIRAGI et al. (1993), uma vez que estes apontam que há um crescente decréscimo na massa específica dos concretos confeccionados com agregados reciclados de concreto, quando se aumenta o teor de substituição dos agregados naturais pelos reciclados, chegando a uma redução de 7% e 5,7%, respectivamente, para 100% de substituição.

Estudando concretos com agregados reciclados de concreto, GÓMEZ-SOBERÓN (2002) e TOPÇU e SENDEL (2004) igualmente obtiveram uma relação linear de decréscimo na massa específica dos mesmos, chegando a uma redução aproximada de 2% e 6%, respectivamente, para 100% de substituição. Coerente com os resultados dos demais, RAVINDRARAJAH e TAM (1985) e RAHAL (2007) encontraram uma redução na massa específica dos concretos feitos com 100% de agregados reciclados de concreto em torno de 4%. KATZ (2003) também encontrou valores inferiores para a massa específica dos concretos confeccionados com agregados reciclados de concreto, sendo que a redução da mesma foi superior às demais reduções apresentadas (12,4%).

Para concretos com agregados reciclados de cerâmica vermelha, KHALAF e DeVEENY (2004b) e KHALAF (2006) encontraram massas específicas de 8 a 15% menores que a dos concretos produzidos com os agregados naturais. AKHTARUZZAMAN e HASNAT (1983) encontraram para concretos com agregados graúdos reciclados de cerâmica vermelha uma massa específica 17% menor que a dos concretos de referência. Já KAHLOO (1994) encontrou uma massa específica para os concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de cerâmica vermelha 4,8% e 9,5% inferiores que a dos concretos convencionais, para 50% e 100% de substituição, respectivamente.

De acordo com os dados acima expostos, parece então que o agregado reciclado de cerâmica vermelha reduz mais a massa específica dos concretos produzidos com eles que o agregado reciclado de concreto. Coerente disso, os resultados de KHATIB (2005), que estudou a produção de concretos com a substituição crescente dos agregados miúdos naturais pelos miúdos reciclados de cerâmica vermelha e de concreto, indicam que o agregado reciclado de cerâmica vermelha reduz mais incisivamente a massa específica dos concretos que os agregados reciclados de concreto, chegando a uma redução de 6,6% para os primeiros e de 4,4% para os últimos, para um teor de substituição de 100%.

HANSEN (1992) conclui, em sua ampla discussão sobre o assunto que o teor de ar aprisionado no concreto com agregados reciclados é, em sua grande maioria, ligeiramente superior ao dos concretos convencionais com agregados naturais e que a massa específica desses concretos sempre será inferior à dos concretos convencionais, usualmente variando entre 5% e 15%.

O fato dos concretos produzidos com agregados reciclados apresentarem uma menor massa específica que os concretos convencionais sugere que os mesmos podem ser utilizados em situações onde o peso próprio da estrutura é um problema, além do que pode-se ainda reduzir as seções das peças estruturais, representando uma considerável economia financeira.

#### 4.1.2 Trabalhabilidade

De uma maneira geral, os concretos com agregados reciclados apresentam uma menor trabalhabilidade que a dos concretos com agregados naturais, para uma mesma relação teor de materiais secos/pasta. Isso possivelmente ocorre devido à maior absorção dos agregados reciclados, tornando a mistura mais seca e, conseqüentemente, menos trabalhável. Um outro motivo seria que, devido aos processos de britagem e moagem, os agregados reciclados tornam-se mais angulares, com uma razão superfície/volume maior que a dos conhecidos agregados naturais, que são mais esféricos e de superfície mais lisa. Como resultado disso, a fricção interna dos concretos com agregados reciclados é alta, exigindo maior quantidade de pasta para se ter uma mesma trabalhabilidade que a dos concretos com agregados naturais (HANSEN e NARUD, 1983; RASHWAN e ABOURIZK, 1997; RAKSHVIR e BARAI, 2006).

Para os concretos feitos com agregados reciclados que possuam argamassa, tais como os agregados reciclados de concreto e de argamassa, há também a possibilidade da geração de finos durante o processo de mistura, devido ao desgaste da argamassa antiga contida no agregado reciclado, em função do atrito dos agregados, aumentando assim a coesão dos mesmos, e diminuindo a trabalhabilidade (HANSEN e NARUD, 1983; HANSEN, 1986).

TOPÇU (1997) e TOPÇU e SENDEL (2004) constataram uma redução na trabalhabilidade em concretos produzidos com agregados reciclados de concreto, chegando a uma redução de 15 a 25% na mesma, medida pelo abatimento do tronco de cone, para 100% de substituição. Já BAIRAGI et al. (1993) acharam reduções bem maiores na trabalhabilidade (de 33 a 50%), sendo que essa perda foi mais evidenciada nos primeiros 15 minutos após a mistura dos materiais.

Parece que há também uma redução da trabalhabilidade dos concretos produzidos com agregados reciclados de cerâmica vermelha uma vez que ZAKARIA e CABRERA (1996) encontraram em seus experimentos uma redução de 25% no

abatimento do tronco de cone dos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de cerâmica vermelha.

Em pesquisas relatadas por HANSEN (1986), a substituição dos agregados miúdos naturais pelos miúdos reciclados interfere de maneira mais incisiva na trabalhabilidade que a substituição dos agregados graúdos.

Quando ocorre a substituição conjunta dos agregados graúdos e miúdos naturais pelos reciclados de concreto, parece que há uma perda maior ainda na trabalhabilidade que a evidenciada na substituição do agregado graúdo natural pelo seu correspondente reciclado (RAVINDRARAJAH e TAM, 1987a).

Entretanto, esse decréscimo na trabalhabilidade geralmente é bem contornado com a adição de uma quantidade adicional de água de amassamento, que segundo RAVINDRARAJAH e TAM (1985), gira entre 5 e 8%, ou de aditivo.

MUKAI et al. (1978), citados por HANSEN (1992), são mais detalhistas. Segundo tais autores, concretos produzidos com substituição do agregado graúdo pelo reciclado exigirá aproximadamente  $10 \ell/m^3$  ou 5% a mais de água que os concretos de controle, de maneira a alcançar a mesma trabalhabilidade. Quando se faz a substituição conjunta dos agregados graúdos e miúdos pelos respectivos reciclados, aproximadamente  $25 \ell/m^3$  ou 15% a mais de água serão exigidos. Para que não se tenha modificações na relação água/cimento, também se deve adicionar à mistura a quantidade correspondente de cimento para mantê-la. Convém, entretanto ressaltar que os valores acima citados pelos referidos autores depende da composição dos reciclados e do tipo de processo de britagem e não podem ser tomados como absolutos.

#### 4.1.3 Porosidade, absorção de água, permeabilidade e volume de vazios

Geralmente os concretos confeccionados com agregados reciclados são caracterizados por uma alta percentagem de meso e macro poros, sugerindo assim uma porosidade com maior tendência à absorção de água e à lixiviação, do que os preparados com agregados naturais (SANI et al., 2005). Segundo estudos de GÓMEZ-SOBÉRON (2002), a distribuição dos poros em concretos com substituição do agregado natural pelo reciclado é modificada, embora sendo mais sentida para altos teores de substituição.

Para os concretos produzidos com agregados reciclados de argamassa e de concreto, essa porosidade parece aumentar à medida que se aumenta o teor de

substituição do agregado natural pelo agregado reciclado, uma vez que gradativamente se aumenta o teor de pasta no concreto, e assim, conseqüentemente, aumenta-se o volume de poros, uma vez que claramente a argamassa é mais porosa que o agregado natural (GÓMEZ-SOBERÓN, 2003; ETXEBERRIA et al., 2006). Segundo LIMBACHIYA et al. (2000), o teor de pasta de cimento no concreto com 100% de agregado gráudo reciclado de concreto é cerca 3 vezes maior que o teor da mesma no concreto com 30% do mesmo tipo de agregado.

Para os concretos com agregados reciclados de cerâmica vermelha, ZAKARIA e CABRERA (1996) comentam que tais concretos apresentaram uma porosidade 53% superior que a do concreto de referência. Ainda segundo tais autores, o agregado reciclado de cerâmica vermelha possui uma maior porosidade que a dos agregados naturais, então concretos confeccionados com esses agregados possivelmente também terão uma alta porosidade. A porosidade total desses concretos também é afetada pela elevada angularidade dos agregados reciclados de cerâmica, sendo que esta geralmente aumenta o volume de poros da mistura.

Essa maior porosidade dos concretos produzidos com os agregados reciclados é então revertida em uma maior absorção de água por parte dos mesmos. Pesquisando a absorção de água em concretos com agregados gráudos reciclados de concreto, RAVINDRARAJAH e TAM (1985) encontraram uma absorção de água 22% maior, em média.

GÓMEZ-SOBERÓN (2002) apresentou que a gradual substituição dos agregados gráudos naturais pelos reciclados de concreto aumenta a porosidade do concreto em até 11,7% e a absorção de água em até 14,3%, para os teores máximos de substituição. Coerente com isso, SAGOE-CRENTSIL et al. (2001) e KATZ (2003) encontraram resultados semelhantes, mas para concretos feitos com agregados reciclados de concreto, uma vez que estes apresentaram uma absorção de água 25% e 89% maiores, respectivamente.

Os resultados de alguns trabalhos citados por HANSEN (1992) apresentam que a absorção de água de concretos com agregados reciclados de concreto é maior que a dos concretos com agregados convencionais. Segundo tal autor, isso não é nenhuma surpresa uma vez que os concretos com agregados reciclados contêm uma grande fração volumétrica com os porosos agregados reciclados distribuídos na matriz, enquanto que os concretos convencionais possuem agregados naturais (menos porosos) distribuídos na mesma matriz.

Entretanto, convém salientar que os resultados apresentados pelo último autor referem-se a concretos de pequenas a médias resistências, onde a matriz não possui uma baixa porosidade. Isso porque para os concretos confeccionados com agregados reciclados de concreto, a resistência mecânica do concreto original não influi de maneira significativa na absorção de água dos mesmos, quando estes concretos com agregados reciclados possuem baixa resistência mecânica (PADMINI et al., 2002). Isto ocorre, segundo tais autores, porque é a nova camada de argamassa que se forma sobre os agregados reciclados que agora controla a absorção de água.

Ainda segundo tais autores, para resistências mais altas de concretos com agregados reciclados de concreto, a absorção do agregado reciclado tem uma participação mais importante na absorção do concreto e nesse caso, os concretos feitos com agregados reciclados provenientes de concretos mais resistentes produziram concretos com maior absorção de água, uma vez que o teor de pasta nos mesmos é maior.

Já a permeabilidade dos concretos com agregados reciclados é dependente principalmente da qualidade da matriz, uma vez que se a matriz for pouco permeável, esta não permitirá que a água penetre. Entretanto, como esta matriz, para a grande maioria dos concretos corriqueiramente confeccionados, não é de boa qualidade, a qualidade do agregado reciclado passa a ter grande importância.

Coerente com isso, RYU (2002a) afirma que a permeabilidade dos concretos confeccionados com agregados reciclados também é dependente da qualidade do agregado reciclado. Segundo o autor, a permeabilidade aumenta quando a resistência de aderência da pasta ao agregado reciclado decresce. Os resultados dos experimentos de UJIKE (2000) estão de acordo com a afirmação anterior, uma vez que a qualidade dos agregados graúdos reciclados de concreto utilizados teve influência sobre a permeabilidade à água e ao ar dos concretos com eles confeccionados.

Coerente com os resultados anteriores, mas pesquisando concretos com agregados reciclados de cerâmica, SHULZ e HENDRICKS (1992) encontraram que a profundidade que a água alcançava era 50% maior para esses concretos que para os concretos de referência.

ZAHARIEVA et al. (2003) encontraram, para concretos confeccionados com agregados reciclados de RCD, uma porosidade 133% maior, em média, que a dos concretos produzidos com agregados naturais. Esses mesmos pesquisadores

encontraram que a permeabilidade à água e ao ar dos concretos com agregados reciclados de RCD era o dobro da dos confeccionados com agregados naturais.

Em sua pesquisa envolvendo agregados reciclados graúdos e miúdos, tanto de concreto quanto de cerâmica vermelha, LEVY (2001) encontrou uma maior absorção de água e um maior índice de vazios para os concretos com agregados graúdos de cerâmica vermelha quando comparado com os concretos com agregados graúdos de concreto. Quando a substituição foi realizada nos agregados miúdos, o concreto com o reciclado de cerâmica vermelha apresentou os menores índices.

Estudos realizados por PADMINI et al. (2002) apontam que concretos confeccionados com agregados reciclados de cerâmica apresentam um volume de vazios maior que concretos fabricados com agregados reciclados de concreto, para uma mesma distribuição granulométrica.

Segundo RASHEEDUZZAFAR e KHAN (1984), citados por HANSEN (1992), parece que a baixa resistência e a correspondente alta absorção de água dos concretos com agregados reciclados podem ser compensadas com a produção de concretos com uma relação água/cimento 0,05 a 0,10 menor que a dos concretos convencionais.

Então, pelo exposto, parece que o desempenho dos concretos produzidos com agregados reciclados, quanto à porosidade, à absorção de água, à permeabilidade e ao volume de vazios, é dependente da qualidade do agregado reciclado e da matriz de cimento do novo concreto. Geralmente, tais concretos parecem ter um desempenho inferior aos dos concretos convencionais, para tais propriedades.

#### 4.1.4 Resistência à compressão

Vários trabalhos (RAVINDRARAJAH e TAM, 1985, 1987a; HANSEN, 1992; BAIRAGI et al., 1993; AJDUKIEWICZ e KLISZCZEWICZ, 2002; GÓMEZ-SOBERÓN, 2002, 2003; KATZ, 2003; ZAHARIEVA et al., 2003; TOPÇU e SENDEL, 2004; XIAO et al., 2005; RAKSHVIR e BARAI, 2006; TU et al., 2006; RAHAL, 2007; XIAO e FALKNER, 2007) apontam que a resistência à compressão de concretos produzidos com agregados reciclados geralmente é menor que a de concretos produzidos com agregados naturais, para um mesmo consumo de cimento. Segundo dados dos referidos autores, essas reduções podem atingir até a ordem de 45% da resistência dos concretos de referência.

Entretanto, há autores (HANSEN, 1992; LEITE, 2001; AJDUKIEWICZ e KLISZCZEWICZ, 2002; VIEIRA, 2003; KHATIB, 2005) que apresentam em suas pesquisas acréscimos na resistência dos concretos de até 33% quando substituíram os agregados naturais pelos reciclados.

Essa discordância é causada em função das várias variáveis intervenientes, tais como o tipo de britadores utilizados na produção dos agregados reciclados, os quais influenciam na forma dos agregados reciclados e conseqüentemente no teor de vazios do concreto produzido, o tipo de cimento utilizado, a composição do resíduo utilizado, a metodologia de substituição utilizada, dentre outros fatores.

Quando a matriz do concreto produzido com agregados reciclados for menos resistente que o próprio agregado reciclado, este último não exercerá grande influência na resistência mecânica do concreto, uma vez que a matriz será o elo mais fraco do mesmo, portanto muito possivelmente o concreto irá romper na matriz.

Entretanto, quando a matriz do concreto for mais resistente que o agregado reciclado, este último passará a ter substancial influência na resistência do concreto, uma vez que possivelmente o concreto romperá no agregado.

Geralmente, o agregado reciclado é menos resistente que o agregado natural, em função de suas características físicas, apresentando uma alta porosidade, alta absorção de água e uma baixa massa unitária e específica (ver item 3.4.4). Exemplificando, RAVINDRARAJAH et al. (2000) obtiveram uma resistência mecânica para os agregados reciclados de RCD 68% inferiores, em média, à resistência dos agregados naturais. Então, para concretos com matrizes resistentes (de baixa relação a/c) é de se esperar que os concretos com agregados reciclados tenham uma resistência à compressão menor que a resistência à compressão dos concretos com agregados naturais.

No caso específico para concretos produzidos com agregados reciclados de concreto, parece que a resistência do concreto que originou o agregado reciclado não afeta a resistência à compressão dos concretos produzidos com estes, quando a relação água/cimento é alta, entretanto quanto mais alta a resistência do concreto com agregado reciclado de concreto, mais dependente este fica da resistência do concreto que originou o agregado reciclado.

Coerente com a afirmação acima, HANSEN e BØEGH (1985) e HANSEN e NARUD (1983) produziram concretos de alta, média e baixa resistência com agregados reciclados de três tipos de concretos (de alta, média e baixa resistência), sendo que os

resultados por eles encontrados apontam que, para os concretos de alta resistência, a qualidade do agregado reciclado utilizado influi na resistência à compressão obtida e que esse comportamento foi menos visível para os concretos de baixa resistência.

De forma semelhante, OTSUKI e MIYAZATO (2000) e KOKUBU et al. (2000) relatam em suas pesquisas que a resistência à compressão de concretos confeccionados com agregados reciclados de concreto apresenta maiores diferenças para a resistência dos concretos com agregados naturais quando a relação água/cimento dos concretos reciclados decresce.

Avalizando tais afirmações, RYU (2002b), em seu experimento, produziu concretos com agregados reciclados de concreto de diversas resistências, obtendo resistências à compressão praticamente idênticas para a relação água/cimento de 0,55 enquanto que para a relação água/cimento de 0,25, quanto menor a resistência à compressão do concreto que originou o agregado reciclado, menor a resistência do concreto originado com os mesmos.

Em uma outra pesquisa, MASCE et al. (2003) observaram que as resistências à compressão e à tração de concretos feitos com agregados reciclados e naturais foram iguais para relações água/cimento de 0,40, 0,55 e 0,70, enquanto que para a relação água/cimento de 0,25, as resistências do concreto com agregado reciclado foram menores que as do concreto com agregado natural.

Já RAHAL (2007) observou que à medida que a relação água/cimento diminui, a diferença de resistência à compressão entre os concretos feitos com agregado gráudo natural e gráudo reciclado de concreto aumentava.

Então, parece ser possível produzir concretos com agregados reciclados com a mesma ou até superior resistência que a dos concretos originais, para uma mesma relação água/cimento e idêntico controle, bastando para tanto que se use um agregado reciclado e uma matriz de excelentes qualidades.

HANSEN (1992), em sua extensa revisão bibliográfica, confirma a afirmação acima. Também há outros autores (NIGATAKI et al., 2000; LIMBACHIYA et al., 2000; SHAYAN e XU, 2003; DHIR et al., 2004b) que apontam que mesmo usando agregados reciclados pode-se produzir concretos de resistências superiores a 50 MPa, aos 28 dias.

Parece que a zona de transição formada entre o agregado reciclado e a matriz de cimento é melhor para os concretos feitos com agregados reciclados que para os concretos feitos com agregados naturais, em função da maior angulosidade e da textura

mais rugosa dos agregados reciclados, pois assim colaboram para uma maior aderência entre a pasta e o agregado. Além disso, o material reciclado produz uma maior absorção de pasta de cimento, fazendo com que cristais de hidratação precipitem nos poros entre o agregado e a pasta, propiciando um maior fechamento da zona de transição (LEITE, 2001).

Especificamente para os concretos produzidos com agregados reciclados de concreto, parece que há duas zonas de transição entre o agregado e a matriz (ver Figura 3.2). Alguns pesquisadores (OTSUKI e MIYAZATO, 2000; KOKUBU et al., 2000; NIGATAKI et al., 2000; RYU, 2002b; MASCE et al., 2003) afirmam que, para concretos produzidos com baixas relações água/cimento, ambas as zonas de transição (nova e velha) exercem influência sobre a resistência do concreto novo. Esta afirmação corrobora com as feitas anteriormente, ou seja, parece que a qualidade dos agregados reciclados de concreto somente afeta a resistência à compressão dos concretos feitos com os mesmos quando a relação água/cimento do novo concreto é baixa, pois somente neste caso a zona de transição antiga seria solicitada.

Ratificando o que acima foi dito, RASHEEDUZZAFAR e KHAN (1984), citados por HANSEN (1986), e RYU (2002a) dizem que a resistência do concreto com agregado reciclado de concreto depende da qualidade da nova zona de transição quando a qualidade da antiga zona de transição for melhor que a nova. Quando a qualidade da nova zona de transição for melhor que a antiga, a resistência do concreto com agregado reciclado de concreto dependerá da qualidade da antiga zona de transição, ou seja, da qualidade do agregado reciclado.

Ensaio realizados por OTSUKI e MIYAZATO (2000), medindo a resistência da zona de transição de concretos com agregados reciclados de concreto confirmam que quanto mais resistente o concreto que originou o agregado reciclado, mais resistente é a antiga zona de transição do concreto confeccionado com este agregado reciclado. Entretanto, ao medirem a resistência da nova zona de transição, esta se mostrou equivalente, para todos os concretos de mesma relação água/cimento produzidos, inclusive para o de referência.

Parece que as substituições dos agregados graúdos e dos miúdos exercem graus de influências diferentes sobre a resistência à compressão dos concretos. Exemplificando, RAVINDRARAJAH e TAM (1987a) afirmam que os agregados graúdos reciclados de concreto exercem uma maior influência na resistência à compressão que a parte miúda reciclada, sendo que a redução obtida quando feita a

substituição conjunta foi da ordem de 10%. Já UJIKE (2000) e KOKUBU et al. (2000) encontraram que os agregados miúdos reciclados de concreto afetaram de maneira mais incisiva a resistência à compressão dos concretos com agregados reciclados que os agregados graúdos reciclados.

Agregados reciclados de argamassa parecem também influenciar negativamente no desempenho da resistência à compressão de concretos produzidos com os mesmos. HANSEN e BØEGH (1985), ao substituírem o agregado graúdo natural pelo agregado graúdo reciclado de argamassa, encontraram uma resistência à compressão 50% menor que a do concreto com agregados naturais.

Esse comportamento também parece persistir ao se substituir os agregados naturais pelos reciclados de cerâmica vermelha, uma vez que BRITO et al. (2005), ao substituir o agregado graúdo natural pelo agregado graúdo reciclado de cerâmica vermelha, nos teores de 33%, 66% e 100%, obteve uma redução na resistência à compressão da ordem de 22%, 24% e 44%, respectivamente. KHALAF (2006) encontrou uma redução média de 8,7% para concretos com este mesmo tipo de agregado.

Entretanto, ZAKARIA e CABRERA (1996) e SENTHAMARAI e MANOHARAN (2005) encontraram valores de resistência à compressão praticamente idênticos aos dos concretos de referência, para concretos confeccionados com os mesmos tipos de agregados e SHULZ e HENDRICKS (1992) apontam valores superiores para a resistência à compressão dos concretos com agregados reciclados de cerâmica vermelha. Ao analisar esses resultados, deve-se fazê-lo com cautela, uma vez que essas resistências superiores podem ter sido provocadas por uma redução na relação água/cimento, ao não se adicionar água suficiente para que o agregado reciclado absorva, ou ainda, podem ser resultado do efeito pozolânico provocado por partículas finas presentes nos agregados de cerâmica.

Parece também que a resistência da partícula do agregado reciclado de cerâmica vermelha depende da resistência do bloco cerâmico que o produziu (SCHULZ e HENDRICKS, 1992). Coerente com isso, KHALAF e DeVEENY (2004b), em um estudo experimental envolvendo agregados reciclados de cerâmica provenientes de blocos cerâmicos de 10 furos e do tipo comum (maciço), apontam que a resistência dos concretos confeccionados com agregados reciclados de cerâmica vermelha é diretamente proporcional à resistência do bloco cerâmico. Em uma pesquisa mais

recente, utilizando blocos cerâmicos maciços, de 3 e 5 fendas e de 10 furos, KHALAF (2006) reitera as conclusões anteriores.

Entretanto, PADMINI et al. (2002) associam a resistência do concreto com agregado reciclado de cerâmica com a massa específica dos blocos que originaram os agregados e não com a resistência dos blocos, conforme seus resultados experimentais.

Já SHULZ e HENDRICKS (1992) afirmam que, para os agregados reciclados de cerâmica vermelha, parece que a resistência mecânica do bloco cerâmico que originou esses agregados somente exercerá influência quando o consumo de cimento for superior a  $350 \text{ kg/m}^3$ , ou seja, para baixas relações a/c. Para os agregados miúdos, há estudos que apontam aumento da resistência à compressão dos concretos com estes confeccionados, em função de possíveis reações pozolânicas provocadas pelos finos da cerâmica.

Substituindo conjuntamente os agregados graúdos e miúdos naturais pelos agregados reciclados, parece que a tendência de redução da resistência à compressão dos concretos com estes confeccionados é mantida, e em alguns casos, essa redução é até potencializada.

Em coerência com o acima dito, os resultados apresentados por BCSJ (1978), citados por HANSEN (1986), apontam que a resistência à compressão de concretos confeccionados com 100% de agregados graúdos reciclados de concreto e 50% de agregados miúdos reciclados de concreto e 50% naturais foi de 10 a 20% menor que a resistência do concreto feito com 100% de agregados naturais. Quando se aumentou o teor de substituição do agregado miúdo para 100% de reciclado de concreto, a resistência foi de 20 a 40% menor que a resistência do concreto feito totalmente com agregados naturais.

Coerente com isso, HANSEN e MARGA (1989), citado por HANSEN (1992), e KOKUBU et al. (2000) encontraram uma redução de aproximadamente 30% e 23,3%, respectivamente, no concreto produzido com 100% de agregados miúdos e graúdos reciclados de concreto, quando comparados com o concreto de referência.

No experimento de SANI et al. (2005), os concretos confeccionados com agregados reciclados miúdos e graúdos, compostos de 25 a 32% de cerâmica e de 35 a 45% de concreto, apresentaram uma resistência à compressão 40% menor que a dos concretos com agregados naturais.

Segundo as recomendações do RILEM (1994), para o uso de agregados graúdos reciclados na produção de concretos, os agregados originários de resíduos de alvenaria só podem ser utilizados para produzir concretos com resistências máximas de 16-

20MPa enquanto que os agregados reciclados que são originários de resíduos de concreto são indicados para concretos de no máximo 50-60MPa. Já os agregados reciclados que são originários de uma mistura de no mínimo 80% de agregados naturais e de no máximo 10% de agregados reciclados de alvenaria não têm limitações de resistência para o seu emprego.

Entretanto, há registros do uso de agregados reciclados em concretos estruturais, embora, em tais casos, geralmente a quantidade desses agregados utilizada é limitada a um pequeno teor, não maior que 40% (POON et al., 2002).

Algumas técnicas podem ser utilizadas para se elevar a resistência do concreto com agregados reciclados a níveis iguais ou superiores às resistências dos concretos convencionais, tais como o uso conjunto de adições minerais (sílica ativa, metacaulim, escórias de aciaria, de alto-forno ou de cobre) e aditivos super-plastificantes. Uma outra maneira de se compensar a perda na resistência é simplesmente forçar uma diminuição na relação água/cimento dos concretos com agregados reciclados, o que implica em um maior consumo de cimento. Segundo dados de HANSEN (1992), para se manter a mesma resistência do concreto convencional, são necessários pelo menos 5% a mais de cimento quando se realiza somente a substituição do agregado graúdo. Quando ambos agregados são substituídos, esse teor adicional sobe para 15%.

Uma outra técnica utilizada é o método de mistura dos constituintes do concreto chamado de *double-mixing*, onde a diferença para o método tradicional é que a água é adicionada em duas etapas. O objetivo deste método é fazer com que os agregados reciclados tenham contato primeiramente com uma argamassa de baixa relação água/cimento, sendo envolvidos por uma camada desta argamassa, obtendo assim melhores propriedades na nova zona de transição. Resultados dos ensaios de OTSUKI e MIYAZATO (2000) apontam que o método melhora as propriedades do concreto, como resistência à compressão, resistência à tração, profundidade de carbonatação e penetração de cloretos.

TSUJI et al. (2000) descreve uma técnica que consiste em submergir os agregados reciclados em uma solução coloidal de sílica por 30 minutos antes da confecção dos concretos. Segundo tais autores, a solução pozolânica é absorvida pelos agregados, posteriormente preenchendo as microfissuras existentes nos mesmos com o gel produzido pela reação pozolânica, melhorando assim o desempenho dos concretos confeccionados com os mesmos. Utilizando tal técnica, esses autores atingiram resistências à compressão bastante similares às do concreto de referência.

Caso se faça uso de aditivos e adições, pode-se alcançar resistências ainda maiores que às dos concretos que originaram os agregados reciclados de concreto, como mostra AJDUKIEWICZ e KLISZCZEWICZ (2002) que alcançaram resistências de 80 MPa utilizando agregados reciclados de um concreto original de cerca de 60 MPa. Já LIMBACHIYA et al. (2000), utilizando agregados reciclados de concretos provenientes de demolições como agregados graúdos, atingiram 70 MPa aos 28 dias de idade.

Em geral, os agregados reciclados utilizados para a produção dos concretos são desprovidos de contaminantes, tais como pedaços de madeira, vidro, asfalto, gesso, dentre outros. Entretanto, eventualmente tais contaminantes podem vir inseridos nos agregados reciclados e serem adicionados à massa do concreto produzido. HANSEN (1986), conforme a Tabela 4.1, exemplifica a interferência de alguns contaminantes sobre a resistência à compressão do concreto, mostrando o volume percentual dos contaminantes, que quando adicionados ao concreto, reduzem a resistência à compressão em 15%, quando comparados com os concretos de referência.

Tabela 4.1 Volume percentual de impurezas que reduzem a resistência à compressão em 15% quando comparados com os concretos de referência (HANSEN, 1986)

Impureza	Solo	Madeira	Gesso Hidratado	Asfalto	Pintura com acetato de vinil
Volume percentual do agregado	5	4	3	3	0,2

De uma maneira geral, geralmente os concretos produzidos com agregados reciclados ainda apresentam uma certa resistência que os tornam aptos a serem utilizados em aplicações menos nobres. Entretanto, dependendo da metodologia de substituição dos agregados naturais pelos reciclados, da composição dos agregados reciclados, dentre outros fatores, é possível produzir concretos com altas resistências e pleitear o uso dos mesmos em aplicações mais nobres.

#### 4.1.5 Módulo de deformação

O conhecimento do módulo de deformação do concreto é extremamente importante, uma vez que o mesmo é utilizado no cálculo estrutural para prever as flechas máximas admissíveis e assim, conseqüentemente, o grau de fissuração das peças de concreto.

Para os concretos confeccionados com agregados reciclados, vários autores (AKHTARUZZAMAN e HASNAT, 1983; HANSEN e BØEGH, 1985; RAVINDRARAJAH e TAM, 1985, 1987a, 1987b; HANSEN, 1992; BAIRAGI et al., 1993; LEITE, 2001; LEVY, 2001; AJDUKIEWICZ e KLISZCZEWICZ, 2002; GÓMEZ-SOBERÓN, 2002, 2003; DHIR et al., 2004a, 2004b; XIAO et al., 2005; 2006; RAKSHVIR e BARAI, 2006; RAHAL, 2007) apontam que os mesmos geralmente apresentam módulo de deformação menor que o dos concretos convencionais.

Segundo UJIKE (2000), essa redução no módulo de deformação é mais sentida quando se produz concretos com agregados reciclados de baixa relação água/cimento. Essas reduções são particularmente importantes uma vez que se os limites máximos das fissuras forem superados, a armadura ficará susceptível à ação dos agentes agressivos encontrados no meio ambiente ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{CO}_2$ ), reduzindo assim a vida útil do concreto.

Todavia, a forma da curva tensão-deformação para os concretos com agregados reciclados é bastante similar a dos concretos convencionais, independentemente da porcentagem de substituição do agregado natural pelo reciclado, o que leva a crer que as estruturas feitas com esses agregados reciclados podem ser projetadas de acordo com a teoria da plasticidade, da mesma maneira que as estruturas feitas com concretos convencionais (XIAO et al., 2005).

Para os concretos com agregados reciclados de concreto, a redução do módulo de deformação geralmente é atribuída à matriz de cimento que permanece aderida às partículas do agregado natural dos agregados reciclados após a britagem (HANSEN e BØEGH, 1985; HANSEN, 1986). Segundo HANSEN e NARUD (1983), esta matriz de cimento corresponde a algo em torno de 40% do volume do concreto, sendo portanto bastante considerável. KOKUBU et al. (2000) vão mais adiante e dizem que o módulo de deformação desses concretos decresce com o aumento deste teor de argamassa aderida nos agregados reciclados.

Alguns trabalhos como os de FRONDISTOU-YANNAS (1977), citado por KHALAF e DeVEENY (2004a), RAVINDRARAJAH e TAM (1985), HANSEN e BØEGH (1985), RAVINDRARAJAH et al., 2000; BAIRAGI et al. (1993), KATZ (2003), KHATIB (2005) e de XIAO et al. (2005; 2006) apresentam módulos de deformação de concretos feitos com agregados reciclados de concreto de 15 a 45% menores que os módulos dos concretos convencionais. Entretanto, RAHAL (2007)

encontrou uma redução de apenas 3%, ao substituir totalmente o agregado graúdo natural pelo graúdo reciclado de concreto.

Mas parece que não apenas o agregado reciclado de concreto modifica o módulo de deformação, uma vez que AKHTARUZZAMAN e HASNAT (1983) encontraram um módulo de deformação em concretos com agregados graúdos reciclados de cerâmica vermelha em torno de 30% inferiores que os módulos dos concretos de referência. Para KHATIB (2005), substituindo somente os agregados miúdos naturais pelos reciclados miúdos de cerâmica vermelha, a redução média foi de 20%. Segundo SHULZ e HENDRICKS (1992) e RILEM (1994), os concretos com agregados reciclados de cerâmica vermelha apresentam módulos de deformação entre a metade e 2/3 do módulo de concretos convencionais de mesma resistência. Entretanto, SENTHAMARAI e MANOHARAN (2005) encontraram uma redução média de somente 9,3% no módulo de deformação desse tipo de concreto.

Resultados similares foram encontrados para o concreto com o agregado reciclado de argamassa, uma vez que HANSEN e BØEGH (1985), ao substituírem o agregado graúdo natural pelo agregado graúdo reciclado de argamassa, produziram um concreto com um módulo de deformação 45% menor que o do concreto com agregados naturais.

Para HANSEN (1986; 1992), a substituição conjunta dos agregados graúdo e miúdo natural pelos reciclados de concreto diminuem ainda mais o módulo do concreto, do que somente a substituição do agregado graúdo ou do miúdo. Segundo UJIKE (2000), essa redução ocorre basicamente porque ao se substituir os agregados naturais pelos reciclados de concreto, está se inserindo mais argamassa na massa de concreto, sendo que esta propicia maiores deformações, conseqüentemente, menores módulos.

Coerente com isso, dados do *Building Contractor Society of Japan* (1978), citados por LAMOND et al. (2002), apontam que a substituição conjunta dos agregados graúdo e miúdo natural por reciclados de concreto reduzem o módulo de deformação de 25 a 40%, enquanto que somente a substituição do agregado graúdo proporciona uma diminuição de 10 a 33%, quando comparados com o módulo dos concretos com agregados convencionais.

Em concordância com os demais autores, GERARDU e HENDRIKS (1985), citados por HANSEN (1992), e RAVINDRARAJAH e TAM (1987a) obtiveram reduções de 15% quando substituíram os agregados graúdos naturais por reciclados de

concreto. Essa perda aumentou para 40% e 26%, respectivamente, quando ambos agregados foram substituídos.

Parece então que quem rege o comportamento do módulo de deformação dos concretos é o agregado. Assim, como o agregado reciclado é mais deformável que o agregado natural, o concreto produzido com este é mais deformável que o concreto produzido com agregados naturais.

#### 4.1.6 Resistência à tração

Para a resistência à tração, parece que a substituição dos agregados naturais pelos reciclados também provoca uma redução na mesma, embora esta pareça ser menos intensa que as reduções provocadas na resistência à compressão.

Coerente com isso, vários autores (RAVINDRARAJAH et al., 2000; DHIR et al., 2004b; AJDUKIEWICZ e KLISZCZEWICZ, 2002; GÓMEZ-SOBERÓN, 2002, 2003; TOPÇU e SENDEL, 2004; SAGOE-CRENTSIL et al., 2001) obtiveram reduções na resistência à tração em valores que variam de 6% a 15%, para concretos confeccionados com agregados reciclados de concreto.

Entretanto, há trabalhos em que se apresentam valores de perdas na resistência à tração da mesma ordem dos observados para a resistência à compressão, como alguns relatados por HANSEN (1992) e os encontrados por KATZ (2003) e BAIRAGI et al. (1993), que obtiveram perdas médias da ordem de 23% e 41%, respectivamente.

Contudo, ainda há trabalhos que apontam não somente reduções mas também pequenos acréscimos, como o de RAVINDRARAJAH e TAM (1985), para concretos com agregados reciclados de concreto, e os citados por SHULZ e HENDRICKS (1992), para concretos com agregados reciclados de cerâmica vermelha.

Para o concreto com agregado reciclado de concreto, esses pequenos acréscimos são explicados pelos autores como um efeito do aumento do teor de pasta de cimento a uma constante relação água/cimento, uma vez que a resistência da ligação pasta/agregado exerce maior influência na resistência à tração que na resistência à compressão. Portanto, concretos confeccionados com agregados reciclados com elevado teor de pasta terão grandes chances de apresentar uma elevada resistência à tração (RAVINDRARAJAH e TAM, 1985). Já os acréscimos para os concretos com agregados reciclados de cerâmica vermelha podem ser explicados pela efeito pozolânico propiciada pela cerâmica vermelha.

Segundo dados de pesquisas coletadas por HANSEN (1986), a perda da resistência à tração dos concretos com agregados reciclados de concreto é menos sentida quando somente os agregados graúdos são substituídos, sendo mais visível quando se substitui ambos agregados (graúdo e miúdo), geralmente atingindo reduções de até 20%. Coerente com isso, RAVINDRARAJAH e TAM (1987a) observaram perda de 10% somente com a substituição dos agregados graúdos, sendo que essa elevou-se para 15% quando ambos agregados foram substituídos.

Parece que a substituição dos agregados naturais pelos reciclados de cerâmica vermelha também provoca alterações na resistência à tração dos concretos com estes confeccionados, pois BRITO et al. (2005), substituindo o agregado graúdo natural pelo agregado graúdo reciclado de cerâmica vermelha, nos teores de 33%, 66% e 100%, obtiveram uma redução na resistência à flexão da ordem de 8,6%, 15,7% e 25,7%, respectivamente.

Então, diante do exposto, parece que a redução provocada pelos agregados reciclados na resistência à tração não é tão forte quanto a redução na resistência à compressão. Isso pode ser explicado porque a resistência à tração leva em consideração mecanismos de aderência física entre as partículas, e como o uso dos agregados reciclados parece promover uma boa aderência entre a pasta e o agregado, em função da sua forma mais irregular e rugosa, a zona de transição do concreto com agregados reciclados é muito boa (LEITE, 2001). Assim, devido a esse bom desempenho da zona de transição dos concretos com agregados reciclados, a resistência à tração desses concretos não é tão afetada quanto a resistência à compressão.

#### 4.1.7 Resistência à abrasão

Parece que a resistência à abrasão dos concretos confeccionados com agregados reciclados também é menor que a dos concretos confeccionados com agregados naturais. Essa redução é atribuída às reduções nas propriedades físicas e mecânicas do próprio agregado reciclado, uma vez que o mesmo geralmente apresenta valores de resistência à abrasão inferiores aos dos agregados convencionais.

Exemplificando, BRITO et al. (2005), ao produzir concreto substituindo o agregado graúdo natural pelo agregado graúdo reciclado de cerâmica vermelha, nos teores de 33%, 66% e 100%, obtiveram uma redução na resistência à abrasão da ordem de 5,6%, 16,9% e 25,8%, respectivamente, ratificando portanto a afirmação anterior.

Essa diminuição na resistência à abrasão parece que não se restringe somente aos concretos com agregado reciclados de cerâmica vermelha, uma vez que DHIR et al. (2004a) encontraram profundidades de abrasão maiores para concretos com agregados graúdos reciclados de concreto do que para os concretos naturais, sendo que esta profundidade aumentava à medida que se aumentava o percentual substituído, chegando a um aumento de 67% para 100% de substituição.

Para os agregados reciclados de concreto, segundo TAVAKOLI e SOROUSHIAN (1996a), essa elevada abrasão parcialmente reflete a grande quantidade de argamassa aderida ao agregado natural.

Coerente com isso, TOPÇU (1997) encontrou uma redução de 45,5% na dureza superficial dos concretos confeccionados com 100% de agregados graúdos reciclados de concreto quando comparados com às dos concretos de referência.

Quando se substitui a parcela miúda dos agregados naturais do concreto parece que a resistência à abrasão é ainda mais prejudicada, uma vez que HANSEN e NARUD (1983) apresentaram um aumento na abrasão da ordem 22,4%, quando a fração substituída do agregado graúdo natural pelo reciclado de concreto foi de 16 a 32 mm, e de 41,4%, quando a fração substituída foi de 4 a 8 mm.

Entretanto, parece que o baixo desempenho por parte desses concretos pode ser contornado, quando se prepara concretos de altas resistências com os agregados reciclados, visto que LIMBACHIYA et al. (2000) encontraram resistências à abrasão similares para concretos de 50, 60 e 70 MPa, produzidos com 100% de agregados reciclados de concreto. POON et al. (2002) foram além e encontraram uma resistência à abrasão por volta de 12% superiores aos de referência, embora trabalhando com blocos de concretos de 60 MPa de resistência à compressão.

Pode-se concluir que mesmo com esse decréscimo na resistência à abrasão dos concretos com agregados reciclados que em geral é apresentado, estes ainda apresentam satisfatórias resistências para serem usados como concretos convencionais (HANSEN, 1986).

#### 4.1.8 Retração por secagem

A retração por secagem do concreto é um fenômeno inevitável, desde que o concreto esteja exposto a um ambiente de umidade abaixo da condição de saturação. Como este é o tipo de ambiente onde a grande maioria das estruturas de concreto está

inserida, a retração por secagem é uma das principais causas da fissuração, assumindo assim fundamental importância, pois compromete a durabilidade do concreto, principalmente quando este for armado.

Como a retração por secagem é um fenômeno que está intimamente ligado à perda de água da massa de concreto, é notório que quanto mais água essa massa tiver, maior será a possibilidade de se ter grandes retrações.

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), a granulometria, a dimensão máxima, a forma e a textura do agregado são fatores que influenciam na retração por secagem do concreto, entretanto o módulo de deformação do agregado é considerado o fator mais importante.

Assim, quando se usa um alto teor de substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados, é coerente que o concreto produzido com estes últimos possua uma maior retração, uma vez que os agregados reciclados possuem um menor módulo de deformação que os naturais, sendo portanto mais deformáveis, além de, em função da alta absorção de água por parte destes, exigirem um elevado teor de água (POON et al., 2002).

No caso dos agregados reciclados de concreto, em geral estes consistem de 60 a 70% do seu volume em agregados naturais e os 30 a 40% restantes de argamassa, sendo esta última parte bem mais porosa que a primeira (HANSEN e NARUD, 1983; POON et al., 2004). Este elevado teor de argamassa presente no mesmo provoca o surgimento de alguns efeitos indesejáveis nos concretos feitos com os mesmos, tais como uma maior retração por secagem, potencializando assim o aparecimento de fissuras. Segundo TAVAKOLI e SOROUSHIAN (1996b), quanto maior a quantidade de argamassa aderida no agregado reciclado de concreto, maior será a possibilidade de se ter grandes retrações nos concretos com esses produzidos.

Portanto, é comum tentar subtrair essa argamassa dos agregados reciclados de concreto, sendo que o procedimento bastante utilizado para se conseguir isso consiste em colocar os agregados reciclados em betoneiras e deixá-los misturar à seco, para que o atrito entre eles mesmos e com as paredes da betoneira façam a argamassa se desprender (TAVAKOLI e SOROUSHIAN, 1996b). Segundo HASEN (1992), esse processo também melhora a forma dos agregados, contribuindo para uma melhor mistura.

Alguns autores, tais como RAVINDRARAJAH e TAM (1985; 1987b), TAVAKOLI e SOROUSHIAN (1996b), SAGOE-CRENTSIL et al. (2001), POON et

al. (2002), AJDUKIEWICZ e KLISZCZEWICZ (2002), SHAYAN e XU (2003) e DHIR et al. (2004b), obtiveram retrações de 12% a 61% superiores para os concretos produzidos com agregados reciclados de concreto. Entretanto, há trabalhos que apontam aumentos de até 100% (RAVINDRARAJAH e TAM, 1987a; KATZ, 2003).

Já LIMBACHIYA et al. (2000), GÓMEZ-SOBERÓN (2002, 2003) e KHATIB (2005), também testando concretos com agregados reciclados de concreto, não só encontraram que a retração por secagem desses concretos é maior que às dos concretos convencionais mas que esta aumenta proporcionalmente à substituição do agregado natural.

RAVINDRARAJAH e TAM (1985) foram um pouco mais além, uma vez que segundo tais autores a retração por secagem também é dependente da qualidade do concreto que originou os agregados reciclados. Segundo tais autores, quanto maior a resistência do concreto original, maior será a retração do concreto confeccionado com os seus agregados reciclados. Isto provavelmente ocorre devido ao alto teor de argamassa dos concretos de mais alta resistência. Os acréscimos encontrados para as retrações por secagem dos concretos de alta, média e baixa resistência foram 61%, 48% e 27%, respectivamente.

A substituição conjunta dos agregados graúdos e miúdos parece aumentar ainda mais a retração por secagem dos concretos produzidos. Em concordância com o isso, HASABA et al. (1981), citado por HANSEN e BØEGH (1985), encontraram para concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de concreto e areia natural, uma retração por secagem 50% maior que a do concreto de controle correspondente feito com agregados convencionais. Quando ambos os agregados miúdo e graúdo reciclados foram utilizados, a retração por secagem encontrada foi 70% maior que a de controle, acréscimo este bastante próximo ao encontrado por COQUILLAT (1982), citado por HANSEN (1992), que foi de 73%, para o mesmo tipo de substituição.

Tais resultados são coerentes com os de RAVINDRARAJAH e TAM (1987a), uma vez que a substituição de somente dos agregados graúdos naturais pelos reciclados, a retração aumentou em 55% e quando ambos agregados foram substituídos, a retração encontrada foi aproximadamente o dobro da retração dos concretos com agregados naturais.

Com resultados semelhantes, *Building Contractors Society of Japan* (1978), citado por LAMOND et al. (2002), obteve retrações por secagem de 20 a 50% maiores em concretos com agregados graúdos reciclados de concreto e de 70 a 100% maiores

para concretos com agregados graúdos e miúdos reciclados de concreto, quando comparados com as retrações dos concretos com todos os agregados naturais.

Em suas conclusões a respeito do desempenho dos concretos com agregados reciclados de concreto, HANSEN (1992) diz que a retração por secagem de concretos feitos com agregado graúdo reciclado e areia natural é aproximadamente 50% maior que a retração dos concretos com agregados naturais. Quando também se substitui a parte miúda, a retração desses concretos é ainda maior, da ordem de 70%.

Ao se usar o agregado reciclado de argamassa na produção de concretos, este tipo de agregado parece provocar uma maior retração por secagem nos concretos que o agregado reciclado de concreto. A possível explicação para isso é a substituição do agregado natural presente no agregado reciclado de concreto por argamassa. Coerente com isso, HANSEN e BØEGH (1985) produziram concretos com agregados graúdos reciclados de concreto, encontrando retrações por secagem 37 a 60% maiores que a dos concretos com agregados naturais. Ao produzirem um concreto com agregados graúdos reciclados de argamassa, tais pesquisadores encontraram uma retração 195% maior que a do concreto com agregados naturais.

É difícil estimar a retração por secagem dos concretos feitos com agregados reciclados de cerâmica vermelha uma vez que esta depende de um grande número de fatores, entretanto SHULZ e HENDRICKS (1992) estimam que as retrações finais em concretos com estes agregados são de 20 a 60% maiores que dos valores obtidos para os concretos convencionais.

De uma forma geral, é geralmente aceito que concretos confeccionados com agregados graúdos reciclado de concreto têm um desempenho melhor quanto à retração por secagem que concretos confeccionados com agregados graúdos reciclado de cerâmica (KHALAF e DeVEENY, 2004a). Esta maior retração apresentada pelos concretos com agregados reciclados de cerâmica pode ser explicada devido a menor resistência oferecida por esses agregados a deformações propiciadas pela retração da pasta de cimento dos concretos, uma vez que estes agregados possuem um menor módulo de deformação que os agregados reciclados de concreto (SHULZ e HENDRICKS, 1992).

Pode-se, portanto, associar a retração por secagem do concreto produzido com agregado reciclado ao tipo de agregado reciclado, uma vez que quanto mais poroso o agregado reciclado for, menos este restringirá a retração, permitindo assim que o

concreto se retraia mais. Então, concretos produzidos com agregados reciclados que contenham um grande teor de pasta possivelmente sofrerão grandes retrações.

#### 4.1.9 Resistência ao fogo

Quando o concreto é submetido a altas temperaturas, como em incêndios, importantes modificações ocorrem em seus componentes, ocasionando reduções na resistência à compressão e no módulo de deformação do mesmo. Tais modificações são oriundas da perda da água livre e da água de gel, de alterações na estrutura do cimento hidratado, além de fortes expansões dos agregados, dando lugar a tensões internas que podem até desagregar o concreto (CÁNOVAS, 1998).

Pesquisas apontam que concretos confeccionados com agregados reciclados de cerâmica possuem um desempenho superior ao dos concretos confeccionados com agregados naturais, com relação à perda da resistência à compressão, após ambos serem expostos a elevadas temperaturas (KHOURY, 1996 e NEWMAN, 1946, citados por KHALAF e DeVENNY, 2004a; SHULZ e HENDRICKS, 1992).

Isto pode ser explicado porque o agregado de cerâmica é termoestável, em contraste com outros agregados naturais que não são, como o calcário, por exemplo. Isto ocorre em função das características da matéria-prima da cerâmica, que possui uma capacidade de reter calor relativamente alta, não o propagando, não sendo inflamável, e ainda possuindo propriedades refratárias, o que significa que ela mantém sua resistência e integridade a altas temperaturas, em alguns casos aproximando-se dos 1000 °C. Como consequência desse comportamento, os concretos que possuem agregados reciclados de cerâmica protegem mais as armaduras contra o calor, o que significa que este consegue manter a integridade estrutural do concreto contra o fogo por um período muito superior que os concretos com agregados naturais (KHALAF e DeVENNY, 2004a).

Em um estudo laboratorial, KHALAF e DeVEENY (2004b) encontraram que concretos fabricados com agregados reciclados de cerâmica se comportaram de forma bem mais satisfatória quanto à perda de resistência mecânica, quando os mesmos eram submetidos ao fogo, que concretos com agregados de granito. Para se ter uma idéia do desempenho dos mesmos, a aproximadamente 200 °C, os concretos com agregados reciclados de cerâmica haviam perdido de 7 a 9% de sua resistência original, enquanto que os concretos com agregados naturais já haviam perdido notáveis 25%.

Portanto, concretos confeccionados com agregados reciclados que contenham uma certa quantidade de cerâmica possivelmente terão um desempenho melhor que os concretos convencionais, quando submetidos a altas temperaturas.

#### 4.1.10 Profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos

Diversos pesquisadores, conforme relatado a seguir, afirmam que a substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados acarreta em um aumento da profundidade de carbonatação e em uma diminuição da resistência à penetração de cloretos, por parte dos concretos produzidos com esses agregados.

Coerente com isso, dados do *Building Contractor Society of Japan* (1978), citados por LAMOND et al. (2002), apontam que a taxa de carbonatação de concretos feitos com agregados reciclados de concreto que já sofreram carbonatação é 65% maior que a dos concretos de referência e que a armadura pode corroer mais rápido que nos concretos convencionais. Ensaio realizado por KATZ (2003) apontam que a profundidade de carbonatação em concretos com agregados reciclados de concreto é de 1,3 a 2,5 vezes superior a dos concretos de referência.

Já RYU (2002) e TU et al. (2006), pesquisando a profundidade de penetração de íons cloreto em concretos produzidos com agregados reciclados de concreto, acharam que a profundidade de penetração desses íons nesses concretos foi maior que a encontrada em concretos com agregados naturais, especialmente para as grandes relações água/cimento.

Em experimentos similares ao dos autores anteriores, mas também medindo a profundidade de carbonatação, MASCE et al. (2003) e OTSUKI e MIYAZATO (2000) também acharam uma maior profundidade de penetração de cloretos e uma maior profundidade de carbonatação em concretos feitos com os agregados reciclados de concreto. Segundo os últimos autores, isso ocorre devido à antiga zona de transição e à argamassa aderida nos agregados reciclados que tornam esses concretos mais permeáveis que os concretos convencionais. Entretanto, não foi relatado pelos autores qual a relação água/cimento utilizada embora estes tenham mencionado que à medida que se melhora a qualidade da nova zona de transição, a profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos decrescem.

Os resultados dos experimentos de carbonatação e penetração de cloretos em concretos com agregados reciclados de concreto realizados por SHAYAN e XU (2003)

também estão de acordo com os resultados dos outros pesquisadores, sendo que parece que os agregados miúdos reciclados interferem mais incisivamente sobre as propriedades estudadas que os agregados graúdos reciclados.

OLORUNSOGO e PADAYACHEE (2002) analisaram alguns índices de desempenho de durabilidade (condutividade de cloretos, permeabilidade ao oxigênio e absorção de água) de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de RCD, encontrando para todos, desempenhos inferiores ao concreto de referência. Especificamente para a condutividade de cloretos, o índice apresentado para os concretos com agregados reciclados aumentou em 73,2%, aos 28 dias, quando comparado ao índice de referência.

Segundo os mesmos autores, essa redução no desempenho quanto à durabilidade apresentado pelos concretos reciclados ocorre por conta das fissuras criadas nos agregados durante o processo de reciclagem, as quais tornam-se um fácil caminho para a passagem de fluidos e agentes agressivos, além da presença de uma estrutura por si mais porosa. Contudo, sabe-se que se o concreto confeccionado com os agregados reciclados tiver uma boa argamassa, esta impedirá a passagem dos agentes deletérios, impedindo-os de alcançarem os agregados.

Entretanto, se compararmos concretos dentro de uma mesma faixa de resistência, parece que os concretos com agregados reciclados são mais resistentes à penetração dos cloretos e do CO<sub>2</sub>. Esse comportamento pode ser explicado em função da redução da relação água/cimento por parte dos concretos com agregados reciclados para poderem atingir a mesma resistência dos concretos com agregados naturais. Essa redução provoca uma melhoria substancial na matriz de cimento, tornando-a menos permeável, dificultando assim a penetração desses agentes agressivos (DHIR et al., 2004a).

Segundo LEVY (2001), *“a presença de água nos poros superficiais dos agregados reciclados, assim como a concentração de grãos de cimento nesta superfície, permitem a penetração de mais pasta pelos poros dos mesmos. Também a concentração de cimento em volta do agregado reciclado contribuirá para que a argamassa ao seu redor seja mais rica, portanto menos porosa. Tal fato levará à formação de uma camada de blindagem em volta do agregado, camada esta que reduz a permeabilidade, dificultando o avanço da frente de carbonatação”*.

Coerente com isso, DHIR et al. (2004a) encontraram menores profundidades de carbonatação à medida que se aumentava o teor de substituição dos agregados naturais

pelos reciclados, para os concretos de mesma resistência dos concretos de referência, mas confeccionados com agregados reciclados graúdos de concreto. LEVY (2001) obteve reduções nas profundidades de carbonatação dos concretos confeccionados com agregados reciclados de concreto e cerâmica vermelha, tanto graúdo quanto miúdo. Quanto à penetração de cloretos, os resultados deste último autor não indicaram uma tendência, uma vez que há acréscimos e reduções nos teores encontrados quando comparados com os de referência.

Já VIEIRA (2003), pesquisando a taxa de corrosão e o potencial de corrosão de concretos com agregados reciclados, encontrou que a substituição do agregado miúdo natural pelo miúdo reciclado não prejudica e em alguns casos até melhora o desempenho do concreto. Ao substituir o agregado graúdo natural pelo reciclado, obteve-se um aumento do potencial e da taxa de corrosão, ou seja, houve um aumento no risco de corrosão das armaduras. A ação combinada dos dois agregados reciclados, no entanto, resultou num decréscimo no desempenho do concreto, em função de dificuldades de moldagem e de se conseguir uma mistura compacta e homogênea, resultando em concretos bastante porosos.

LIMBACHIYA et al. (2000) não encontraram diferenças significativas entre os coeficientes de difusão de cloretos dos concretos com agregados naturais e dos produzidos com 100% de agregados graúdos reciclados de concreto.

LEVY (2001) conclui que a carbonatação e a penetração de cloretos dos concretos com agregados reciclados estão muito mais ligados à relação água/cimento e ao consumo de cimento do que ao tipo de agregado reciclado utilizado. Em concordância com isso, OTSUKI e MIYAZATO (2000) afirmam que estas duas propriedades estão mais relacionadas à qualidade da zona de transição do concreto, independentemente se o agregado utilizado é reciclado ou não.

Então, comparando concretos convencionais com concretos com agregados reciclados, de baixa resistência mas de mesma relação água/cimento, espera-se que os concretos com agregados reciclados tenham um pior desempenho, uma vez que tanto a matriz quanto o agregado reciclado serão porosos, permitindo a penetração dos agentes agressivos, enquanto que o agregado natural, por ser menos permeável que os reciclados, dificulta a penetração desses agentes agressivos. Entretanto, ao comparar concretos convencionais com concretos com agregados reciclados, de alta resistência mas de mesma relação água/cimento, espera-se o comportamento de ambos sejam

semelhantes, uma vez que a matriz será tão pouco permeável que não permitirá a penetração dos agentes agressivos.

#### 4.1.11 Outras propriedades

Alguns estudos apontam que o desempenho dos concretos confeccionados com agregados reciclados, com relação a outras propriedades tais como velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas, resistência a impactos, resistência à abrasão, permeabilidade ao ar e ao oxigênio, velocidade de propagação de pulsos elétricos, grau de fissuração, resistividade, resistência à flexão, resistência de aderência entre barras de aço e o concreto, dentre outras, também é comprometido quando comparado com o dos concretos convencionas (RAVINDRARAJAH e TAM, 1987b; TOPÇU, 1997; SAGOE-CRENTSIL et al., 2001; ZAKARIA e CABRERA, 1996; HANSEN, 1992; SHULZ e HENDRICKS, 1992; LEVY, 2001; NAGATAKI et al., 2000; KHATIB, 2005; KHALAF, 2006; RAKSHVIR e BARAI, 2006; TU et al., 2006; XIAO e FALKNER, 2007).

Especificamente, quanto à resistência ao gelo e degelo, resultados de pesquisas norte americanas, francesas e holandesas são encorajadoras, enquanto que as japonesas são menos conclusivas (HANSEN, 1992).

XIAO et al. (2006) estudaram o desempenho de estruturas de concreto armado feitas com agregados reciclados com relação ao desempenho a abalos sísmicos, concluindo que apesar do desempenho das estruturas ter diminuído quando se aumentou o teor de agregados reciclados no concreto, as mesmas se comportaram bem o suficiente para suportar um terremoto.

Para DHIR et al. (2004a), teores de substituição de até 30% do agregado graúdo natural pelo reciclado, para concretos de todas as classes, têm apenas uma modesta influência no desempenho dos mesmos em termos de propriedades do estado fresco, de desempenho estrutural e de durabilidade.

Desempenho semelhante aos concretos com agregados naturais pode ser alcançado para altos teores de substituição desses últimos pelos agregados reciclados, para resistências equivalentes aos 28 dias, entretanto exige-se o uso de certos mecanismos de dosagem para que isso ocorra, tais como uma redução na relação água/cimento e o uso de aditivos e adições.

Exemplificando o uso de tais mecanismos, KATZ (2004) impregnou seus agregados reciclados de concreto com sílica ativa, obtendo um incremento de 13 a 16% na resistência à compressão aos 28 dias, quando comparados com os concretos com agregados reciclados sem a impregnação. Em um trabalho anterior, embora utilizando escória de alto forno, o mesmo autor já tinha conseguido atingir as mesmas resistências dos concretos de referência aos 28 dias, superando-as aos 91 e 365 dias (KATZ, 2003).

Segundo tal autor, o desempenho superior desses concretos ocorreu porque as partículas das pozolanas utilizadas introduziram-se nas microfissuras e nas camadas fracas dos agregados, preenchendo os poros (efeito filler), aumentando assim suas propriedades mecânicas, e durante o processo de endurecimento do concreto reciclado ocorreu o efeito pozolânico, ou seja, essas partículas reagiram com o hidróxido de cálcio disponível na pasta formando silicato de cálcio hidratado, que é um produto mais resistente, melhorando assim a zona de transição ente a pasta e o agregado.

O uso dessas adições, no entanto, parece não influenciar demasiadamente a retração por secagem dos concretos com agregados reciclados, permanecendo os mesmos com altos índices. Uma solução encontrada para que tais concretos se desempenhassem melhor nessa área foi através da adição de fibras de polipropileno à mistura (DHIR et al., 2004b).

#### **4.2 Modelagem de propriedades do concreto com agregados reciclados**

A determinação de modelos matemáticos que predigam o comportamento do concreto, com relação a algumas de suas características, é uma tarefa usualmente bastante praticada. Entretanto, ao se inserir novos materiais, estes modificam o comportamento de algumas dessas propriedades, como é o caso dos agregados reciclados. Surge então a necessidade do desenvolvimento de novos modelos que descrevam com qualidade o comportamento dessas propriedades.

Por ser uma propriedade que consegue caracterizar bem o concreto, a resistência à compressão é a propriedade mais comumente modelada, sendo esta, portanto, a mais encontrada nas publicações. Entretanto, há modelos que descrevem outras propriedades, tais como o módulo de deformação, a resistência à tração, o potencial de corrosão, a taxa de corrosão, dentre outras (LEITE, 2001; VIEIRA, 2003; LOVATO, 2007).

Segundo a bibliografia pesquisada, os modelos encontrados que descrevem o comportamento do concreto com agregados reciclados, o fazem considerando uma

composição pré-determinada do RCD, como é o caso dos modelos descritos na Tabela 4.2. A utilização de tais modelos fica condicionada à que a composição do agregado reciclado a ser utilizado seja semelhante à composição do RCD que gerou o modelo. Para esta pesquisa, buscou-se solucionar este empecilho, determinando-se modelos que considerem as variabilidades da composição do RCD.

Tabela 4.2 Modelos que descrevem o comportamento da resistência à compressão e do módulo de deformação do concreto com agregados reciclados.

Autor	Modelo para a resistência à compressão	Modelo para o módulo de deformação
LEITE (2001) <sup>(a)</sup>	$f_c = 7,104 + \frac{15,594}{a/c} + 4,531 \cdot AGR + 1,178 \cdot AMR + 4,453 \cdot Idade - \frac{5,149 \cdot AGR}{a/c} + \frac{0,923 \cdot Idade}{a/c} + 0,502 \cdot AMR \cdot Idade + \frac{0,970 \cdot AGR \cdot Idade}{a/c} \quad (R^2 = 0,92)$	$E_c = 9,024 + \frac{6,212}{a/c} - 4,582 \cdot AGR + -3,037 \cdot AGR \cdot AMR \quad (R^2 = 0,56)$
VIEIRA (2003) <sup>(b)</sup>	$f_c = 23,13 + \frac{12,76}{a/c} + 14,43 \cdot AMR + \frac{3,45 \cdot AMR}{a/c} - 12,71 \cdot AMR \cdot AGR + \frac{7,51 \cdot a/c}{AMR \cdot AGR} \quad (R^2 = 0,99)$	-
LOVATO (2007) <sup>(c)</sup>	$f_c = C \cdot 22,5 \cdot \left(\frac{0,5}{a/c}\right)^{0,67} \cdot \left(1 - \frac{AGR}{7,44}\right) \cdot \left(1 - \frac{AMR}{9,69}\right) \cdot \left(1 - \frac{m}{8,61}\right) \cdot [1 - (-0,04 \cdot AGR \cdot m)] \cdot [1 - (0,008 \cdot AMR \cdot m)] \quad (R^2 = 0,91)$	$E_c = C \cdot 13,49 \cdot \left(\frac{0,5}{a/c}\right)^{0,48} \cdot \left(1 - \frac{AGR}{5,76}\right) \cdot \left(1 - \frac{AMR}{5,49}\right) \cdot \left(1 - \frac{m}{8,67}\right) \cdot [1 - (-0,04 \times AGR \times m)] \quad (R^2 = 0,89)$
<p>(a) Agregado miúdo: 28% argamassa, 15% concreto, 26% cer. vermelha, 30% pedras, 1% outros; Agregado graúdo: mesmo que miúdo.  (b) Agregado miúdo: 28% argamassa, 19% concreto, 48% cer. vermelha, 3% pedras, 2% outros; Agregado graúdo: mesmo que miúdo.  (c) Agregado miúdo: 57% cerâmica e argamassa, 43% concreto e rochas; Agregado graúdo: 72% cerâmica e argamassa, 28% concreto e rochas.</p>		

### 4.3 Considerações finais

De acordo com as características apresentadas neste capítulo, fica claro que pode-se produzir, com sucesso, concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. Entretanto, sabe-se que esses concretos possivelmente não

apresentarão um desempenho tão bom quanto os concretos produzidos com agregados naturais, em termos de resistência mecânica e de durabilidade, caso algumas precauções não sejam tomadas.

Conforme demonstrado por LEVY (2001), há exemplos da utilização dos agregados reciclados como agregados para concretos em diversas obras de vários países da Comunidade Européia, demonstrando assim que os concretos com agregados reciclados podem ser usados satisfatoriamente em quase todas as aplicações dos concretos convencionais.

Isso ocorre porque quando os concretos com agregados reciclados são dosados da mesma maneira que os concretos convencionais, estes ainda apresentam uma certa resistência mecânica, podendo esta ser satisfatória para algumas aplicações, com o benefício adicional de que geralmente a massa específica dos mesmos é bem mais baixa, tornando-os ideais para situações onde o peso próprio é um problema e uma boa resistência ao fogo é requisitada.

Quando comparados em uma faixa de resistência com os agregados convencionais, os concretos com agregados reciclados geralmente necessitam de uma menor relação água/cimento para se atingir resistências semelhantes às dos concretos convencionais. Isso propicia uma melhor durabilidade ao concretos com agregados reciclados, em função de uma melhor pasta produzida.

Modelos que predizem algumas propriedades dos concretos produzidos com agregados reciclados já foram elaborados, sendo os modelos para a resistência à compressão e o módulo de deformação os mais comuns. Entretanto, tais modelos podem ser empregados somente quando a composição do agregado reciclado de RCD que se quer utilizar for similar à composição do RCD que foi usado para se determinar o modelo, ou seja, tais modelos não contemplam as variabilidades do RCD. Para esta pesquisa, essas variabilidades foram contempladas.



## **CAPÍTULO 5 – PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS**

### 5.1 Projeto de Experimentos

### 5.2 Caracterização dos materiais

#### 5.2.1 Cimento

#### 5.2.2 Agregados

##### 5.2.2.1 Difração de Raio X - DRX

##### 5.2.2.2 Granulometria

##### 5.2.2.3 Absorção de água

##### 5.2.2.4 Massa específica

##### 5.2.2.5 Massa unitária

#### 5.2.3 Água

#### 5.2.4 Aditivo

### 5.3 Confeção dos concretos

### 5.4 Ensaio realizados no concreto endurecido

#### 5.4.1 Resistência à compressão

#### 5.4.2 Módulo de deformação

#### 5.4.3 Retração por secagem

## **5 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS**

Neste capítulo estão descritos todos os procedimentos experimentais realizados, desde a sua concepção, através do uso de um projeto de experimentos, passando pela caracterização dos materiais utilizados até a produção dos concretos e realização dos ensaios nos mesmos.

Esta parte da pesquisa foi realizada no NORIE (Núcleo Orientado para Inovação da Edificação), utilizando as instalações e equipamentos do LEME (Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais) da UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul).

### **5.1 Projeto de Experimentos**

Segundo MONTGOMERY (2001), os passos a serem seguidos no planejamento e execução de um projeto de experimentos são: reconhecimento e aceitação do problema a ser estudado; escolha dos fatores a serem variados no experimento e dos níveis de variação desses fatores; escolha das variáveis de resposta; escolha do projeto de experimentos mais adequado; execução do mesmo com a coleta dos dados; análise estatística dos dados coletados e apresentação das conclusões e recomendações.

Seguindo as recomendações acima, através da ampla revisão bibliográfica realizada, detectou-se o problema de pesquisa, o qual seria a grande variabilidade dos resíduos de construção e demolição gerados nas cidades brasileiras, com uma má disposição final no meio-ambiente. Entretanto, três constituintes representam mais de 70% de todo o resíduo de construção e demolição, em todas as cidades de onde se dispunham os dados da caracterização desses resíduos, os quais são concreto, argamassa e cerâmica vermelha (PINTO, 1986; ZORDAN, 1997; BRITO FILHO, 1999; QUADROS e OLIVEIRA, 2001; NÓBREGA, 2002; VIEIRA, 2003; LOVATO, 2007).

Alinhado com os objetivos do trabalho, resolveu-se então pesquisar qual a influência, em algumas propriedades do concreto, da substituição dos agregados

naturais pelos agregados reciclados desses três maiores constituintes. Também se desejava saber a influência da variação da relação água/cimento (a/c) nessas mesmas propriedades, com a presença ou não desses agregados reciclados. Portanto, dessa maneira, foram identificadas sete variáveis independentes (fatores), as quais são: o agregado miúdo reciclado de cerâmica vermelha (AMCV), o agregado graúdo reciclado de cerâmica vermelha (AGCV), o agregado miúdo reciclado de argamassa (AMA), o agregado graúdo reciclado de argamassa (AGA), o agregado miúdo reciclado de concreto (AMC), o agregado graúdo reciclado de concreto (AGC) e a relação água/cimento (a/c).

O projeto de experimentos completo para se estudar o efeito conjunto de todos esses 7 fatores sobre as variáveis de resposta é o *projeto de experimentos fatorial  $2^k$*  (RIBEIRO e CATEN, 2003). A execução desse projeto consiste em realizar  $2^7$  traços de concreto, ou seja, 128 traços. Entretanto, para se realizar esse projeto experimental, com a quantidade de traços que foi acima exposto, seriam necessários moldar 768 corpos-de-prova, o que demandaria um grande esforço para realizá-lo, em função das limitações de tempo e custo. A solução encontrada para viabilizar a execução da parte experimental, com elevado grau de confiabilidade dos resultados, foi o uso do *projeto composto de segunda ordem*.

O projeto composto de segunda ordem tem como base um projeto fatorial  $2^k$ , fracionado ou completo, onde soma-se a este último, todos os  $2k$  vértices de uma estrela e os pontos centrais da estrela e do projeto fatorial (RIBEIRO e CATEN, 2003). Para o experimento em questão, adotou-se um projeto fatorial fracionado e os pontos centrais.

Segundo WERKEMA e AGUIAR (1996), o uso dos experimentos fatoriais fracionados é útil quando há um grande número de fatores a serem investigados sobre uma ou mais variáveis de resposta e se deseja uma otimização de tempo e custos para a obtenção dos resultados, uma vez que o fracionamento consiste em dividir o projeto completo em dois ou mais blocos e ensaiar somente um desses blocos, escolhido aleatoriamente. Este tipo de estudo, utilizando ferramentas estatísticas, já foi previamente executado por outras diversas pesquisas nacionais e internacionais (TAVAKOLI e SOROUSIAN, 1996a, 1996b; VIEIRA, 2003; LEITE, 2001, LIU et al., 2004) com bons resultados.

Exemplificando, entretanto para um projeto de somente 3 fatores (relação água/cimento, teor de agregado miúdo reciclado de concreto e teor de agregado graúdo reciclado de argamassa, por exemplo), pode-se observar, conforme a Figura 5.1, os

pontos referentes ao projeto fatorial fracionado, os vértices da estrela e os pontos centrais. Para o experimento realizado nesta pesquisa, basta extrapolar o exemplo para os 7 fatores adotados.

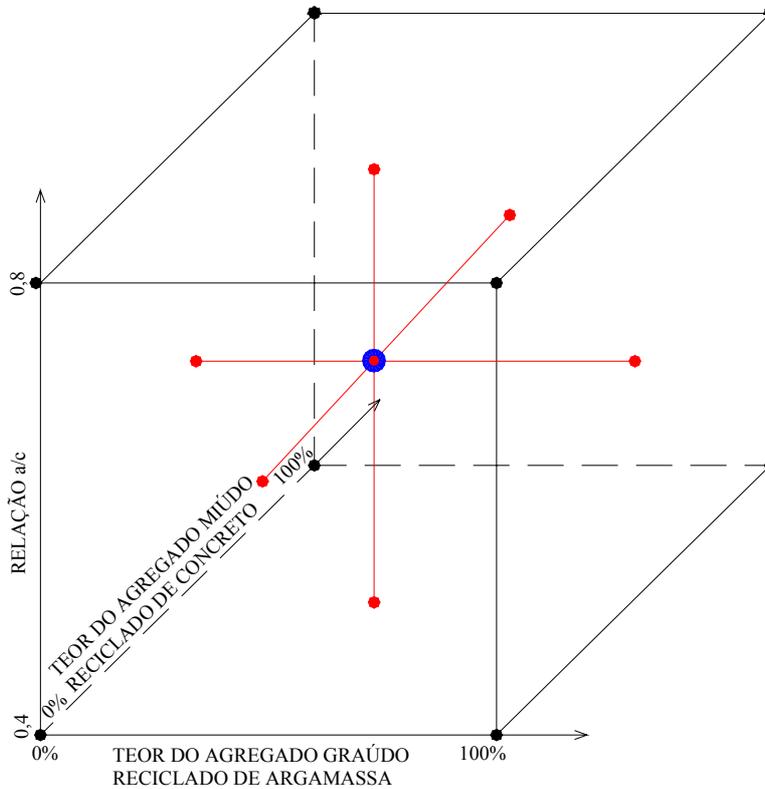


Figura 5.1 Projeto composto contendo projeto fatorial fracionado, os vértices da estrela e os pontos centrais

A partir do projeto completo anteriormente exposto, este foi dividido em 4 blocos, sendo ensaiado somente um bloco com 32 traços, que consistem os traços 1 ao 32 da Tabela 5.1. Como o experimento em questão possui 7 fatores, a estrela possui 14 vértices, que correspondem aos traços 33 ao 46. Os traços 47 e 48 correspondem aos pontos centrais do projeto fatorial fracionado e da estrela de sete pontas, que são iguais. Os traços 49 e 50 foram inseridos no projeto de experimentos, uma vez que representam os momentos onde todos os agregados (reciclados e naturais) estão presentes no concreto, atribuindo como valores para a relação água/cimento, as médias dos terços inferior e superior, ou seja, 0,46 e 0,74.

A Tabela 5.1 concatena todos os traços de concreto definidos no planejamento de experimentos. Os significados das simbologias dos agregados graúdos e miúdos utilizadas na tabela já foram descritos anteriormente.

Tabela 5.1 Traços de concreto definidos realizando o fracionamento do experimento

Traço nº	a/c	Agregado Graúdo				Agregado Miúdo			
		% AGN	% AGC	% AGCV	% AGA	% AMN	% AMC	% AMCV	% AMA
01	0,46	100	0	0	0	100	0	0	0
02	0,74	100	0	0	0	0	0	100	0
03	0,74	100	0	0	0	0	100	0	0
04	0,46	100	0	0	0	0	50	50	0
05	0,74	0	0	0	100	0	0	0	100
06	0,46	0	0	0	100	0	0	50	50
07	0,46	0	0	0	100	0	50	0	50
08	0,74	0	0	0	100	0	33	33	33
09	0,46	0	0	100	0	0	0	0	100
10	0,74	0	0	100	0	0	0	50	50
11	0,74	0	0	100	0	0	50	0	50
12	0,46	0	0	100	0	0	33	33	33
13	0,74	0	0	50	50	100	0	0	0
14	0,46	0	0	50	50	0	0	100	0
15	0,46	0	0	50	50	0	100	0	0
16	0,74	0	0	50	50	0	50	50	0
17	0,46	0	100	0	0	0	0	0	100
18	0,74	0	100	0	0	0	0	50	50
19	0,74	0	100	0	0	0	50	0	50
20	0,46	0	100	0	0	0	33	33	33
21	0,74	0	50	0	50	100	0	0	0
22	0,46	0	50	0	50	0	0	100	0
23	0,46	0	50	0	50	0	100	0	0
24	0,74	0	50	0	50	0	50	50	0
25	0,46	0	50	50	0	100	0	0	0
26	0,74	0	50	50	0	0	0	100	0
27	0,74	0	50	50	0	0	100	0	0
28	0,46	0	50	50	0	0	50	50	0
29	0,74	0	33	33	33	0	0	0	100
30	0,46	0	33	33	33	0	0	50	50
31	0,46	0	33	33	33	0	50	0	50
32	0,74	0	33	33	33	0	33	33	33
33	0,60	0	50	25	25	0	33	33	33
34	0,60	0	0	50	50	0	33	33	33
35	0,60	0	25	50	25	0	33	33	33
36	0,60	0	50	0	50	0	33	33	33
37	0,60	0	25	25	50	0	33	33	33
38	0,60	0	50	50	0	0	33	33	33
39	0,60	0	33	33	33	0	50	25	25
40	0,60	0	33	33	33	0	0	50	50
41	0,60	0	33	33	33	0	25	50	25
42	0,60	0	33	33	33	0	50	0	50
43	0,60	0	33	33	33	0	25	25	50
44	0,60	0	33	33	33	0	50	50	0
45	0,80	0	33	33	33	0	33	33	33

Tabela 5.1 Traços de concreto definidos realizando o fracionamento do experimento – continuação

Traço n°	a/c	Agregado Graúdo				Agregado Miúdo			
		% AGN	% AGC	% AGCV	% AGA	% AMN	% AMC	% AMCV	% AMA
46	0,40	0	33	33	33	0	33	33	33
47	0,60	0	33	33	33	0	33	33	33
48	0,60	0	33	33	33	0	33	33	33
49	0,46	25	25	25	25	25	25	25	25
50	0,74	25	25	25	25	25	25	25	25

Como variáveis de resposta, ou seja, variáveis dependentes, têm-se a **resistência à compressão axial** dos concretos produzidos, medida de acordo com os procedimentos descritos na *NM 101/96 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*; o **módulo de deformação** dos concretos, determinados de acordo com a *NBR 8522/03 – Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação*; e a **retração por secagem** dos mesmos, mensurada segundo os procedimentos descritos pela norma *ASTM C 157-93 – Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete*.

Outras variáveis foram fixadas, tais como a idade de execução dos ensaios (28 dias para a resistência à compressão e para o módulo de deformação e as idades determinadas pela norma *ASTM C 157-93*, para a retração por secagem) e a pré-umidificação dos agregados reciclados, para que os mesmos não absorvessem a água de amassamento e não modificassem assim a relação água/cimento (a/c). O método utilizado para se determinar a quantidade da água de pré-umidificação está descrito no item 5.3.

## 5.2 Caracterização dos materiais

Previamente à produção de todos os traços de concreto determinados pelo projeto experimental, com a moldagem, cura e ensaio dos corpos-de-prova produzidos, caracterizaram-se todos os materiais utilizados. A Tabela 5.2 compila todos os ensaios que foram realizados na parte experimental e os métodos de ensaio utilizados na realização dos mesmos.

Tabela 5.2 Ensaio realizados no procedimento experimental e seus respectivos métodos de ensaio

Material	Ensaio	Método de ensaio
Agregados naturais e reciclados	Quarteamento das amostras	NBR 9941/87
	DRX <sup>6</sup>	Procedimentos do Laboratório de Cristalografia do IFSC/USP
	Granulometria	NM 248/01
	Absorção de água dos agregados miúdos	NM 30/00
	Absorção de água e massa específica dos agregados graúdos	NM 53/02
	Massa específica dos agregados miúdos	NBR 9776/87
	Massa unitária dos agregados	NM 45/02
Concreto	Moldagem e cura dos corpos-de-prova cilíndricos	NBR 5738/03
	Moldagem e cura dos corpos-de-prova prismáticos	ASTM C 157/93
	Resistência à compressão	NM 101/96
	Módulo de deformação	NBR 8522/03
	Retração por secagem	ASTM C 490/96

### 5.2.1 Cimento

Utilizou-se o cimento Portland tipo CP V-ARI (alta resistência inicial) por ser o cimento mais puro comercialmente disponível na região de Porto Alegre/RS, pois desejava-se excluir quaisquer possíveis interferências das adições atualmente feitas nos cimentos comercializados no mercado brasileiro no desempenho dos concretos produzidos com os mesmos.

As Tabelas 5.3 e 5.4 apresentam algumas características químicas e características físicas e mecânicas, respectivamente, do cimento utilizado. Os dados foram fornecidos pelo fabricante.

Tabela 5.3 Características químicas do cimento (fornecido pelo fabricante)

Composição química do clínquer	Teores (%)
Óxido de magnésio (MgO)	4,85
Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )	3,10
Óxido de cálcio livre (CaO livre)	1,31
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4,40
Óxido de silício (SiO <sub>2</sub> )	18,55
Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2,66

<sup>6</sup> Somente para os agregados reciclados.

Tabela 5.3 Características químicas do cimento (fornecido pelo fabricante) –  
continuação

Óxido de cálcio (CaO)	60,11
Equivalente alcalino	0,59
Resíduo insolúvel	0,76
Perda ao fogo	3,46

Tabela 5.4 Características físicas e mecânicas do cimento (fornecido pelo fabricante)

Ensaio		Resultado
Área específica (Blaine)		4916 cm <sup>2</sup> /g
Tempo de pega	Início	185 min
	Fim	245 min
Resistência à compressão	1 dia	30,8 MPa
	3 dias	39,5 MPa
	7 dias	44,9 MPa
	28 dias	51,5 MPa

### 5.2.2 Agregados

Na confecção dos concretos foram utilizados agregados naturais (areia lavada de rio e brita basáltica) e agregados reciclados, provenientes da britagem de resíduos de construção e demolição.

Para se gerar os agregados reciclados, foram coletados separadamente resíduos de concreto, de argamassa e de cerâmica vermelha (tijolo) nos aterros de inertes da cidade de Porto Alegre/RS, em quantidade que juntos somaram aproximadamente duas toneladas. Também se utilizaram corpos-de-prova de concreto com idade superior a 2 anos, confeccionados no LEME, e de restos de tijolos cerâmicos coletados em olarias.

Esses materiais foram britados separadamente em um britador de mandíbulas (Figura 5.2-a) e posteriormente moídos, também separadamente, em um moinho de rolos (Figura 5.2-b). O material resultante foi peneirado na peneira de malha 19mm, onde a fração retida foi descartada e a passante foi repeneirada na peneira de malha 4,8mm (Figura 5.3), separando-se assim os agregados miúdos dos graúdos.

Através da Figura 5.4 pode-se observar o aspecto dos agregados reciclados após a britagem e peneiramento, bem como dos agregados naturais.

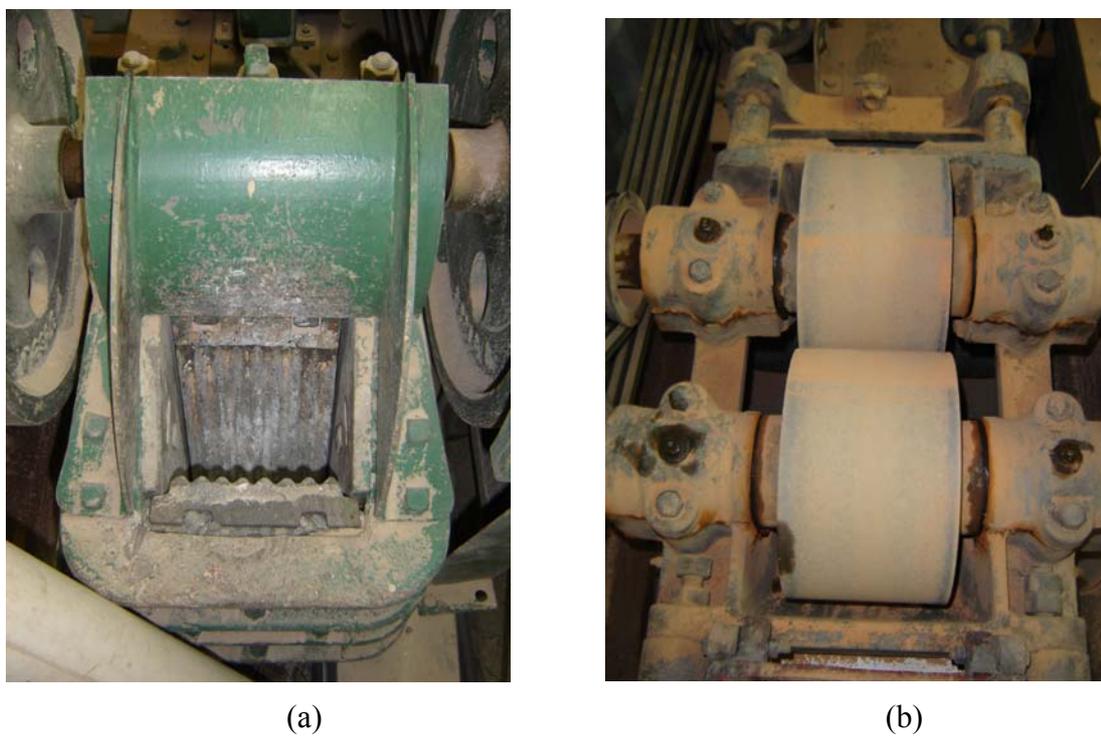


Figura 5.2 Britador de mandíbulas (a) e moinho de rolos (b) utilizados



Figura 5.3 Peneirador utilizado para separar o agregado miúdo do gráudo



a) areia e brita naturais



b) areia e brita recicladas de argamassa



c) areia e brita recicladas de concreto



d) areia e brita recicladas de cerâmica vermelha

Figura 5.4 Aspectos dos agregados reciclados e naturais

Utilizando-se o processo de quarteamento, segundo a *NBR 9.941/87 – Redução de amostra de campo de agregados para ensaios de laboratório*, foram separadas amostras do material reciclado para se fazer os ensaios de caracterização, juntamente com os agregados naturais. Os ensaios realizados foram a difração de raios X (DRX), sendo realizada somente para os agregados reciclados, enquanto que a composição granulométrica, a absorção de água, a determinação da massa unitária e da massa específica foram realizados para todos os agregados. Os resultados desses ensaios encontram-se a seguir.

#### 5.2.2.1 Difração de Raio X - DRX

A análise por Difração de Raio X (DRX) tem caráter qualitativo, pois está baseado na identificação das substâncias presentes em cada amostra dos agregados. Esta análise foi realizada com o propósito de indicar quais são os mais prováveis compostos que constituem cada tipo de agregado reciclado, de forma a melhor caracterizá-los, uma vez que os picos que aparecem nos difratogramas são característicos para cada tipo de composto, sendo possível identificá-los.

Para se realizar esse ensaio, após triturados, moeu-se manualmente uma amostra de cada tipo de agregado reciclado até que a grande maioria de suas partículas fossem passantes na peneira de nº200 (0,074mm). Após peneirado, o material foi ensaiado no Laboratório de Cristalografia do Instituto de Física de São Carlos da Universidade de São Paulo (IFSC/USP). As Figuras 5.5 a 5.7 trazem os difratogramas dos agregados reciclados de concreto, argamassa e cerâmica vermelha, respectivamente, com a identificação dos seus principais compostos.

De acordo com os difratogramas, nota-se que as composições dos agregados graúdos e miúdos reciclados são bastante similares, uma vez que ambos provêm da mesma matéria-prima. Entretanto, as pequenas variações encontradas em suas composições possivelmente são oriundas do processo de britagem e moagem aplicado durante a fabricação dos mesmos. No caso dos agregados reciclados de concreto e argamassa, sabe-se que os agregados miúdos geralmente contêm uma parcela maior de pasta que os agregados graúdos (TOPÇU e SENDEL, 2004; KATZ, 2003; NAGATAKI et al., 2000).

Os difratogramas dos agregados reciclados de concreto e argamassa mostram que estes agregados são compostos por quartzo e compostos resultantes da hidratação

do cimento, tais como calcita, portlandita e silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Observa-se que, para esses dois tipos de agregados, os maiores picos encontram-se entre 26° e 32° 2θ, sendo exatamente este o intervalo onde o gel de C-S-H é representado (SILVA, 2000; MELO, 2000).

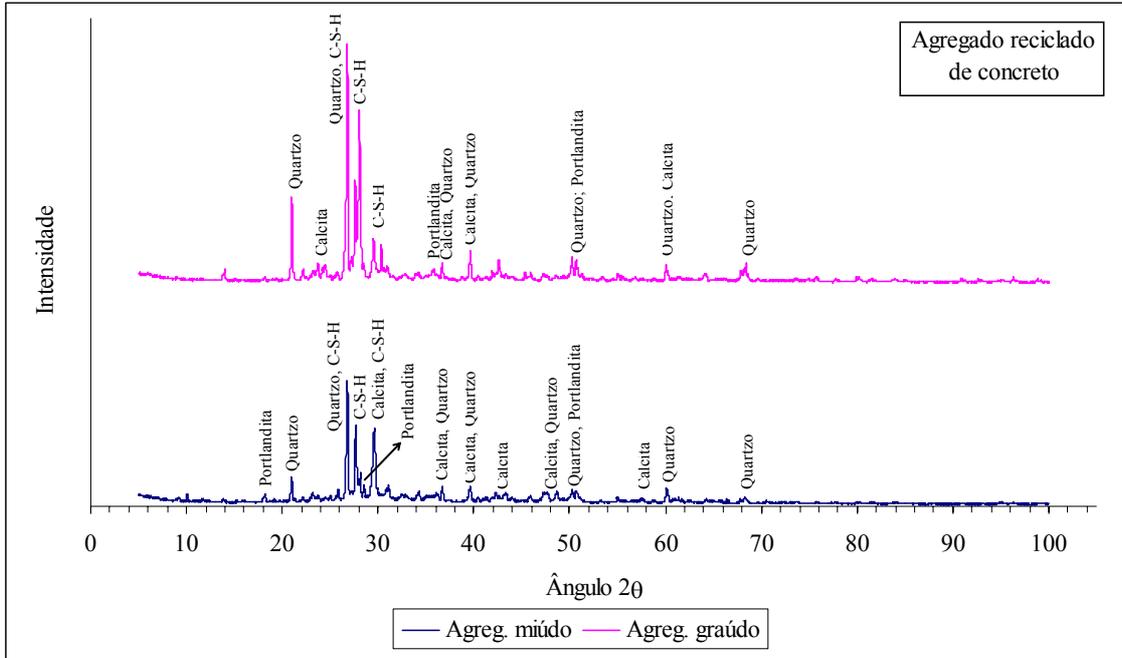


Figura 5.5 Difratograma dos agregados miúdo e graúdo reciclados de concreto

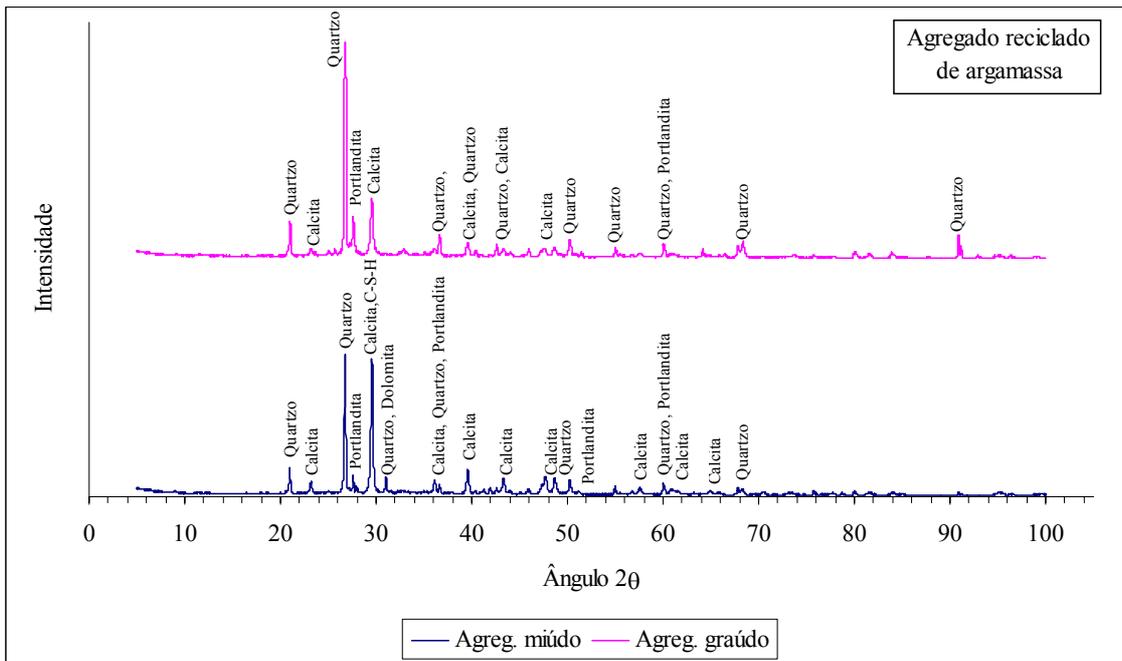


Figura 5.6 Difratograma dos agregados miúdo e graúdo reciclados de argamassa

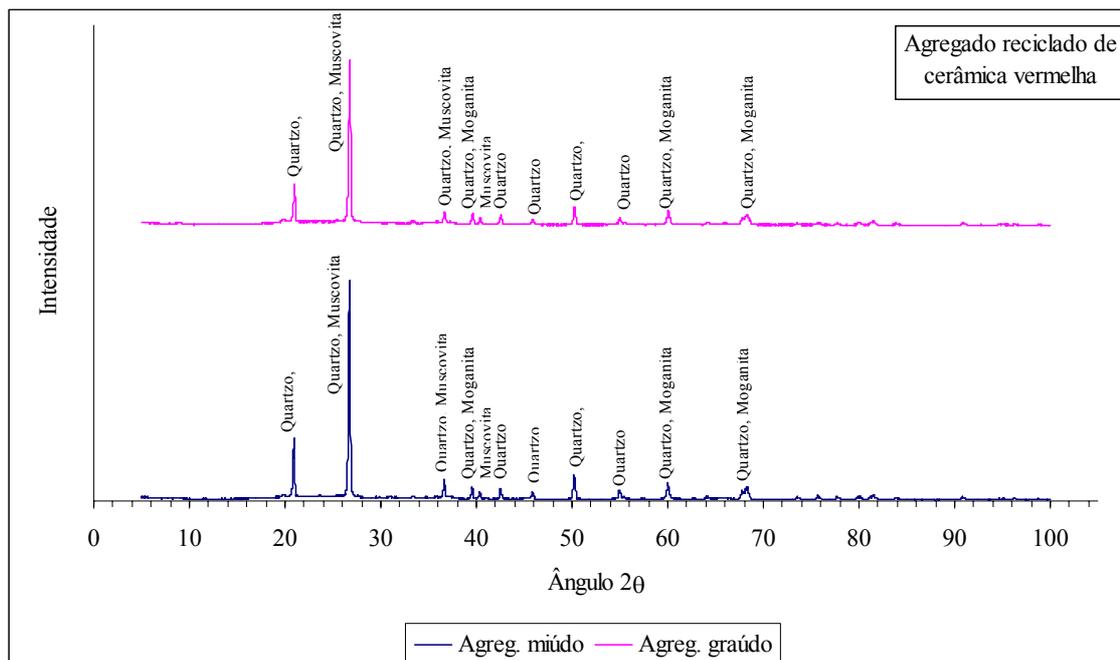


Figura 5.7 Difratograma dos agregados miúdo e graúdo reciclados de cerâmica vermelha

Nota-se que tanto para os agregados graúdos reciclados de argamassa quanto para os graúdos reciclados de concreto possuem maiores picos de quartzo que seus respectivos agregados miúdos reciclados. Portanto, embora a técnica de difração de raios X forneça dados para uma análise qualitativa, a relativa menor altura dos picos de quartzo para os agregados miúdos comparados com os picos para os agregados graúdos sugerem uma menor quantidade destes compostos, ou seja, de agregado natural, para os agregados miúdos (LIMBACHIYA et al., 2007).

Para os agregados reciclados de cerâmica vermelha, nota-se que os mesmos são compostos basicamente por sílica (quartzo, muscovita e moganita), estando este resultado de acordo com os de outros pesquisadores (KHALOO, 1994; VIEIRA et al., 2003).

#### 5.2.2.2 Granulometria

Após a britagem, moagem e separação do material reciclado em agregado graúdo e miúdo, determinou-se a composição granulométrica dos mesmos, segundo a *NM 248/01 – Agregados – Determinação da composição granulométrica*. Na Figura 5.8 encontram-se as curvas granulométricas obtidas para os agregados miúdos reciclados e para o miúdo natural.

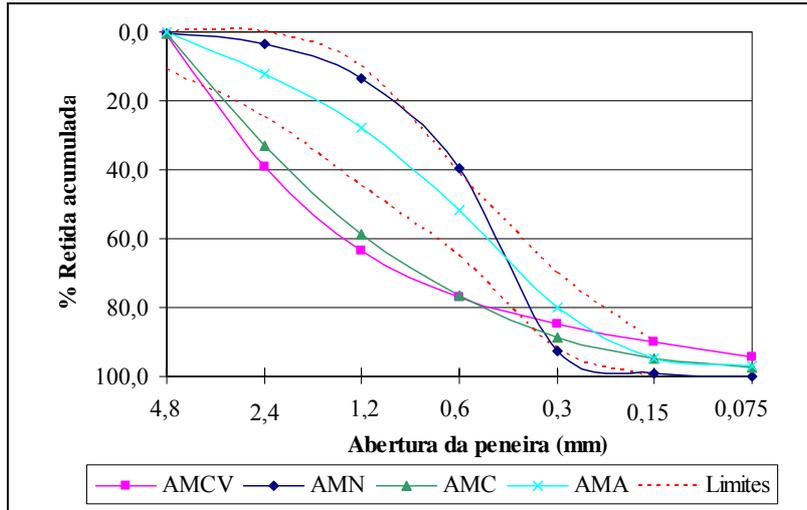


Figura 5.8 Curva granulométrica dos agregados miúdos antes do enquadramento nos limites da Zona 3 da NBR 7.211

Observa-se que os agregados miúdos reciclados de cerâmica vermelha e de concreto tiveram suas curvas granulométricas fora dos limites da zona 3 prescritos pela norma *NBR 7.211/05 – Agregado para concreto – Especificação*, apresentando uma maior quantidade de grandes grãos. Tal comportamento é relatado por HANSEN (1986) como comum para agregados miúdos reciclados e que uma correção na granulometria se faz necessário para se produzir concretos mais trabalháveis.

Procedeu-se então um enquadramento da granulometria desses agregados aos limites impostos pela norma, pois além de se desejar produzir concretos de boa trabalhabilidade, desejava-se também que a composição granulométrica dos agregados não fosse mais uma variável interveniente, uma vez que a mesma pode influenciar nos resultados dos outros ensaios de caracterização e nos resultados das propriedades do concreto estudadas. As curvas granulométricas dos materiais já enquadrados aos limites da norma encontram-se na Figura 5.9.

Para os agregados graúdos, não foi realizado o enquadramento nos limites estabelecidos pela norma *NBR 7211/05*, uma vez que nem a brita natural a ser utilizada também se enquadrava nesses limites. Entretanto, da mesma maneira que para os agregados miúdos, para que a granulometria não fosse uma outra variável interveniente nos resultados dos ensaios de caracterização dos agregados graúdos, aproximou-se a granulometria do agregado graúdo reciclado de argamassa das demais granulometrias dos outros agregados graúdos, às quais já eram bastante similares, conforme pode ser observado na Figura 5.10. Já na Figura 5.11 observa-se essas curvas após a aproximação granulométrica do agregado reciclado de argamassa.

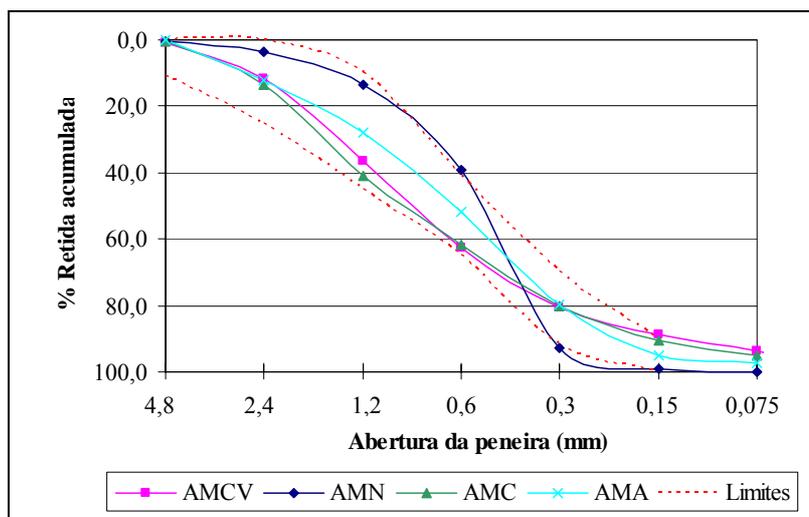


Figura 5.9 Curva granulométrica dos agregados miúdos após o enquadramento nos limites da Zona 3 da NBR 7.211

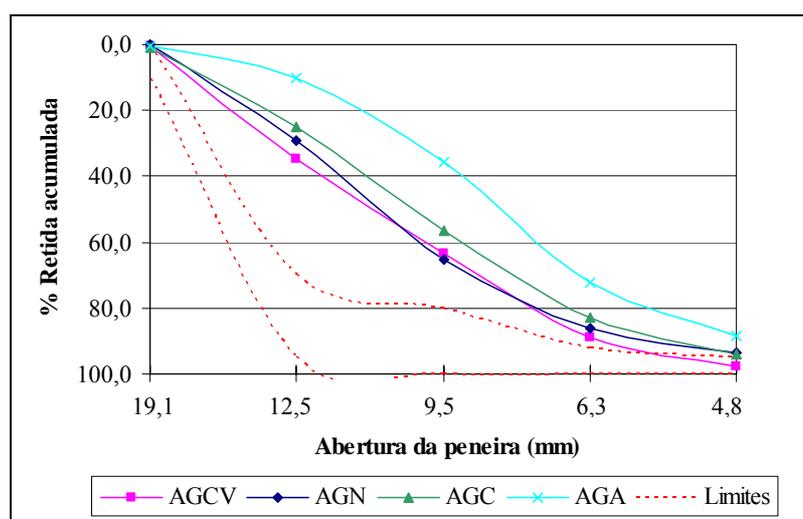


Figura 5.10 Curvas granulométricas dos agregados graúdos antes da aproximação granulométrica do agregado reciclado de argamassa

Uma vez realizado o enquadramento da granulometria dos agregados miúdos reciclados nos limites impostos pela *NBR 7211/05* e a aproximação da curva granulométrica do agregado graúdo reciclado de argamassa das demais curvas granulométricas dos outros agregados graúdos, determinou-se a absorção de água, a massa específica e a massa unitária de todos os agregados.

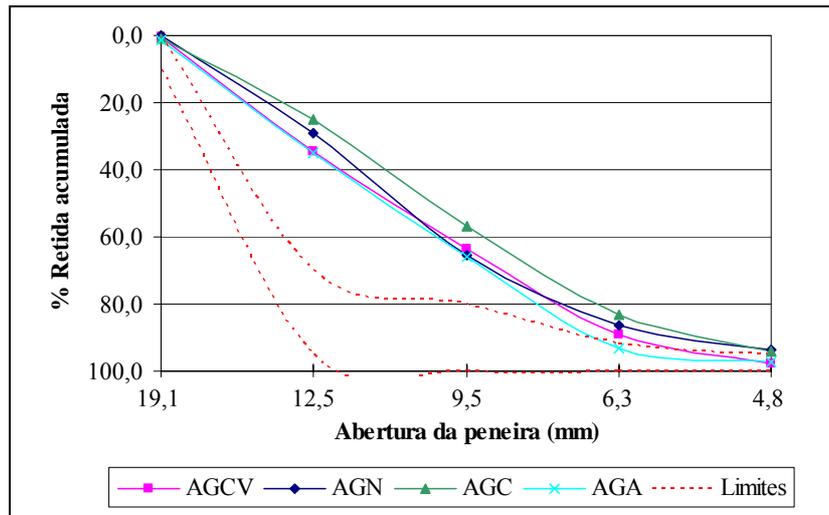


Figura 5.11 Curvas granulométricas dos agregados graúdos depois da aproximação granulométrica do agregado reciclado de argamassa

### 5.2.2.3 Absorção de água

A absorção de água dos agregados miúdos reciclados e do miúdo natural foi medida através do método proposto pela *NM 30/00 – Absorção do agregado miúdo* e a absorção de água dos agregados graúdos reciclados e do gráudo natural foi medida através do método proposto pela *NM 53/02 – Agregado gráudo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Para cada agregado, determinou-se a absorção duas vezes, através de duas amostras. A média dos resultados encontra-se na Figura 5.12.

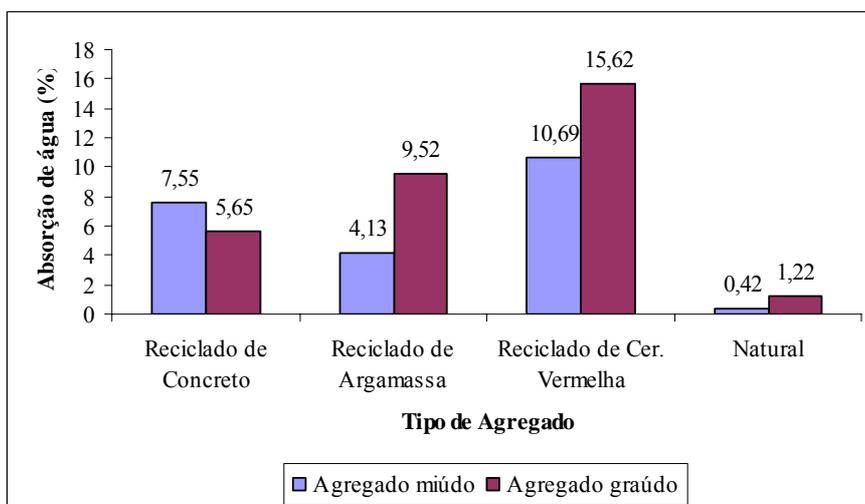


Figura 5.12 Absorção de água dos agregados miúdos e graúdos utilizados

Observa-se que tanto para o agregado miúdo quanto para o agregado graúdo, o agregado reciclado de cerâmica vermelha é o que possui uma maior taxa de absorção de

água, e o agregado natural, a menor. Esses resultados apresentam coerência, uma vez que a cerâmica vermelha apresenta uma maior porosidade que as demais matérias-primas dos agregados reciclados, em função do processo de produção da mesma, e os agregados naturais, em função da sua estrutura interna mais compacta, apresentam as menores taxas de absorção de água. LEVY (2001) e LIN et al. (2004) também obtiveram uma absorção maior para os agregados graúdos de cerâmica vermelha que para os agregados graúdos de concreto e os naturais, enquanto que KHATIB (2005) obteve uma maior absorção de água para os agregados miúdos reciclados de cerâmica vermelha que os agregados miúdos reciclados de concreto.

Com valores intermediários, têm-se os agregados reciclados de concreto e de argamassa, sendo que para os agregados reciclados de argamassa, o agregado graúdo apresentou uma absorção maior que a do agregado miúdo, enquanto que para os agregados reciclados de concreto, ocorreu o contrário, ou seja, o agregado miúdo apresentou uma absorção maior que o graúdo.

Essa maior absorção do agregado miúdo reciclado de concreto pode ser explicada devido à presença da brita na composição do concreto, uma vez que esta possui uma pequena absorção de água, e como o agregado graúdo reciclado de concreto possui quantitativamente mais brita em sua composição que o agregado miúdo reciclado de concreto (HANSEN, 1986), espera-se então que o primeiro tenha uma menor absorção que o segundo.

Determinou-se também curvas de absorção para cada um dos agregados reciclados, através do método de NEVILLE (1997), modificado por LEITE (2001), o qual encontra-se descrito no Anexo B. O objetivo da determinação destas curvas é saber como os agregados reciclados absorvem água com o tempo, uma vez que os métodos propostos pela *NM 53/02* e *NM 30/00* só geram o valor final da absorção depois de 24 horas. Para cada agregado, determinou-se a curva de absorção três vezes, através de três amostras diferentes. A média dos resultados encontra-se na Figura 5.13.

De acordo com essas curvas de absorção, observa-se que os agregados graúdos reciclados de argamassa e de cerâmica vermelha são os que absorvem mais rapidamente a água, chegando a absorver aproximadamente 80% de toda água que seria absorvida em 24 horas em apenas 10 minutos.

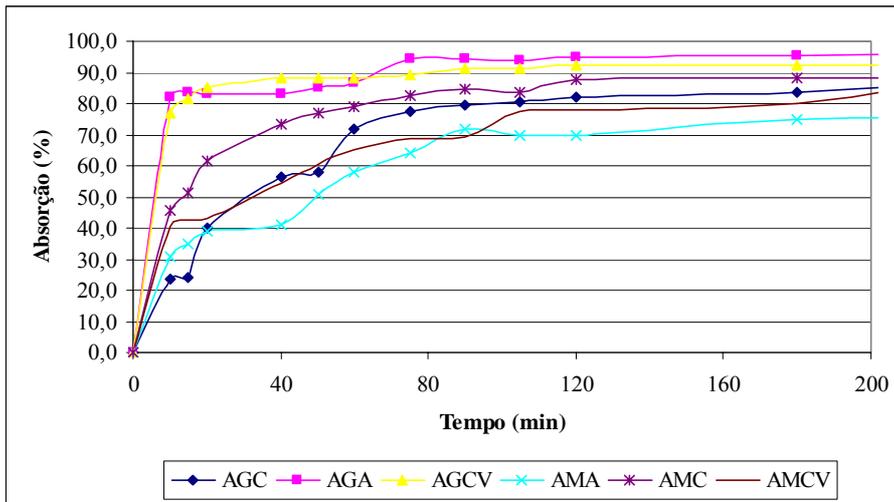


Figura 5.13 Curvas de absorção de água dos agregados reciclados

#### 5.2.2.4 Massa específica

A massa específica dos agregados reciclados e naturais foi medida através do método proposto pela norma *NBR 9776/87 – Agregado miúdo – Determinação da massa específica pelo frasco de Chapman*, para agregados miúdos, e pela *NM 53/02 – Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água*, para os agregados graúdos. Para cada agregado, determinou-se a massa específica duas vezes, através de duas amostras. A média dos resultados encontra-se na Figura 5.14.

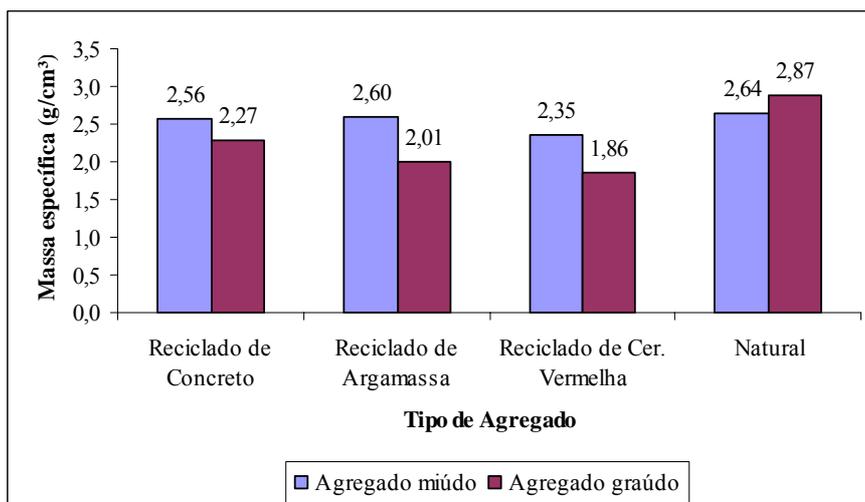


Figura 5.14 Massa específica dos agregados miúdos e graúdos

De acordo com os resultados obtidos, observa-se que os valores das massas específicas dos agregados graúdos e miúdos deram valores diferentes para uma mesma

matéria-prima. Para os agregados naturais, é coerente que estes apresentem valores de massa específica distintos, uma vez que o agregado gráudo natural é gerado a partir da britagem de rocha basáltica e o agregado miúdo natural é oriundo de areia de rio peneirada, entretanto esperava-se para os agregados reciclados que as massas específicas dessem valores similares, uma vez que são gerados a partir de uma mesma matéria-prima.

Contudo, com o processo de moagem para a fabricação dos agregados miúdos, pode-se, durante a quebra da matéria-prima, ter gerado um agregado miúdo reciclado com menor quantidade de poros que os gráudos, ou seja, com uma maior massa por volume, justificando assim o porquê das massas específicas maiores para os agregados miúdos. Entretanto, especificamente para os agregados reciclados de concreto, esperava-se que o agregado miúdo apresentasse uma massa específica menor que a do gráudo, em função dos valores encontrados para a absorção destes. Essas distorções podem ser atribuídas ao método de ensaio utilizado que não foi adequado.

Outro ponto que merece destaque é a inferioridade das massas específicas obtidas para os agregados reciclados quando comparadas com as massas específicas dos agregados naturais. Essa redução provavelmente ocorre em função da alta porosidade característica dos agregados reciclados.

O agregado reciclado de cerâmica vermelha apresentou as menores massas específicas, sendo aparentemente o agregado com maior quantidade de vazios. Pela maior presença de agregados naturais em sua composição, o agregado gráudo reciclado de concreto apresentou uma massa específica superior aos demais agregados gráudos reciclados. O comportamento aqui observado também foi obtido por LEVY (2001) e KHATIB (2005).

#### 5.2.2.5 Massa unitária

A massa unitária dos agregados reciclados e naturais foi determinada através do método proposto pela *NM 45/02 – Agregados – Determinação da massa unitária e dos espaços vazios*. Para cada agregado, determinou-se a massa unitária duas vezes, através de duas amostras. A média dos resultados encontra-se na Figura 5.15.

O objetivo da determinação da massa unitária seria a descobrir qual dos agregados utilizados gera um melhor empacotamento, ou seja, qual se distribui melhor, deixando o mínimo de vazios em um determinado volume.

Como os agregados reciclados são provenientes de matérias-primas diferentes, com massas específicas diferentes, os resultados expostos não podem ser comparados, já que neles não se tem isolado a influência de suas massas específicas. A melhor maneira de compará-los então, seria parametrizá-los em função da massa específica do agregado natural de seu grupo (graúdo e miúdo) e se determinar qual a massa unitária corrigida desses materiais. Essas relações de parametrização estão expressas na Tabela 5.5 e a massa unitária já corrigida na Figura 5.16.

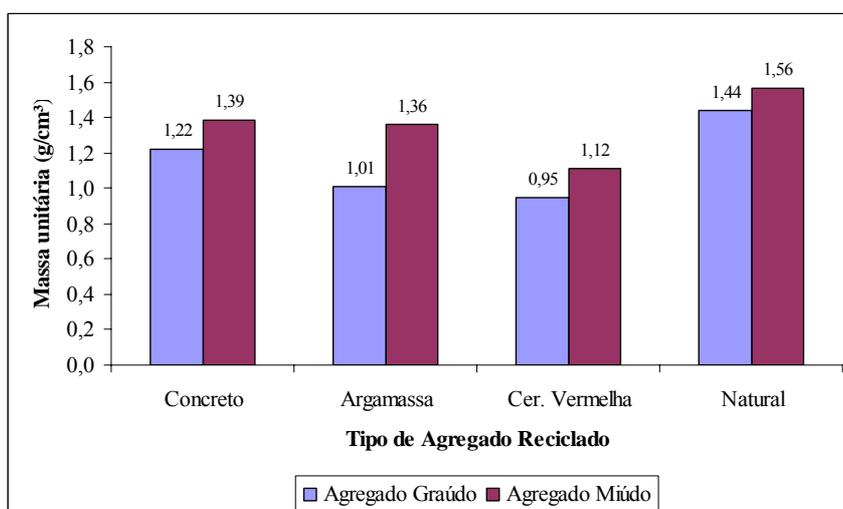


Figura 5.15 Massas unitárias dos agregados reciclados e naturais obtidos pela recomendação da norma NM 45/02

Tabela 5.5 Parametrização da massa unitária dos agregados

Tipo de Agregado	(A)= massa espec. do agregado dividido pela massa espec. do agregado natural	Massa unitária do agregado (NM 45) dividido por (A)
Miúdo Natural	1,00	1,56
Miúdo Reciclado de Cerâmica Vermelha	0,89	1,26
Miúdo Reciclado de Concreto	0,97	1,43
Miúdo Reciclado de Argamassa	0,98	1,39
Graúdo Natural	1,00	1,44
Graúdo Reciclado de Cerâmica Vermelha	0,65	1,46
Graúdo Reciclado de Concreto	0,79	1,54
Graúdo Reciclado de Argamassa	0,70	1,44

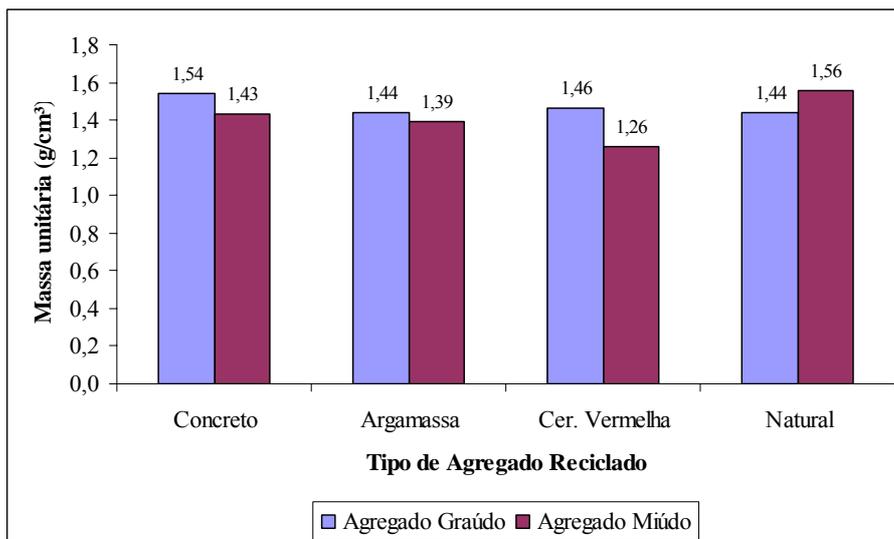


Figura 5.16 Massa unitária dos agregados reciclados e naturais após a parametrização

Após a parametrização, esperava-se encontrar valores de massa unitária iguais para os agregados miúdos e graúdos provenientes de uma mesma matéria-prima, entretanto isso não ocorreu. Uma possível causa desse comportamento foi a forma não semelhante dos grãos dos agregados graúdos e miúdos reciclados, mesmo para uma mesma matéria-prima, propiciando assim diferentes ajustes na fôrma utilizada no ensaio, ou seja, diferentes empacotamentos. Outro possível motivo pode ter sido uma diferenciação na composição dos agregados reciclados, mesmo para uma mesma matéria-prima. A exemplo disso, alguns pesquisadores (TOPÇU e SENDEL, 2004; KATZ, 2003) apresentam que agregados graúdos e miúdos reciclados de concreto apresentam diferentes composições, sendo que geralmente o miúdo possui mais argamassa que o graúdo.

Os resultados obtidos parecem coerentes, uma vez que para os agregados miúdos, a seqüência obtida, do material de maior massa unitária corrigida para o de menor foi: agregado natural, agregado reciclado de concreto, agregado reciclado de argamassa e agregado reciclado de cerâmica vermelha. Isso significa que o agregado miúdo natural consegue se distribuir melhor em um determinado volume, enquanto que o agregado miúdo reciclado de cerâmica vermelha não possui essa característica, possivelmente em função da forma lamelar de seus grãos.

Para os agregados graúdos, observa-se que o agregado reciclado de concreto apresentou a maior massa unitária corrigida, sendo que os demais agregados apresentaram uma massa unitária corrigida com valores bastante próximos, o que significa que estes promovem empacotamentos bastante semelhantes.

### 5.2.3 Água

Utilizou-se a água da rede pública de distribuição como água de amassamento e para a pré-umidificação dos agregados reciclados.

### 5.2.4 Aditivo

Utilizou-se um aditivo superplastificante isento de cloretos, desenvolvido para uso em concretos em geral, com base em uma cadeia de polímeros de éter carboxílico modificado. A quantidade utilizada nos traços de concreto produzidos manteve-se dentro da faixa especificada pelo fabricante.

## 5.3 Confeção dos concretos

Após a realização dos ensaios de caracterização, iniciou-se a confeção dos concretos e a moldagem dos corpos-de-prova, conforme o projeto experimental já apresentado.

Como primeiro passo para a confeção dos concretos, fez-se uma dosagem experimental com os agregados naturais através do método do IPT/EPUSP (HELENE & TERZIAN, 1992) utilizando-se de um traço médio 1:5 (cimento:agregados), com o intuito de se determinar o teor ideal de argamassa, que foi de 51%, para uma relação água/cimento de 0,54, obtendo-se um abatimento pelo método do tronco de cone (*slump test*) de  $12 \pm 2$  cm. Em seguida, fez-se mais 3 traços auxiliares, um mais rico (teor de agregados=3,5) e dois mais pobres (teor de agregados=6,5 e 7,5) para traçar o diagrama de dosagem. De cada traço confeccionado moldaram-se 6 corpos-de-prova, os quais foram rompidos 2 aos 7 dias, 2 aos 14 dias e 2 aos 28 dias de idade. O diagrama de dosagem dos concretos utilizados encontra-se na Figura 5.17.

Uma vez determinado o diagrama de dosagem, iniciou-se a execução dos 50 traços determinados pelo projeto experimental. Entretanto, alguns ajustes foram necessários serem feitos nos traços que continham a substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados.

Primeiramente foi feita uma compensação do volume dos agregados reciclados a serem utilizados nos traços pré-determinados (HANSEN e NARUD, 1983; HANSEN e BØEGH, 1985; LEITE, 2001; MESCE et al., 2003; VIEIRA, 2003), pois a simples substituição da massa do agregado natural pela massa do agregado reciclado iria resultar traços com volumes maiores de agregados reciclados, uma vez que a massa específica

dos agregados reciclados é menor que a massa específica dos agregados naturais, demandando assim mais água e cimento para produzir traços equivalentes ao traço de referência, ou seja, àquele com agregados naturais.

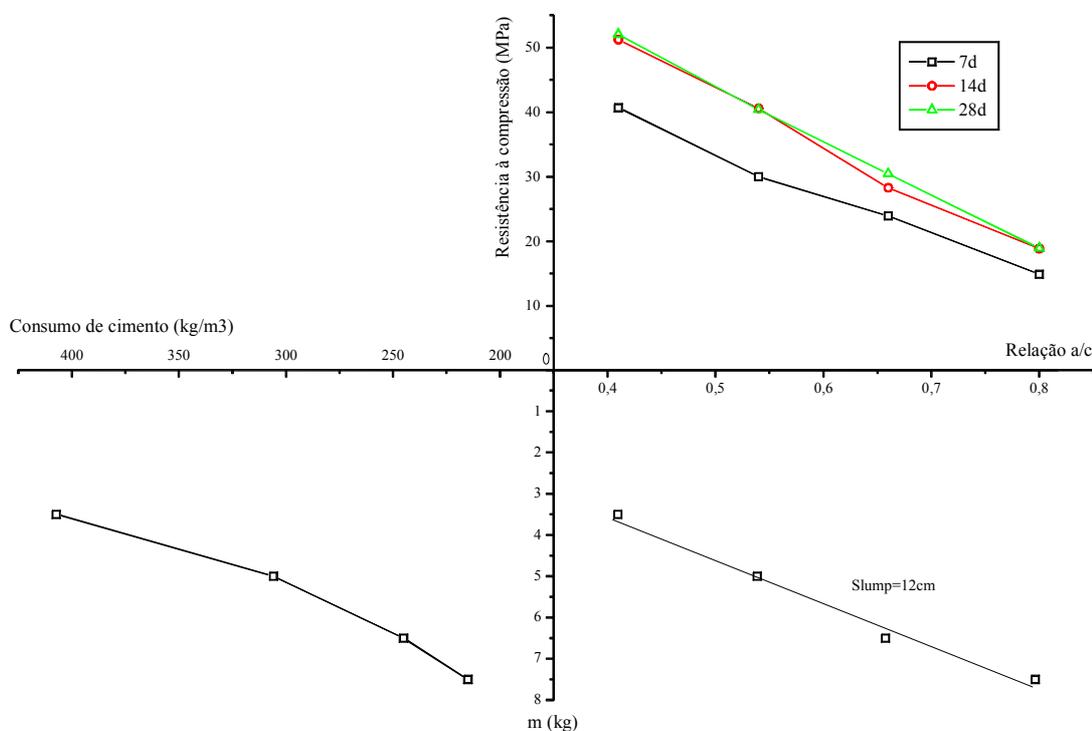


Figura 5.17 Diagrama de dosagem dos concretos utilizados

A compensação do volume dos agregados reciclados nos traços do projeto experimental foi feita segundo a Equação 5.1. Os traços com os volumes não compensados e compensados encontram-se no Anexo C.

$$M_{AR} = M_{AN} \cdot \frac{\gamma_{AR}}{\gamma_{AN}} \quad (5.1)$$

Onde:

$M_{AR}$  = massa do agregado reciclado (kg)

$M_{AN}$  = massa do agregado natural (kg)

$\gamma_{AR}$  = massa específica do agregado reciclado ( $\text{kg}/\text{cm}^3$ )

$\gamma_{AN}$  = massa específica do agregado natural ( $\text{kg}/\text{cm}^3$ )

Posteriormente, determinou-se qual seria a massa de água que teria de ser adicionada antes das concretagens aos agregados reciclados, para que estes a absorvessem, sendo então colocados na betoneira já pré-umedecidos, evitando assim que uma grande parte da água de amassamento fosse absorvida pelos agregados, o que perturbaria o processo de hidratação do cimento.

Alguns autores (LEITE, 2001; VIEIRA, 2003) utilizaram em suas pesquisas, teores em torno de 40% a 50% do total da água absorvida em 24 horas. Já outros autores, tais como BRITO et al. (2005), XIAO et al. (2005; 2006), ZAHARIEVA et al. (2003), UJIKE (2000) e ETXEBERRIA et al. (2006), utilizaram teores maiores de água na pré-umidificação, chegando até à saturação.

Entretanto, outros autores utilizaram o tempo como parâmetro de medida da absorção em vez da quantidade de água. Segundo SCHULZ e HENDRICKS (1992), 30 minutos de submersão em água é o tempo suficiente para que ocorra a quase total saturação dos agregados reciclados de cerâmica e que, caso se deixasse os agregados submersos por mais 23 horas e meia, ter-se-ia um acréscimo de somente 2% na absorção final. PADMINI et al. (2002) utilizaram somente 10 minutos de submersão em água em seus testes com agregados reciclados de cerâmica e de concreto. SAGOE-CRENTSIL et al. (2001), KATZ (2003) e GÓMEZ-SOBERÓN (2002), na fabricação de concretos com agregados reciclados de concreto, utilizaram um tempo de 10, 15 e 20 minutos de imersão, respectivamente, enquanto que TOPÇU e SENDEL (2004), TSUJI et al. (2000) e KHALAF (2006) utilizaram 30 minutos.

Para essa pesquisa, umedeceram-se os agregados reciclados, 10 minutos antes da mistura na betoneira, com 80% da água que seria absorvida em 24 horas pela massa do agregado reciclado correspondente ao traço a ser executado. Utilizou-se esse valor porque, segundo os gráficos de absorção de água dos agregados reciclados (Figura 5.13), esses agregados atingem 80% da absorção total de água, em média, nos primeiros 120 minutos após a mistura. Como as reações de hidratação perduram por muito tempo, ultrapassando o tempo de fim de pega do cimento<sup>7</sup>, o qual é de 245 minutos para o cimento utilizado, garante-se que haverá água disponível para as reações de hidratação, sem que a mesma seja absorvida pelos agregados.

Convém salientar que a NBR 15.116, que estabelece requisitos para o emprego de agregados reciclados de resíduos de construção civil, sugere que seja feita uma pré-molhagem nos agregados reciclados com um teor de água de 80% da absorção do mesmo.

Após esse procedimento de pré-umidificação, despejava-se todo o agregado graúdo na betoneira (de eixo vertical), juntamente com parte da água de amassamento.

---

<sup>7</sup> MEHTA & MONTEIRO (1997) definem tempo de fim de pega do cimento como o período de tempo compreendido desde a mistura do cimento com a água até o momento em que inicia-se o desenvolvimento de resistências mecânicas a uma taxa significativa.

Em seguida, adicionava-se o cimento e o restante da água de amassamento, misturando-os por alguns minutos. Por fim adicionava-se o agregado miúdo à mistura, deixando a betoneira misturar a massa por mais alguns minutos. Em alguns traços foi necessário adicionar também o aditivo superplastificante à mistura, até que se atingisse ou superasse a trabalhabilidade desejada, que foi fixada em  $12\pm 2$ cm medida pelo abatimento de tronco de cone (*slump test*).

Uma vez alcançado ou superado o abatimento pretendido, para cada traço produzido, moldaram-se 4 corpos-de-prova cilíndricos de 10cm de diâmetro por 20cm altura, conforme os procedimentos da *NBR 5738/03 – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova*, para se realizar os ensaios de módulo de deformação e resistência à compressão. Moldaram-se ainda 2 corpos-de-prova prismáticos de 7,5cm x 7,5cm de seção transversal por 32,5cm de comprimento, conforme os procedimentos da norma *ASTM C 157-93 – Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete*, para o ensaio de retração por secagem.

#### **5.4 Ensaios realizados no concreto endurecido**

Após moldados, os corpos-de-prova cilíndricos ficaram expostos à temperatura e umidade ambiente por 24 horas, quando então foram desmoldados e levados para uma câmara úmida, onde permaneceram até um dia antes da data de serem ensaiados. Nesta data, esses corpos-de-prova foram capeados e recolocados na câmara úmida, onde permaneceram até o momento do ensaio.

Os corpos-de-prova prismáticos, por sua vez, eram colocados imediatamente na câmara úmida depois de moldados. Após 24 horas, esses corpos-de-prova eram desmoldados e imersos em recipientes de água saturada com cal dispostos em uma câmara com temperatura ( $23\pm 1,7$  °C) e umidade ( $50\pm 4\%$ ) controladas.

##### **5.4.1 Resistência à compressão**

Para este ensaio utilizou-se os procedimentos sugeridos pela norma *ABNT NM 101/96 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. A resistência à compressão dos concretos produzidos foi determinada aos 28 dias, utilizando-se 4 corpos-de-prova por traço, sendo 2 moldados especificamente para este ensaio e os outros 2 foram levados à ruptura quando se realizava o ensaio de módulo de

deformação. Os resultados desse ensaio encontram-se apresentados no Anexo E, sendo a análise e a discussão dos mesmos apresentadas no item 6.2.1.

#### 5.4.2 Módulo de deformação

Para este ensaio utilizou-se os procedimentos sugeridos pela norma ABNT *NBR 8522/03 – Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação*. O módulo de deformação dos concretos produzidos foram determinados aos 28 dias, utilizando-se 2 corpos-de-prova por traço.

Para ensaiar os corpos-de-prova, utilizou-se um sistema que fazia a leitura das deformações à medida que as cargas eram aplicadas pela prensa. Todos os corpos-de-prova ensaiados foram levados à ruptura.

O sistema utilizado para a captação das deformações era composto por dois anéis paralelos, que eram fixados no corpo-de-prova a ser ensaiado, e por dois LVDT (transformador diferencial variável linear), que mediam as deformações entre os dois anéis em milésimo de milímetro. Os valores das deformações e das cargas aplicadas eram obtidos através de um software instalado em um computador que estava interligado à prensa. Pode ser observado na Figura 5.18 o aparato utilizado para se obter as deformações dos corpos-de-prova mediante a aplicação das cargas. Os resultados desse ensaio encontram-se apresentados no Anexo F, sendo a análise e discussão dos mesmos apresentadas no item 6.2.2.



Figura 5.18 Aparato utilizado para se obter as deformações dos corpos-de-prova dos traços de concreto (LVDT)

### 5.4.3 Retração por secagem

Utilizou-se as orientações da norma *ASTM C 157- 93 Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete*, para os procedimentos de moldagem e cura dos corpos-de-prova, e os da norma *ASTM C 490 – 96 Standard practice for use of apparatus for the determination of length change of hardened cement paste, mortar and concrete*, para o uso do aparato utilizado na realização das leituras do comprimento dos corpos-de-prova.

Para a fabricação dos corpos-de-prova utilizaram-se formas de madeira, onde em cada fôrma se confeccionava 2 corpos-de-prova (Figura 5.19).



Figura 5.19 Fôrma de madeira utilizada na confecção dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova produzidos continham um pino de aço inoxidável em cada lado do mesmo, uma vez que as leituras de retração eram feitas considerando a distância entre esses dois pinos. Estes pinos continham ranhuras em uma extremidade, para facilitar a aderência no concreto, e uma rosca na outra extremidade, através da qual eram rosqueados, portanto fixados, em bases metálicas de área igual à seção transversal do corpo-de-prova (Figura 5.20-a).

Estas bases metálicas eram colocadas nas formas (Figura 5.20-b) que posteriormente eram enchidas com o concreto produzido (Figura 5.20-c). O adensamento do concreto era realizado em duas camadas, com aplicação de 25 golpes por camada, através de um soquete cilíndrico metálico.



a)



b)



c)

Figura 5.20 a) Base metálica de área igual à seção transversal do corpo-de-prova onde era rosqueado um pino de aço inoxidável; b) Colocação das bases metálicas com os pinos na fôrma; c) Preenchimento da fôrma com o concreto produzido

Após 24 horas após a moldagem, as fôrmas eram desmontadas, retirando-se assim os corpos-de-prova. Desrosqueava-se então as bases metálicas, ficando somente uma pequena parte do pino exposta (Figura 5.21). Uma vez desmoldados, os corpos-de-prova ficaram imersos por 30 minutos em recipientes, que continham água saturada com cal, em uma câmara com temperatura ( $23 \pm 1,7$  °C) e umidade ( $50 \pm 4\%$ ) controladas. Após esse período, estes corpos-de-prova eram retirados dos recipientes, enxugados e então fazia-se a leitura inicial do corpo-de-prova através de um aparato metálico que continha um defletômetro digital, de precisão de milésimo de milímetro, em uma das

extremidades, onde os corpos-de-prova eram dispostos horizontalmente (Figura 5.22). O procedimento adotado para se realizar as leituras está descrito no Anexo D.



Figura 5.21 Desrosqueamento das bases metálicas



Figura 5.22 Aparato utilizado para realização das leituras de retração dos corpos-de-prova

Após a realização da primeira leitura, os corpos-de-prova eram reimersos em água saturada com cal, onde permaneciam por mais 27 dias, período esse em que eram realizadas as leituras de retração de 4, 7, 14 e 28 dias depois de moldados, utilizando-se o mesmo procedimento adotado para a leitura inicial. Após esse período, esses corpos-de-prova eram retirados da imersão e dispostos em prateleiras dentro da mesma câmara com temperatura e umidade controladas, efetuando-se as leituras de retração de 56, 112 e 224 dias. Convém salientar que o procedimento adotado para se realizar as leituras foi aplicado a todos os corpos-de-prova, mantendo-se inclusive o posicionamento dos corpos-de-prova no aparelho de medição durante a realização de todas as leituras, uma

vez que desejava-se reduzir ao máximo as intervenções externas, pois as deformações medidas eram da ordem de milésimo de milímetro. Os resultados desse ensaio encontram-se apresentados no Anexo G, sendo a análise e discussão dos mesmos apresentadas no item 6.2.4.

## **CAPÍTULO 6– APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

6.1 Apresentação dos resultados

6.2 Análise e discussão dos resultados

6.2.1 Resistência à compressão

6.2.2 Módulo de deformação

6.2.3 Correlação entre a resistência à compressão e o módulo de deformação

6.2.4 Retração por secagem

6.3 Validação dos modelos obtidos

6.3.1 Resistência à compressão

6.3.2 Módulo de deformação

6.4 Simulação do uso dos agregados reciclados de RCD de algumas cidades brasileiras na fabricação de concretos

6.5 Comparação de custos de concretos de mesma resistência à compressão produzidos com agregados naturais e com agregados reciclados

## 6 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 6.1 Apresentação dos resultados

Aos 28 dias de idade, os corpos-de-prova destinados à determinação da resistência à compressão e do módulo de deformação foram ensaiados, enquanto que os corpos-de-prova destinados à determinação da retração por secagem foram ensaiados até a idade de 224 dias. Os Anexos E, F e G trazem todos os resultados dos ensaios de resistência à compressão, módulo de deformação e retração por secagem, respectivamente.

Entretanto, na Figura 6.1 estão apresentados o comportamento médio das retrações por secagem para cada traço de concreto do projeto de experimentos, enquanto que na Tabela 6.1 estão apresentados o maior resultado obtido para a resistência à compressão ( $f_c$ ) e para o módulo de deformação ( $E_c$ ) de cada traço.

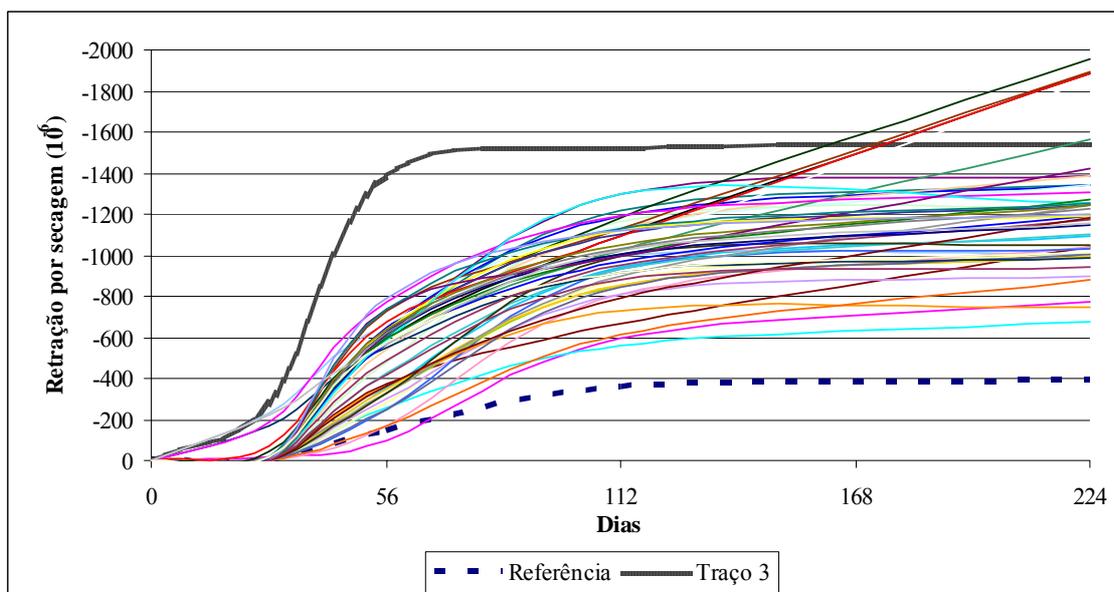


Figura 6.1 Comportamento médio das retrações por secagem para cada traço de concreto do projeto de experimentos

Tabela 6.1 Maior valor para a resistência à compressão e para o módulo de deformação dos concretos definidos no projeto de experimentos

Traço	a/c	Agregado Graúdo				Agregado Miúdo				f <sub>c</sub> (MPa)	E <sub>c</sub> (GPa)
		% AGN	% AGC	% AGCV	% AGA	% AMN	% AMC	% AMCV	% AMA		
01	0,46	100	0	0	0	100	0	0	0	46,13	34,47
02	0,74	100	0	0	0	0	0	100	0	34,42	20,62
03	0,74	100	0	0	0	0	100	0	0	17,78	15,14
04	0,46	100	0	0	0	0	50	50	0	47,69	29,06
05	0,74	0	0	0	100	0	0	0	100	15,73	11,85
06	0,46	0	0	0	100	0	0	50	50	31,11	16,70
07	0,46	0	0	0	100	0	50	0	50	25,96	15,31
08	0,74	0	0	0	100	0	33	33	33	19,12	14,47
09	0,46	0	0	100	0	0	0	0	100	24,13	13,47
10	0,74	0	0	100	0	0	0	50	50	18,62	11,83
11	0,74	0	0	100	0	0	50	0	50	14,67	10,64
12	0,46	0	0	100	0	0	33	33	33	26,88	12,61
13	0,74	0	0	50	50	100	0	0	0	18,34	15,42
14	0,46	0	0	50	50	0	0	100	0	35,48	15,83
15	0,46	0	0	50	50	0	100	0	0	30,12	16,29
16	0,74	0	0	50	50	0	50	50	0	19,33	14,28
17	0,46	0	100	0	0	0	0	0	100	30,47	20,26
18	0,74	0	100	0	0	0	0	50	50	17,56	16,88
19	0,74	0	100	0	0	0	50	0	50	14,60	14,86
20	0,46	0	100	0	0	0	33	33	33	39,01	21,18
21	0,74	0	50	0	50	100	0	0	0	19,40	18,07
22	0,46	0	50	0	50	0	0	100	0	42,18	18,69
23	0,46	0	50	0	50	0	100	0	0	33,65	21,66
24	0,74	0	50	0	50	0	50	50	0	19,05	15,01
25	0,46	0	50	50	0	100	0	0	0	34,78	21,15
26	0,74	0	50	50	0	0	0	100	0	26,03	14,39
27	0,74	0	50	50	0	0	100	0	0	16,79	13,18
28	0,46	0	50	50	0	0	50	50	0	35,13	18,70
29	0,74	0	33	33	33	0	0	0	100	14,67	12,06
30	0,46	0	33	33	33	0	0	50	50	31,11	17,12
31	0,46	0	33	33	33	0	50	0	50	27,23	16,64
32	0,74	0	33	33	33	0	33	33	33	18,62	14,15
33	0,60	0	50	25	25	0	33	33	33	25,04	16,77
34	0,60	0	0	50	50	0	33	33	33	23,42	14,51
35	0,60	0	25	50	25	0	33	33	33	23,70	13,07
36	0,60	0	50	0	50	0	33	33	33	25,96	16,68
37	0,60	0	25	25	50	0	33	33	33	23,49	16,21
38	0,60	0	50	50	0	0	33	33	33	24,90	16,00
39	0,60	0	33	33	33	0	50	25	25	23,63	16,12
40	0,60	0	33	33	33	0	0	50	50	26,10	15,62
41	0,60	0	33	33	33	0	25	50	25	26,59	14,98
42	0,60	0	33	33	33	0	50	0	50	23,56	16,24
43	0,60	0	33	33	33	0	25	25	50	23,35	15,85
44	0,60	0	33	33	33	0	50	50	0	27,86	15,68

Tabela 6.1 Maior valor para a resistência à compressão e para o módulo de deformação dos concretos definidos no projeto de experimentos – continuação

Traço	a/c	Agregado Graúdo				Agregado Miúdo				f <sub>c</sub> (MPa)	E <sub>c</sub> (GPa)
		% AGN	% AGC	% AGCV	% AGA	% AMN	% AMC	% AMCV	% AMA		
45	0,80	0	33	33	33	0	33	33	33	17,35	13,55
46	0,40	0	33	33	33	0	33	33	33	36,54	19,70
47	0,60	0	33	33	33	0	33	33	33	23,77	15,54
48	0,60	0	33	33	33	0	33	33	33	21,22	16,16
49	0,46	25	25	25	25	25	25	25	25	34,85	21,07
50	0,74	25	25	25	25	25	25	25	25	19,05	16,04

## 6.2 Análise e discussão dos resultados

Como já mencionado no capítulo anterior, o projeto experimental utilizado envolve 7 variáveis independentes (agregado miúdo reciclado de concreto, agregado miúdo reciclado de argamassa, agregado miúdo reciclado de cerâmica vermelha, agregado graúdo reciclado de concreto, agregado graúdo reciclado de argamassa, agregado graúdo reciclado de cerâmica vermelha e relação água/cimento). O experimento foi fracionado, de forma a reduzir o número total corpos-de-prova a serem ensaiados. Os tratamentos foram definidos de acordo com um Projeto Composto de Segunda Ordem, o qual permite testar termos lineares e quadráticos. Os ensaios realizados permitiram construir os modelos lineares e não lineares, para cada variável de resposta, que estão apresentados a seguir.

Para um melhor entendimento dos modelos fez-se abreviações dos nomes das variáveis independentes e das variáveis de resposta, as quais encontram-se na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 Simbologia das variáveis independentes e das variáveis de resposta utilizadas nos modelos

Símbolo	Variável	
	Nome	Tipo
rag	percentual do agregado graúdo natural substituído pelo agregado reciclado graúdo de argamassa	independente
ram	percentual do agregado miúdo natural substituído pelo agregado miúdo reciclado de argamassa	independente
rcg	percentual do agregado graúdo natural substituído pelo agregado reciclado graúdo de concreto	independente

Tabela 6.2 Simbologia das variáveis independentes e das variáveis de resposta utilizadas nos modelos – continuação

Símbolo	Variável	
	Nome	Tipo
rcm	percentual do agregado miúdo natural substituído pelo agregado miúdo reciclado de concreto	independente
rvg	percentual do agregado graúdo natural substituído pelo agregado reciclado graúdo de cerâmica vermelha	independente
rvm	percentual do agregado miúdo natural substituído pelo agregado miúdo reciclado de cerâmica vermelha	independente
a/c	relação água/cimento	independente
$f_c$	resistência à compressão aos 28 dias	de resposta
$E_c$	módulo de deformação aos 28 dias	de resposta
$\epsilon_{224}$	retração por secagem aos 224 dias	de resposta

Os dados coletados permitem gerar modelos relacionando as variáveis de resposta com as variáveis independentes, podendo-se determinar modelos simples, como a regressão linear múltipla, ou modelos complexos, como a regressão não linear.

Juntamente com a construção dos modelos foi feita uma análise dos resíduos padronizados. Os dados coletados que geraram resíduos padronizados com módulo maior que 3 foram eliminados da análise, sendo que estes foram somente os valores da resistência à compressão, do módulo de deformação e da retração por secagem aos 56 dias para o traço 3 e os da retração por secagem aos 56 dias para o traço 40.

Para os resultados apresentados pela resistência à compressão e pelo módulo de deformação, as análises apresentadas a seguir foram desenvolvidas apoiadas em uma rotina de regressão linear, que mesmo sendo relativamente simples, apresentaram bons resultados. Como este tipo de regressão não apresentou bons resultados para os resultados apresentados pela retração por secagem, fez-se também uma regressão não-linear. Foram tentados alguns modelos mais complexos, mas o ganho estatístico foi pequeno, sendo assim, optou-se pelos modelos mais simples.

Para a análise e discussão dos resultados, a pura e simples comparação entre os resultados aqui encontrados e os encontrados em outras pesquisas nacionais e internacionais é difícil de ser realizada, uma vez que a maioria dos materiais utilizados difere entre si, além das diferentes condições experimentais em que os mesmos foram obtidos e da forma em que é feita a substituição do agregado natural pelo reciclado, uma vez que alguns pesquisadores simplesmente aumentam o teor de água para se chegar à

trabalhabilidade desejada, enquanto que outros aumentam a água e aumentam também o teor de cimento, de forma a manter a relação a/c, havendo outros ainda que simplesmente adicionam aditivo plastificante/superplastificante para manter a trabalhabilidade, sem alterar a relação a/c e o consumo de cimento. Entretanto, procurou-se relacionar os resultados aqui obtidos com os resultados de outras pesquisas realizadas em condições equivalentes, buscando informações que ajudem a explicar e a entender o comportamento obtido.

### 6.2.1 Resistência à compressão

O modelo determinado para representar a resistência à compressão foi o da Equação 6.1, abaixo descrita.

$$f_c = \left( \frac{102,43}{5,38^{a/c}} \right) [1 - (\% \text{substituído})] \quad (6.1)$$

O primeiro termo entre parênteses refere-se à resistência dos corpos-de-prova sem a substituição do agregado natural pelo reciclado, seguindo a Lei de Abrams, que é função da relação água/cimento. Este termo foi definido previamente, a partir de uma análise dos valores obtidos quando a relação água/cimento é igual a 0,46, 0,60 e 0,74, sendo estabelecido de forma a gerar o melhor ajuste possível, ou seja, minimizar os erros de previsão.

O segundo termo, entre colchetes, define um percentual a ser aplicado sobre a resistência original, modificando-a em função da substituição do agregado natural pelo reciclado. Então essa modificação da resistência é função do percentual de agregado natural substituído pelo agregado reciclado, conforme a Equação 6.2. Se a modificação da resistência for positiva, haverá uma perda de resistência, e caso seja negativa, haverá um acréscimo.

$$\text{Modificação da resistência} = f(\% \text{ substituído}) \quad (6.2)$$

Fez-se então uma regressão múltipla utilizando a modificação da resistência como variável de resposta e os percentuais dos agregados naturais substituídos pelos agregados reciclados como variáveis dependentes. O resultado aponta que todas as variáveis dependentes utilizadas exercem efeito significativo sobre a modificação da resistência dos concretos com agregado reciclado. O resultado da análise dessa regressão múltipla encontra-se no Anexo H.

O modelo da modificação da resistência encontrado possui um excelente coeficiente de determinação ( $R^2=97,8\%$ ), estando descrito na Equação (6.3).

$$\begin{aligned} \text{Modificação da resistência} = & 0,338.rag + 0,153.ram + 0,275.rcg + \\ & + 0,067.rcm + 0,371.rvg - 0,138.rvm \end{aligned} \quad (6.3)$$

A tentativa de inserir termos quadrados (como  $ram.ram$ , por exemplo) ou interações (como  $ram.rag$ , por exemplo) não melhorou o ajuste, sendo portanto, estes termos mais complexos, deixados de fora.

Então, o modelo final que estima a resistência em função do percentual de substituição dos agregados naturais pelos reciclados e da relação água/cimento encontra-se representado na Equação 6.4. Nesse modelo, os percentuais de substituição dos agregados miúdo ou graúdo pelos reciclados devem ser informados na escala de 0 (0%) a 1 (100%), enquanto que a relação água/cimento está expressa na escala usual, variando de 0,4 a 0,8. Convém salientar que o somatório dos percentuais de substituição dos agregados naturais pelo reciclados devem ser no máximo igual a 1 (100%), para cada tipo de agregado (graúdo e miúdo).

$$\begin{aligned} f_c = \left( \frac{102,43}{5,38^{a/c}} \right) [1 - (0,338.rag + 0,152.ram + 0,275.rcg + 0,067.rcm + \\ + 0,371.rvg - 0,138.rvm)] \end{aligned} \quad (6.4)$$

Conforme a Equação 6.4, a substituição do agregado natural pelo reciclado resulta em uma redução da resistência, exceto no caso do uso do agregado miúdo reciclado de cerâmica vermelha, que proporciona um pequeno acréscimo na mesma.

De posse do modelo descrito na Equação 6.4, geraram-se alguns gráficos que ilustram a influência de cada tipo de agregado reciclado, para os teores de substituição de 0, 50 e 100%, para as relações água/cimento intermediárias, ou seja, 0,46, 0,6 e 0,74. Em função dos valores obtidos para se gerar os gráficos, montou-se uma tabela com as perdas e ganhos de resistência para cada caso. Os gráficos e a tabela encontram-se dispostos nas Figuras 6.2, 6.3 e 6.4 e na Tabela 6.3.

Através dos gráficos das Figuras 6.2 a 6.4, pode-se observar a influência da relação água/cimento sobre o desempenho da resistência à compressão dos concretos, uma vez que para os mesmos teores de substituição, as resistências dos concretos de baixa relação água/cimento são superiores que as resistências dos concretos de alta relação água/cimento. Conforme os dados da Tabela 6.3, ao se passar a relação água/cimento de 0,46 para 0,60, a resistência à compressão é reduzida em 21%, enquanto que ao passá-la de 0,46 para 0,74, esta é diminuída em 38%.

Este resultado é bastante coerente com o apresentado por LIN et al. (2004), que utilizando também o projeto de experimentos, encontrou a relação água/cimento como o fator que mais influi no comportamento da resistência à compressão dos concretos com agregados reciclados.

Quanto maior a relação água/cimento, maior será a probabilidade da formação de um filme de água sobre a superfície dos agregados e, com a formação desse filme, mais fraca será a zona de transição. Além disso, quanto maior a relação água/cimento, maior será a porosidade total do concreto, e conseqüentemente, menos resistente o concreto será (OTSUKI et al., 2003).

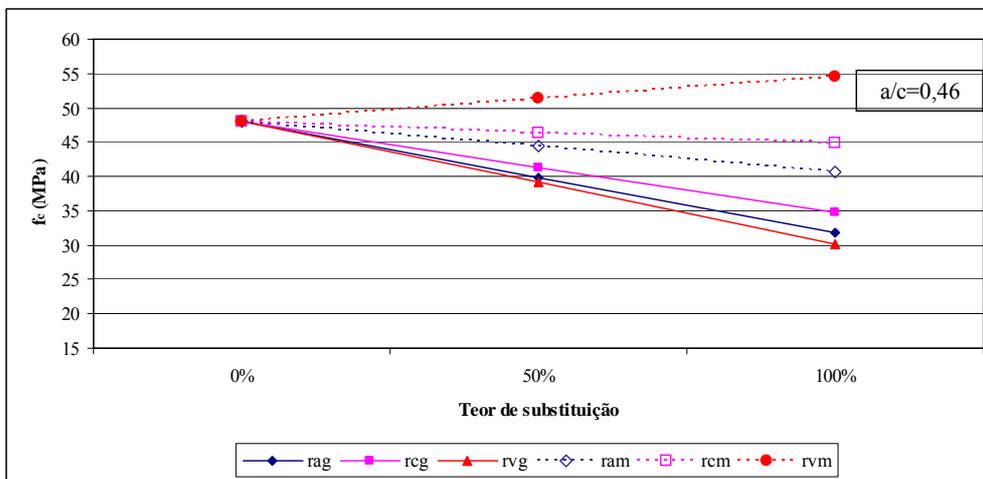


Figura 6.2 Comportamento da resistência à compressão em função dos teores de substituição do agregado natural pelo reciclado para a relação água/cimento igual a 0,46

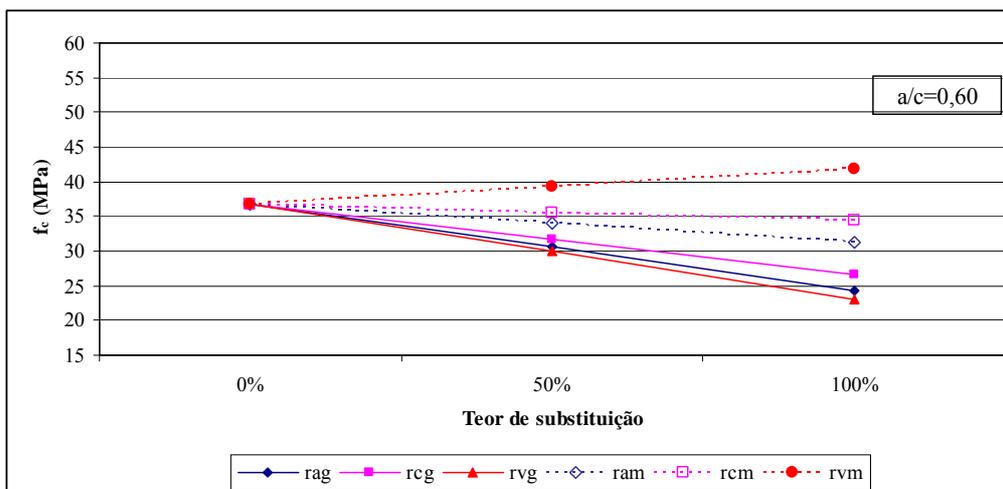


Figura 6.3 Comportamento da resistência à compressão em função dos teores de substituição do agregado natural pelo reciclado para a relação água/cimento igual a 0,60

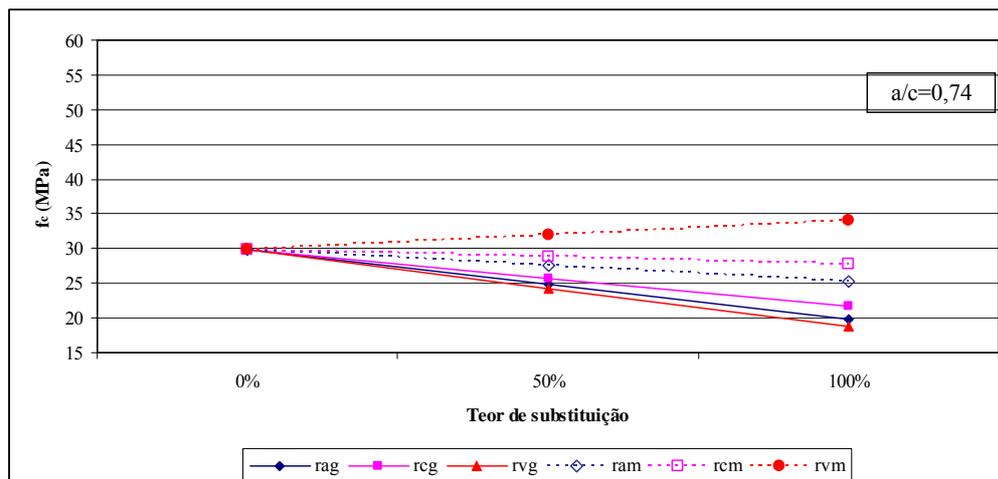


Figura 6.4 Comportamento da resistência à compressão em função dos teores de substituição do agregado natural pelo reciclado para a relação água/cimento igual a 0,74

Tabela 6.3 Desempenho da resistência à compressão dos concretos quando feita a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado

Teor de substituição	Tipo de agregado reciclado					
	rag	rcg	rvg	ram	rcm	rvm
0%	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
50%	0,83	0,86	0,81	0,92	0,97	1,07
100%	0,66	0,72	0,63	0,85	0,93	1,14
Relação água/cimento						
0,46		0,60		0,74		
1,00		0,79		0,62		

Observa-se também que a substituição do agregado graúdo produz um efeito maior do que a substituição do agregado miúdo, em função da magnitude dos coeficientes dos mesmos, conforme pode ser observado na Equação 6.4. Para os agregados miúdos, a maior redução observada para 100% de substituição foi de 15%, para o reciclado de argamassa, enquanto que para os agregados graúdos reciclados, o agregado que exerceu a menor influência foi o reciclado de concreto, tendo ainda assim uma perda de 28% na resistência, para 100% de substituição.

Tais resultados estão coerentes com os apresentados por RAVINDRARAJAH e TAM (1987a), embora estes tenham realizados experimentos exclusivamente em agregados reciclados de concreto. LEITE (2001) e VIEIRA (2003) encontraram também uma menor influência dos agregados miúdos reciclados no desempenho da resistência à compressão dos concretos com agregados reciclados quando comparados com a influência dos agregados graúdos.

Segundo o modelo obtido, tanto os agregados miúdos reciclados de argamassa quanto os de concreto exercem pouca influência no desempenho dos concretos, apresentando uma redução de apenas 8% e 3%, respectivamente, para 50% de substituição, e de 15% e 7%, respectivamente, para 100% de substituição dos agregados naturais pelos respectivos reciclados.

No caso do agregado miúdo reciclado de concreto, este resultado é bastante coerente com o apresentado por RAVINDRARAJAH e TAM (1987b), que encontraram resistências à compressão praticamente idênticas para os concretos com 100% de agregado reciclado miúdo de concreto. HANSEN (1992) cita RASHEEDUZZAFAR e KHAN (1984), que também não encontraram diferenças significativas na resistência à compressão dos concretos ao substituírem o agregado miúdo natural pelo reciclado de concreto. Entretanto, este mesmo autor cita vários outros pesquisadores que estão em desacordo com estes resultados, uma vez que segundo eles, o agregado miúdo reciclado de concreto exerce uma sensível influência negativa sobre a resistência à compressão. Um possível motivo para estes resultados discordantes pode ser o método utilizado por estes pesquisadores, que talvez só acrescentaram água para se chegar à trabalhabilidade desejada, reduzindo assim a relação  $a/c$ , e conseqüentemente a resistência à compressão.

É observado um incremento na resistência à compressão quando se substitui o agregado miúdo natural pelo miúdo reciclado de cerâmica vermelha, chegando a 7%, para 50% de substituição, e 14%, para 100% de substituição. Alguns autores, como LEITE (2001), VIEIRA (2003) e KHATIB (2005), também apontam incrementos na resistência à compressão quando se utilizam agregados miúdos que contenham reciclados de cerâmica vermelha.

O acréscimo na resistência, quando se usa o agregado de cerâmica vermelha, pode ser explicado devido às reações pozolânicas que ocorrem, melhorando a matriz e a zona de transição entre a pasta e o agregado, e conseqüentemente melhorando as propriedades mecânicas de concretos e argamassas produzidas com este tipo de agregado miúdo reciclado. (SCHULZ e HENDRICKS, 1992; LEITE, 2001; KHATIB, 2005).

LEITE (2001) avaliou a atividade pozolânica do material cerâmico presente no agregado miúdo reciclado do resíduo de construção e demolição utilizado, encontrando índices que confirmam a atividade pozolânica. Exemplificando o efeito pozolânico proporcionado pelos agregados reciclados de cerâmica vermelha, SHULZ e HENDRICKS (1992) citam acréscimos de 30 a 40% na resistência à compressão

medida aos 90 dias, quando comparada à medida aos 28 dias, em concretos que utilizaram este tipo de agregado.

Uma outra justificativa seria que, em função da elevada absorção dos agregados reciclados, há absorção de pasta e precipitação de cristais de hidratação nos poros do agregado, propiciando uma maior aderência entre a pasta e o agregado, melhorando assim a resistência à compressão desses concretos (VIEIRA, 2003). Além disso, no caso de os agregados reciclados terem sido submetidos a algum processo de pré-absorção, a água absorvida pelos agregados, com o passar do tempo de mistura, torna-se disponível para a hidratação de partículas remanescentes de cimento que não foram hidratadas. Essa hidratação adicional ocorre na zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento, aumentando assim a ligação entre a matriz de cimento e os agregados (KHALAF e DeVEENY, 2004a).

Já KHALOO (1994) explica que esse aumento de resistência ocorre devido à superfície áspera do agregado reciclado de cerâmica que fornece uma melhor ligação entre a matriz de cimento e os agregados reciclados.

Resultados dos ensaios de LEVY (2001) apontam que a absorção de água e o índice de vazios nos concretos produzidos com agregados miúdos reciclados de cerâmica vermelha são menores que os dos concretos produzidos com agregados miúdos reciclados de concreto, ratificando que os primeiros possuem uma estrutura de poros mais fechada, propiciando assim o alcance de maiores resistências.

Entretanto, de acordo com os dados da Tabela 6.3, para a substituição do agregado gráudo natural pelo agregado gráudo reciclado de cerâmica vermelha, tem-se o pior resultado, dentre todos. Segundo o modelo desenvolvido, esta substituição acarreta numa perda de resistência de 19%, para o teor de 50% de substituição, e de 38%, para 100% de substituição. Tais valores de redução são bastante coerentes aos encontrados por BRITO et al. (2005), que obtiveram reduções na resistência à compressão de concretos com substituição do agregado gráudo natural pelo agregado gráudo reciclado de cerâmica vermelha, nos teores de 33%, 66% e 100%, da ordem de 22%, 24% e 44%, respectivamente.

Este comportamento pode ser explicado em função da forma do agregado, que é mais angular, não propiciando uma eficiente mistura, produzindo assim concretos com uma maior quantidade de vazios, mesmo tendo a mesma distribuição granulométrica dos demais (ILLSTON, 1992, citado por KHALAF e DeVENNY, 2004). Além disso, este tipo de agregado normalmente tem uma resistência mecânica inferior à do agregado

natural, o que contribui para que a resistência dos concretos confeccionados com o mesmo seja menor que a resistência dos concretos convencionais, quando se produz concretos em que a resistência da matriz é superior à resistência dos agregados (SCHULZ e HENDRICKS, 1992).

O concreto com agregado graúdo reciclado que obteve um melhor desempenho quanto à resistência à compressão foi o concreto com o reciclado de concreto, muito embora este ainda tenha apresentado uma redução de 14%, para 50% de substituição, e de 28%, para 100% de substituição (ver Tabela 6.3).

Novamente pode-se utilizar os resultados de LEVY (2001) para justificar tais comportamentos, uma vez que estes apontam que a absorção de água e o índice de vazios nos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de cerâmica vermelha são maiores que os dos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto, ou seja, a estrutura e a distribuição de poros no primeiro não favorece o alcance de resistências superiores às do segundo.

Devido à considerável queda na resistência à compressão dos concretos com substituição dos agregados graúdos naturais pelos reciclados de concreto, alguns autores (LEVY, 2001; BAIRAGI et al., 1993; TOPÇU, 1997; LIMBACHIYA et al., 2000; HANSEN, 1992) recomendam um teor máximo de substituição que varia entre 20 e 50%.

Os resultados apresentados pela *Building Contractors Society of Japan* (1978), citados por LAMOND et al. (2002), indicam que a substituição conjunta dos agregados graúdos e miúdos naturais por agregados reciclados de concreto reduzem ainda mais a resistência à compressão dos concretos com estes produzidos. No estudo em questão, os agregados naturais foram substituídos por reciclados de concreto, atingindo perdas que variaram de 20 até 40% na resistência à compressão, chegando a valores bastante semelhantes aos projetados pelo modelo desenvolvido, o qual estima uma perda de 35%.

### 6.2.2 Módulo de deformação

O mesmo procedimento utilizado para a construção do modelo da resistência à compressão foi adotado na construção do modelo do módulo de deformação. O modelo determinado para representar a propriedade do concreto em estudo está descrito na Equação 6.5.

$$E_c = \left( \frac{21,69}{a/c^{0,5}} \right) [1 - (\% \text{substituído})] \quad (6.5)$$

O primeiro termo entre parênteses refere-se ao módulo de deformação do concreto com agregados naturais e é função somente da relação água/cimento. Este termo foi definido previamente, a partir de uma análise dos valores obtidos para a resistência quando a relação água/cimento foi igual a 0,46, 0,60 e 0,74, sendo este estabelecido de forma a gerar o melhor ajuste possível, ou seja, minimizar os erros de previsão.

O segundo termo,  $[1 - (\% \text{ substituído})]$ , define um percentual a ser aplicado sobre o módulo original, geralmente reduzindo-o em função da substituição do agregado natural pelo reciclado. Essa modificação do módulo é, então, função do percentual de agregado natural substituído pelo agregado reciclado e está representado na Equação 6.6.

$$\text{Modificação do módulo} = f(\% \text{ substituído}) \quad (6.6)$$

Similarmente ao que foi feito para a modificação da resistência, fez-se para a modificação do módulo uma regressão múltipla, utilizando-a como variável de resposta, e os percentuais dos agregados naturais substituídos pelos agregados reciclados como variáveis dependentes. O resultado aponta que todas as variáveis dependentes utilizadas exercem efeito significativo sobre a modificação do módulo dos concretos com agregado reciclado. O resultado da análise dessa regressão múltipla encontra-se no Anexo H.

O modelo encontrado que exprime a modificação do módulo em função da substituição do agregado natural pelo reciclado possui um excelente coeficiente de determinação ( $R^2=99,6\%$ ), estando o modelo expresso na Equação 6.7.

$$\begin{aligned} \text{Modificação do módulo} = & 0,352.rag + 0,158.ram + 0,231.rcg + \\ & + 0,110.rcm + 0,440.rvg + 0,113.rvm \end{aligned} \quad (6.7)$$

De acordo com o modelo apresentado, a substituição do agregado natural pelo reciclado resulta em uma redução do módulo de deformação. Similarmente ao modelo da modificação da resistência anteriormente apresentado, observa-se também que a substituição do agregado graúdo produz um efeito maior sobre o módulo de deformação do que a substituição do agregado miúdo, como se pode observar em função da magnitude dos coeficientes dos mesmos.

Neste modelo, a tentativa de inserir termos quadrados (como *ram.ram*, por exemplo) ou interações (como *ram.rag*, por exemplo) também não melhorou o ajuste, sendo portanto, estes termos mais complexos, deixados de fora.

Então, o modelo final de regressão linear que estima o módulo de deformação em função do percentual de substituição dos agregados naturais pelos reciclados e da relação água/cimento é o expresso na Equação 6.8.

$$E_c = \left( \frac{21,69}{a/c^{0,5}} \right) [1 - (0,352.rag + 0,158.ram + 0,231.rvg + 0,110.rvm + 0,440.rvg + 0,113.rvm)] \quad (6.8)$$

Nesse modelo, os percentuais de substituição dos agregados miúdo ou graúdo pelos reciclados devem ser informados na escala de 0 (0%) a 1 (100%), enquanto que a relação água/cimento está expressa na escala usual, variando de 0,4 a 0,8. Convém salientar que o somatório dos percentuais de substituição dos agregados naturais pelo reciclados devem ser no máximo igual a 1 (100%), para cada tipo de agregado (graúdo e miúdo).

De acordo com o modelo apresentado, a substituição do agregado natural pelo reciclado resulta em uma redução do módulo de deformação para todos os tipos de agregado, conforme Equação 6.8.

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), o módulo de deformação do concreto depende da fração volumétrica, da massa específica e do módulo de deformação dos seus principais constituintes (matriz e agregados) e das características da zona de transição. Como a massa específica é inversamente proporcional à porosidade, fatores que afetam a porosidade do agregado, da matriz e da zona de transição afetam também a o módulo de deformação do concreto.

Ainda segundo estes últimos autores, o módulo de deformação do agregado graúdo também está ligado à sua porosidade e, em grau um pouco menor, ao diâmetro máximo do agregado, forma, textura, granulometria e composição mineralógica. Portanto, a rigidez do agregado controla a capacidade de restrição da deformação da matriz e esta rigidez é determinada pela porosidade do agregado.

Por conseguinte, uma vez substituídos os agregados naturais pelos reciclados, todas essas características anteriormente citadas do concreto são modificadas, e consequentemente, o seu módulo de deformação.

Então, ao se substituir os agregados miúdos naturais pelos miúdos reciclados, alterações são introduzidas nas propriedades da argamassa do concreto, e ao se

substituir os grãos naturais pelos grãos reciclados, as características de deformabilidade do concreto como um todo são modificadas, uma vez que como o agregado grão restringe as deformações do mesmo, ao se introduzir o agregado grão reciclado, que geralmente é mais deformável que o grão natural, o concreto torna-se mais deformável.

Convém salientar que no experimento realizado, os agregados miúdos e grãos reciclados utilizados possuíam a mesma distribuição granulométrica dos agregados miúdos e grãos naturais, respectivamente, conforme item 5.2.2.2, ou seja, as interferências causadas nos concretos com eles produzidos seriam oriundas de características intrínsecas aos mesmos, como a forma do agregado reciclado, que por ser lamelar, produz uma maior quantidade de poros no concreto que os agregados naturais.

De posse do modelo expresso na Equação 6.8, gerou-se alguns gráficos que ilustram a influência de cada tipo de agregado reciclado, para os teores de substituição de 0, 50 e 100%, para as relações água/cimento intermediárias, ou seja, 0,46, 0,6 e 0,74. Em função dos valores obtidos para se gerar os gráficos, montou-se uma tabela com as perdas do módulo para cada caso. Os gráficos e a tabela encontram-se dispostos nas Figuras 6.5, 6.6 e 6.7 e na Tabela 6.4.

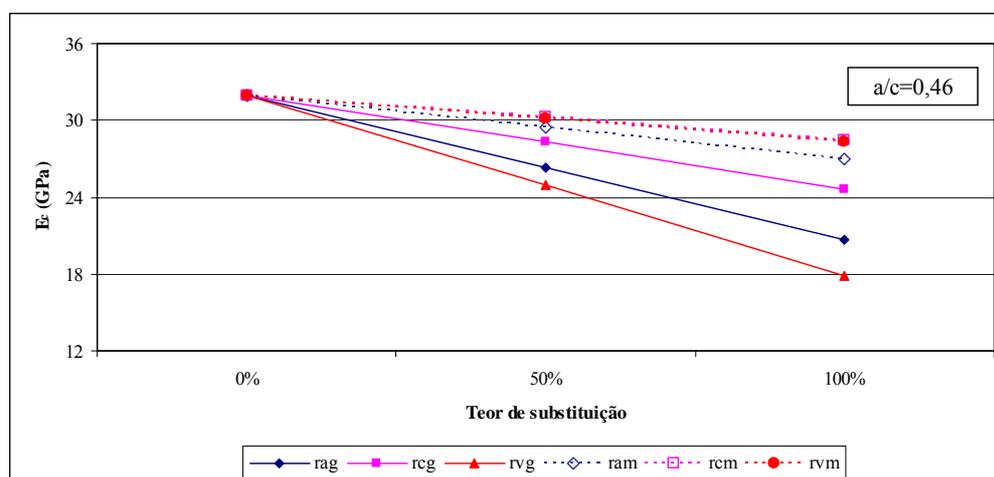


Figura 6.5 Comportamento do módulo de deformação em função dos teores de substituição do agregado natural pelo reciclado para a relação água/cimento igual a 0,46

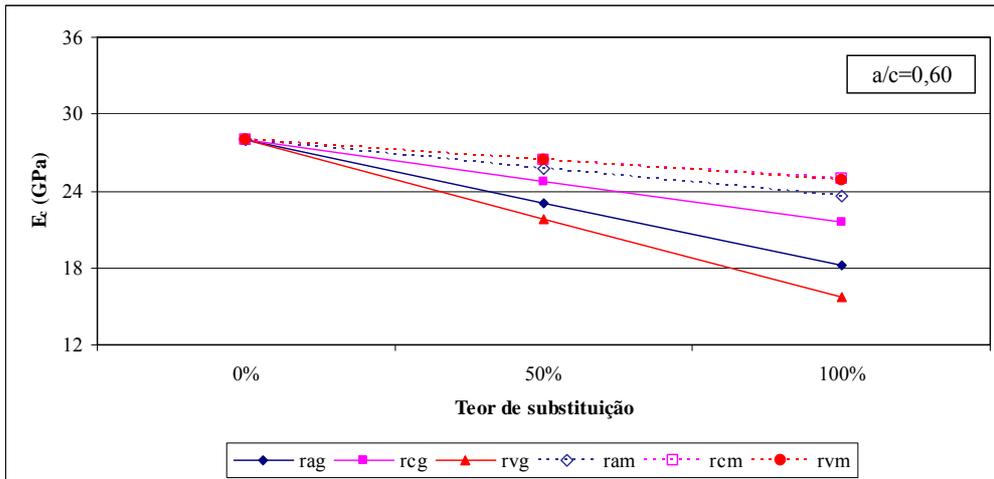


Figura 6.6 Comportamento do módulo de deformação em função dos teores de substituição do agregado natural pelo reciclado para a relação água/cimento igual a 0,60

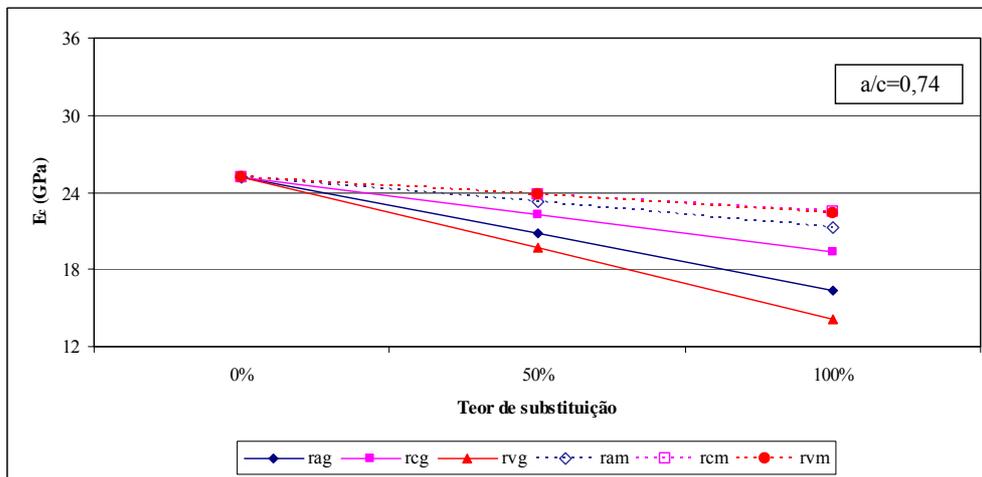


Figura 6.7 Comportamento do módulo de deformação em função dos teores de substituição do agregado natural pelo reciclado para a relação água/cimento igual a 0,74

Tabela 6.4 Desempenho do módulo de deformação dos concretos quando feito a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado

Teor de substituição	Tipo de agregado reciclado					
	rag	rcg	rvg	ram	rcm	rvm
0%	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
50%	0,82	0,88	0,78	0,92	0,95	0,94
100%	0,65	0,77	0,56	0,84	0,89	0,89
Relação água/cimento						
0,46		0,60		0,74		
1,00		0,88		0,79		

Através das Figuras 6.5 a 6.7, pode-se observar a influência da relação água/cimento sobre o desempenho do módulo de deformação dos concretos. Observa-se

que quanto maior a relação água/cimento, mais deformável (menor módulo) é o concreto produzido, conforme esperado. De acordo com os dados da Tabela 6.4, os concretos de relação água/cimento de 0,60 e 0,74 possuem módulos 12% e 21% menores, respectivamente, que o módulo do concreto de relação água/cimento 0,46.

Ao se comparar o desempenho do módulo de deformação dos concretos feitos com agregados reciclados com a absorção de água e a massa específica dos respectivos agregados (item 5.2.2.3), observa-se que há certa correlação entre a perda no módulo de deformação dos concretos com eles produzidos e essas características desses agregados. Então parece que a perda no módulo dos concretos está diretamente relacionada com a porosidade do agregado utilizado.

Analisando os resultados compilados na Tabela 6.4, ratifica-se também a menor influência dos agregados miúdos reciclados sobre o módulo de deformação dos concretos. Tal comportamento foi semelhantemente encontrado por LEITE (2001) em sua pesquisa com concretos com agregados reciclados. Houve também coerência com os resultados de RAVINDRARAJAH e TAM (1987b) que encontraram uma redução de 13% para os concretos substituindo somente o agregado miúdo natural pelo miúdo reciclado de concreto. Em outro trabalho dos mesmos autores (RAVINDRARAJAH e TAM, 1985), substituindo agora os agregados graúdos naturais pelos graúdos reciclados de concreto, a redução do módulo se deu em torno de 25%. Segundo o modelo encontrado, essas reduções são da ordem de 11% e 23%, respectivamente, confirmando então que o módulo de deformação é mais sensível a intervenções no agregado graúdo do que no miúdo.

Ao se analisar os resultados para os agregados miúdos reciclados, os concretos confeccionados comportaram-se de forma mais homogênea que os produzidos com os agregados graúdos reciclados, uma vez que as perdas no módulo de deformação apresentadas foram de 8%, 5% e 6%, para os concretos com 50% de substituição dos agregados miúdos naturais pelos reciclados de argamassa, de concreto e de cerâmica vermelha, respectivamente. Para 100% de substituição, a perda no módulo de deformação foi de 16%, 11% e 11%, respectivamente.

Essa maior perda no módulo de deformação propiciada pelo agregado miúdo reciclado de argamassa conduz à confecção de concretos mais deformáveis. Essas maiores deformações são possivelmente causadas pelo grande teor de pasta que estes agregados contêm. Já os agregados miúdos reciclados de concreto, por conterem em sua composição algum teor a mais de rocha natural, conforme pode ser constatado segundo

os resultados das difrações de raio X (ver item 5.2.2.1), fazem com que os concretos confeccionados com os mesmos apresentem menores deformações, ou seja, maiores módulos, que os concretos produzidos com os reciclados miúdos de argamassa. O agregado miúdo reciclado de cerâmica vermelha parece que provoca um melhor empacotamento no concreto produzido, além de um possível efeito pozolânico, elevando a resistência à compressão (como visto no item anterior) e, conseqüentemente, não apresentando uma grande perda no módulo.

Coerentemente com os resultados expostos, LEVY (2001) também obteve uma perda no módulo de deformação dos concretos com 100% de agregados miúdos reciclados de cerâmica vermelha, no valor médio de 12,3%, portanto bastante próximo ao valor sugerido pelo modelo desenvolvido (11%). Ainda segundo este último autor, esta perda foi inferior à apresentada pelo concreto produzido com o agregado miúdo reciclado de concreto.

Dentre os agregados graúdos reciclados, o agregado graúdo de cerâmica vermelha exerce a maior influência sobre o módulo de deformação do concreto com ele confeccionado, alcançando uma perda de 22% no valor do módulo, para o teor de substituição de 50%, e de 44%, para 100% de substituição. Esta maior influência do agregado graúdo reciclado de cerâmica vermelha sobre o módulo também foi encontrada por LEVY (2001), sendo que a perda média encontrada pelo mesmo para o concreto com 100% de agregado graúdo reciclado de cerâmica vermelha foi de 28%. Essa diferença encontrada no valor da redução pode ser explicada em função da grande quantidade de variáveis que interferem nos resultados, tais como a forma, a granulometria e a qualidade do agregado reciclado, bem como a maneira que é feita a substituição.

Os resultados encontrados por RILEM (1994) e HANSEN (1992) apontam que o módulo de deformação de concretos feitos com agregados graúdos reciclados de cerâmica vermelha atinge somente de 50% a 66% do módulo de concretos com agregados naturais de mesma resistência, ou seja, têm uma perda de 44 a 50% no módulo de deformação, sendo tais valores próximos ao sugerido pelo modelo proposto.

Considerando as características dos agregados graúdos reciclados, pode-se explicar o comportamento dos concretos confeccionados com os mesmos, quanto à diminuição do módulo de deformação. Conforme resultados apresentados nos itens 5.2.2.4 e 5.2.2.3, o agregado graúdo de cerâmica vermelha possui a menor massa específica e a maior absorção de água, respectivamente, portanto este parece ser o

agregado mais poroso, e conseqüentemente, o mais deformável. Já o agregado graúdo reciclado de concreto, que apresentou a maior massa específica e a menor absorção dentre os agregados graúdos reciclados, exerce a menor influência sobre o módulo de deformação, dentre os concretos feitos com os agregados graúdos reciclados. Entretanto, ainda assim, este apresentou uma perda de 12%, para o teor de substituição de 50%, e de 23%, para 100% de substituição.

Alguns trabalhos como os de FRONDISTOU-YANNAS (1977), citado por KHALAF e DeVEENY (2004), de HANSEN e BØEGH (1985) e de XIAO et al. (2005) apresentam módulos de deformação de concretos feitos com agregados graúdos reciclados de concreto de 15 a 45% menores que os módulos dos concretos convencionais.

O concreto com agregado graúdo reciclado de argamassa apresentou um desempenho intermediário entre os confeccionados com os demais agregados graúdos reciclados, mostrando perdas de 18% no valor do módulo para 50% de substituição, e 35% para 100% de substituição.

Nos experimentos de HANSEN e BØEGH (1985), produzindo concretos com agregados graúdos reciclados de argamassa, os módulos dos mesmos foram 45% inferiores ao módulo do concreto de referência.

Essa menor interferência do agregado graúdo reciclado de concreto pode ser em função da grande presença dos agregados naturais em sua composição, pois segundo HANSEN e NARUD (1983), o teor de brita nos agregados graúdos reciclados de concreto está em torno de 60% do volume do mesmo.

Já o agregado reciclado de argamassa, por não possuir o agregado natural, mostra-se mais deformável, contribuindo assim para que os concretos confeccionados com os mesmos apresentem um menor módulo. Novamente, os resultados das difrações de raio X comprovam essa maior presença dos agregados naturais nos agregados reciclados de concreto que nos agregados reciclados de argamassa (ver item 5.2.2.1).

Ainda segundo os últimos autores, a maior deformação apresentada pelos concretos com agregados reciclados de concreto quando comparados com os concretos com agregados naturais é função da substituição desses 40% de agregados naturais por argamassas oriundas da britagem dos concretos, que são mais deformáveis.

Os resultados encontrados estão em concordância com os encontrados por HANSEN e BØEGH (1985), que também substituíram o agregado graúdo natural pelo

agregado graúdo reciclado de concreto e de argamassa, encontrando um módulo de deformação em torno de 19% e 45%, respectivamente, menores que o do concreto com agregados naturais.

Segundo o modelo encontrado, quando substituídos conjuntamente, os agregados miúdos e graúdos reciclados potencializam o efeito redutor no módulo de deformação dos concretos. Tal comportamento é coerente com os resultados de diversas pesquisas apresentados por HANSEN (1986), especificamente para concretos com agregados graúdos reciclados de concreto, onde segundo este autor, somente a substituição do agregado graúdo natural pelo agregado graúdo reciclado de concreto acarretou numa diminuição do módulo de 10 a 30% e a substituição dos agregados graúdo e miúdo natural pelos agregados reciclados de concreto levou a uma redução de 25 a 40% do módulo. Segundo o modelo proposto, essas reduções seriam de 23% e 34%, respectivamente.

Resultados bastante semelhantes foram encontrados pela *Building Contractors Society of Japan* (1978), citados por LAMOND et al. (2002), onde a substituição do agregado graúdo natural pelo graúdo reciclado de concreto diminuiu o módulo de 10 a 33% e a substituição conjunta dos agregados naturais pelos reciclados de concreto também reduziram o módulo de 25 a 40%.

Já os agregados miúdos e graúdos de cerâmica vermelha, quando substituídos conjuntamente, proporcionam, segundo o modelo obtido, uma redução de 55% no módulo de deformação sendo que tais resultados são bastante próximos aos referenciados por SHULZ e HENDRICKS (1992), uma vez que o mesmo aponta perdas de 50 a 57%.

### 6.2.3 Correlação entre a resistência à compressão e o módulo de deformação

De posse dos modelos que predizem a resistência à compressão (Equação 6.4) e o módulo de deformação (Equação 6.8) dos concretos com agregados reciclados, determinou-se a correlação entre essas duas variáveis, para os concretos com relações água/cimento igual a 0,46, 0,60 e 0,74 e teores de substituição dos agregados naturais pelos reciclados nos valores de 0, 50 e 100%. Determinou-se também essa correlação para os concretos com agregados naturais. Pode-se observar, através da Figura 6.8, a correlação entre essas duas variáveis, para os concretos com agregados reciclados e naturais.

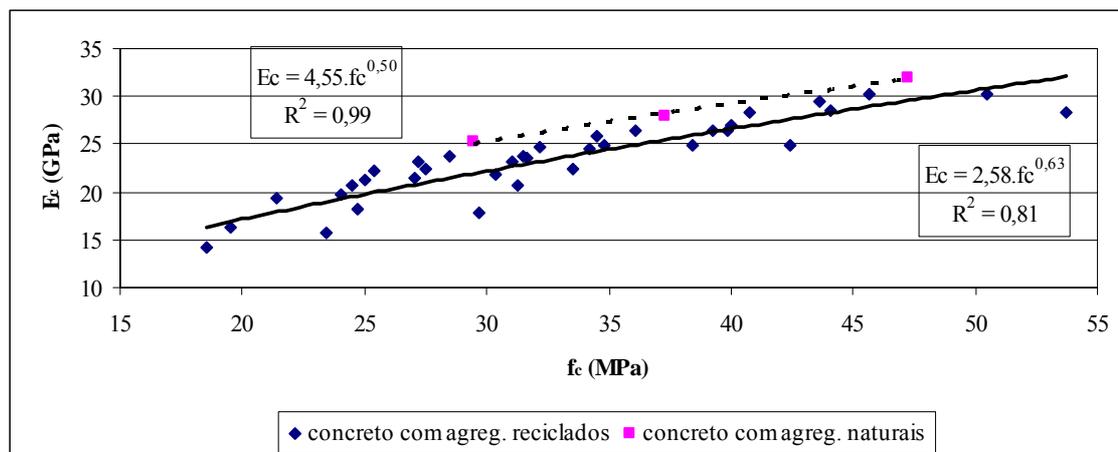


Figura 6.8 Correlação entre a resistência à compressão e o módulo de deformação dos concretos com agregados reciclados e naturais

Como pode-se observar, de acordo com os dados da Figura 6.8, para um mesmo nível de resistência à compressão, os concretos com agregados reciclados apresentam módulos de deformação menores que os concretos com agregados naturais. Isso ocorre porque, em geral, o agregado reciclado de RCD é mais deformável que o agregado natural, principalmente devido à matriz de cimento que é constantemente presente no mesmo (HANSEN e BØEGH, 1985; HANSEN, 1986; NAGATAKI et al., 2000), fazendo assim que o concreto produzido com os agregados reciclados seja mais deformável que o concreto produzido com os agregados naturais.

Essa redução no módulo de deformação para um mesmo nível de resistência à compressão é também expressa nas equações que modelam o comportamento dos concretos com agregados naturais e reciclados, conforme pode-se observar nas Equações 6.9 e 6.10, respectivamente, as quais apresentaram coeficientes de determinação de 99% e 81%, respectivamente.

$$E_c = 4,55 \cdot f_c^{0,50} \quad (6.9)$$

$$E_c = 2,58 \cdot f_c^{0,63} \quad (6.10)$$

A Equação 6.9, obtida para o concreto com agregados naturais, muito se assemelha com a sugerida pela *NBR 6118:2003 – Projeto de estruturas de concreto – procedimento*, a qual está explicitada na Equação 6.11, apresentando portanto coerência nos resultados.

$$E_c = 0,85 \times 5,6 \times f_c^{0,50} \rightarrow E_c = 4,76 \cdot f_c^{0,50} \quad (6.11)$$

Diversos autores (RAVINDRARAJAH et al., 2000; NAGATAKI et al., 2000; RAVINDRARAJAH e TAM, 1985; AKHTARUZZAMAN e HASNAT, 1983) apresentam formulações matemáticas que correlacionam o módulo de deformação com a resistência à compressão dos concretos com agregados reciclados. BAIRAGI et al. (1993) vão mais além, correlacionando essas duas propriedades com o teor de substituição dos agregados reciclados. A Tabela 6.5 mostra as equações propostas por esses autores, podendo-se observar que todas as equações possuem o formato  $E_c = \alpha \cdot f_c^\beta + \gamma$ , formato este semelhante ao da equação encontrada, conforme Equação 6.10.

Tabela 6.5 Equações que correlacionam o módulo de deformação com a resistência à compressão dos concretos com agregados reciclados.

Autor	Equação	Tipo de agregado utilizado
RAVINDRARAJAH et al. (2000)	$E_c = 5,31 \cdot f_c^{0,5} + 5,38$	natural
	$E_c = 7,77 \cdot f_c^{0,33}$	gráúdo reciclado de concreto
	$E_c = 3,48 \cdot f_c^{0,5} + 13,1$	gráúdo reciclado de concreto
	$E_c = 3,02 \cdot f_c^{0,5} + 10,7$	gráúdo e miúdo reciclado de concreto
RAVINDRARAJAH e TAM (1985)	$E_c = 4,63 \cdot f_c^{0,5}$	gráúdo reciclado de concreto
AKHTARUZZAMAN e HASNAT (1983)	$E_c = 8,3 \cdot f_c^{0,5}$	gráúdo reciclado de cerâmica vermelha
NAGATAKI et al. (2000)	$E_c = \alpha \cdot f_c^{0,3}$	gráúdo reciclado de concreto
BAIRAGI et al. (1993)	$E_c = (5,78 - 1,34 \cdot r) \cdot f_c^{0,27}$ , onde $r$ é o teor de agregado reciclado	gráúdo reciclado de concreto
LEITE (2001)	$E_c = -3,48 + 4,63 \cdot f_c^{0,5}$	gráúdo e miúdo reciclado de RCD
LOVATO (2007)	$E_c = 5,74 \cdot f_c^{0,5} - 13,39$	gráúdo e miúdo reciclado de RCD

#### 6.2.4 Retração por secagem

De posse dos dados coletados, tentou-se modelar o comportamento da retração por secagem, para as idades de 56 e 224 dias, utilizando-se uma análise de regressão múltipla, testando a significância de todas as variáveis independentes para essa propriedade, nessas idades.

Entretanto, para a idade de 56 dias, observou-se uma excessiva variabilidade dos resultados obtidos, dificultando a identificação do efeito exercido pelas diversas variáveis (ver Anexo H). O modelo obtido para essa idade apresentou somente 4 das 7

variáveis como termos significativos (*a/c*, *rag*, *rcg* e *rvg*), em função dessa grande variabilidade, além de apresentar um baixo coeficiente de determinação ( $R^2=32,5\%$ ).

Já para a idade de 224 dias, apesar do modelo construído ainda apresentar grande variabilidade, houve a inserção de todas as outras variáveis no mesmo. Para este caso, foram testados dois tipos de análises, a análise linear e não linear, as quais também encontram-se descritas no Anexo H, tendo-se obtido para ambas um coeficiente de determinação bastante similar, da ordem de 42,1%, ou seja, os modelos explicam somente 42,1% dos efeitos dos agregados reciclados na retração por secagem. O modelo não linear foi o escolhido para estimar os valores da retração por secagem conforme expressado na Equação 6.12.

$$\varepsilon_{224} = (796.a/c^{0,5}).(1+0,232.rcg+0,432.rvg+0,351.rag).(1+0,687.rcm + 0,412.rvm + 0,567.ram) \quad (6.12)$$

Nesse modelo, o primeiro termo modela o efeito da relação água/cimento, conforme observado em concretos sem nenhuma adição de material reciclado. O segundo termo modela o efeito da adição de material reciclado graúdo e o terceiro termo, o efeito da adição de material reciclado miúdo. Uma vez que os fatores estão todos codificados na mesma faixa (0 a 1) e os coeficientes associados à adição de material reciclado miúdo são maiores, pode-se dizer que a adição de material reciclado miúdo provoca um efeito mais forte que a adição de material reciclado graúdo.

Para o modelo proposto, os valores de retração são dados da ordem de  $10^{-6}$ , em valores positivos, o que indica que quanto maior o valor absoluto encontrado, maior o valor da retração apresentada pelo concreto. Portanto, o efeito mais pronunciado está associado ao *rcm* (agregado miúdo reciclado de concreto) e o menor efeito, ao *rcg* (agregado graúdo reciclado de concreto) em função da magnitude dos seus coeficientes.

Conforme o modelo, a substituição de material reciclado implicou maior retração em todos os casos. A tentativa de inserir termos quadrados, como *ram.ram*, ou interações, como *ram.rag*, não melhorou o ajuste, portanto esses termos mais complexos foram deixados de fora.

Como a retração por secagem é uma propriedade onde a variável “tempo” exerce grande influência em seu comportamento (ver Figura 6.1) e a mesma tende a se estabilizar a idades mais avançadas, o modelo encontrado para a idade de 56 dias não foi satisfatório e portanto não foi discutido, tendo-se concentrado as discussões no comportamento da retração aos 224 dias, onde a mesma já tinha se estabilizado.

De posse do modelo apresentado na Equação 6.12, o qual descreve o comportamento da retração por secagem para os 224 dias, gerou-se alguns gráficos que ilustram a influência de cada tipo de agregado reciclado para esta propriedade, para os teores de substituição de 0, 50 e 100% e para as relações água/cimento de 0,4, 0,6 e 0,74. Montou-se também uma tabela com os aumentos e diminuições da retração para cada caso, sendo que esses gráficos e a tabela encontram-se dispostos nas Figuras 6.9, 6.10 e 6.11 e na Tabela 6.6.

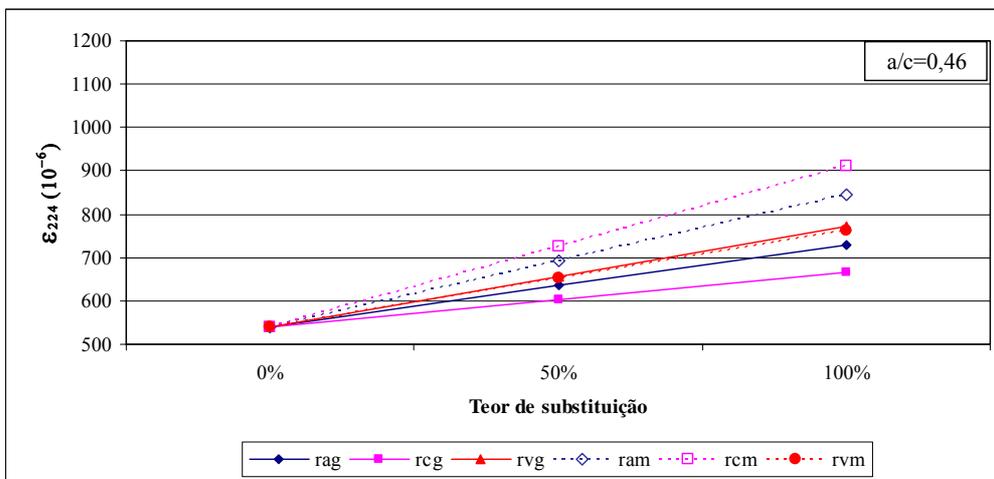


Figura 6.9 Comportamento da retração por secagem em função dos teores de substituição do agregado natural pelo reciclado para a relação água/cimento igual a 0,46

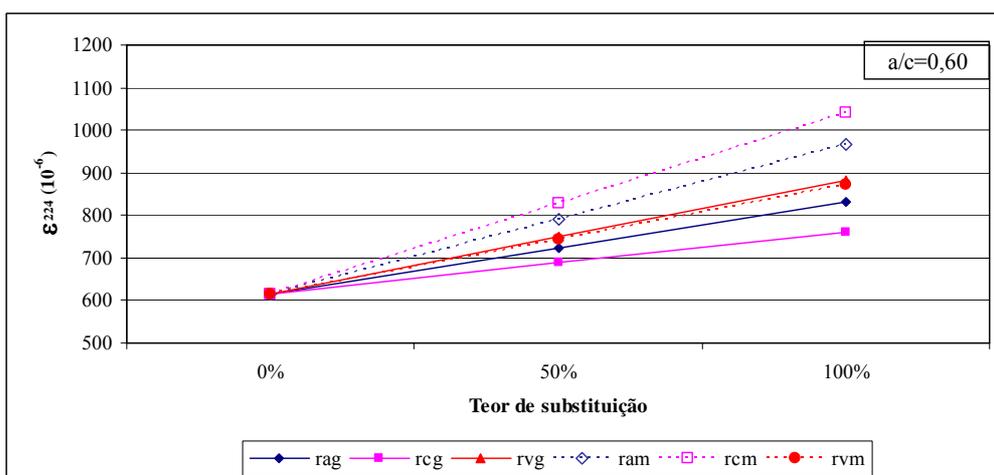


Figura 6.10 Comportamento da retração por secagem em função dos teores de substituição do agregado natural pelo reciclado para a relação água/cimento igual a 0,60

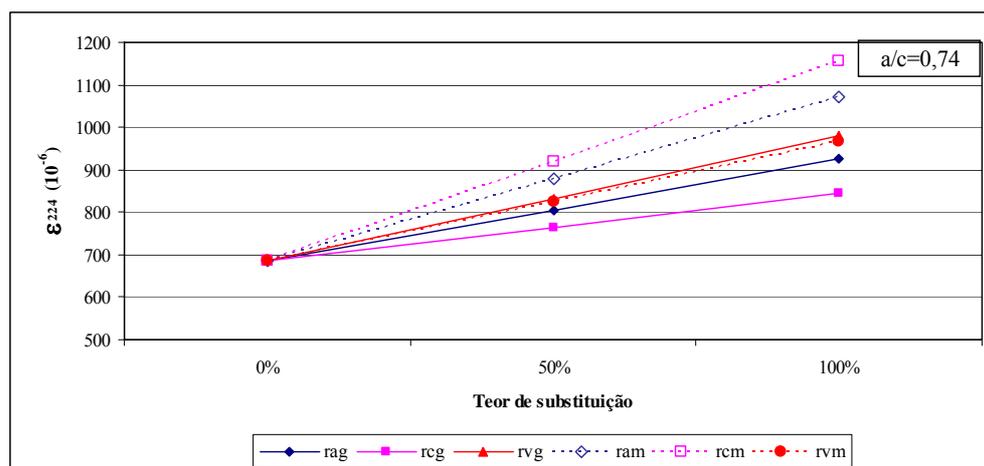


Figura 6.11 Comportamento da retração por secagem em função dos teores de substituição do agregado natural pelo reciclado para a relação água/cimento igual a 0,74

Tabela 6.6 Desempenho da retração por secagem dos concretos quando feito a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado para a idade de 224 dias

Teor de substituição	Tipo de agregado reciclado					
	rag	rcg	rvg	ram	rcm	rvm
0%	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
50%	1,18	1,12	1,22	1,28	1,34	1,21
100%	1,35	1,23	1,43	1,57	1,69	1,41
Relação água/cimento						
0,46		0,60		0,74		
1,00		1,14		1,27		

Conforme pode ser visto pelos gráficos das Figuras 6.9 a 6.11, todos os concretos produzidos com agregados reciclados apresentaram uma retração maior que a retração do concreto de referência. Nota-se também que a relação a/c exerce grande influência sobre a retração por secagem, sendo que quanto maior a relação água/cimento do concreto, maior é a retração obtida pelo modelo. Conforme dados da Tabela 6.6, os concretos de relação água/cimento de 0,60 e 0,74 apresentam retrações 14% e 27% superiores à retração do concreto de relação água/cimento de 0,46. Esse comportamento é coerente e esperado, uma vez que concretos com grandes relações água/cimento correspondem a concretos com um alto teor de água na mistura, sendo que quando esse excesso de água é perdido para o meio externo, uma grande retração é sentida pelo concreto (TAVAKOLI e SOROUSHIAN, 1996b).

De acordo com o modelo, a crescente substituição dos agregados naturais pelos reciclados, seja ele gráudo ou miúdo, provoca um crescente acréscimo na retração por secagem do concreto. Tal efeito é coerente e pode ser explicado em função da maior

porosidade e do menor módulo de deformação dos agregados reciclados e da conseqüente menor restrição a deformações do concreto propiciada pelos mesmos.

Uma outra possível explicação para esse fenômeno seria a maior demanda de pasta de cimento por parte desses concretos para que se obtenha um mesmo grau de empacotamento. Tal raciocínio é coerente com os resultados apresentados por LEVY (2001), onde o mesmo constata um aumento do consumo de cimento, e conseqüentemente de água para se manter a mesma relação água/cimento, com o aumento do teor de reciclados para que se mantenha a consistência especificada.

De acordo com os coeficientes do modelo encontrado (Equação 6.12), sendo ratificado pelos dados apresentados na Tabela 6.6, nota-se que a substituição do agregado miúdo produz um efeito maior sobre a retração por secagem do que a substituição do agregado graúdo. Entretanto, ao se analisar este resultado em função das taxas de absorção dos agregados reciclados miúdos e graúdos (ver item 5.2.2.3), era de se esperar que os concretos com agregados graúdos reciclados retraíssem mais que os concretos feitos com agregados miúdos reciclados.

De acordo com os dados da Tabela 6.6, o uso do agregado miúdo reciclado de cerâmica vermelha provoca um acréscimo na retração por secagem da ordem de 41%, para 100% de substituição. Este acréscimo é inferior aos acréscimos propiciados pelos agregados miúdos reciclado de concreto e de argamassa, os quais aumentam a retração por secagem na ordem de 69% e 57%, respectivamente, quando substituem totalmente os agregados miúdos naturais. Novamente, ao se observar as absorções dos agregados miúdos reciclados, era de se esperar que o concreto com agregado reciclado de cerâmica vermelha apresentasse uma maior retração que os concretos com agregados reciclados de argamassa e concreto.

As discordâncias acima citadas podem ser advindas do próprio modelo proposto, uma vez que este possui um coeficiente de determinação da ordem de 42%, ou seja, ele explica somente 42% dos efeitos dos agregados reciclados na retração por secagem dos concretos com eles confeccionados, sendo deixados de fora 58% dos efeitos.

Novamente, de acordo com os dados da Tabela 6.6, observa-se que ao se substituir o agregado graúdo natural pelos agregados graúdos reciclados, também há um aumento na retração por secagem dos concretos produzidos.

Este comportamento da retração sugerido pelo modelo proposto apresenta coerência com os resultados apresentados por HANSEN (1986) e DHIR et al. (2004a), em específico para os agregados graúdos reciclados de concreto, uma vez que a retração

por secagem proposta é maior para todos os concretos com agregados reciclados quando comparada com a retração do concreto com agregados naturais e que esta aumenta quando se eleva o teor de substituição dos mesmos.

Segundo GÓMEZ-SOBERÓN (2003), há consistência nesse comportamento, uma vez que a substituição do agregado graúdo natural pelo graúdo reciclado de concreto provoca um aumento na porosidade, e conseqüentemente, uma maior retração por secagem para esses concretos.

De acordo com o modelo proposto, o menor aumento da retração por secagem foi apresentado para os concretos produzidos com o agregado graúdo reciclado de concreto, com um aumento da ordem de 23%, quando utilizado totalmente como agregado graúdo.

Tal aumento na retração está aquém dos relatados na bibliografia, tais como nas pesquisas de KATZ (2003), RAVINDRARAJAH et all. (2000), RAVINDRARAJAH e TAM (1985, 1987a) e HANSEN e BØEGH (1985), embora o comportamento como um todo dos concretos com agregados graúdos e miúdos reciclado de concreto aqui encontrado seja semelhante ao também deparado por esses pesquisadores.

Observa-se que dentre os agregados graúdos, o reciclado de cerâmica vermelha apresenta a maior retração por secagem dentre todos os agregados pesquisados, com um aumento de 43% para 100% de substituição.

Esse resultado pode ser explicado porque o agregado de cerâmica vermelha oferece uma menor resistência à deformação da retração por secagem da pasta de cimento devido ao menor módulo de deformação do mesmo (SHULZ e HENDRICKS, 1992). Coerentemente, como visto no item anterior, dentre todos os agregados utilizados, o agregado graúdo de cerâmica vermelha proporcionou a maior perda no módulo de deformação do concreto (ver Tabela 6.4), sendo que este agregado possui a maior taxa de absorção de água (ver item 5.2.2.3) e a menor massa específica (ver item 5.2.2.4) dentre todos os agregados utilizados, sendo por conseguinte, o mais poroso.

A substituição do agregado graúdo natural pelo graúdo reciclado de argamassa propiciou um acréscimo intermediário na retração por secagem dos concretos, entre os demais concretos com agregados graúdos reciclados, acrescendo a retração por secagem dos concretos em 18%, para 50% de substituição, e em 35%, para 100% de substituição.

Embora as deformações apresentadas pelos concretos com agregados reciclados aqui estudados sejam superiores às dos concretos com agregados naturais, 88% dos concretos produzidos no projeto de experimentos não ultrapassam a deformação de

$700 \times 10^{-6}$ , aos 56 dias, que é o valor limite sugerido pela norma australiana AS 3600 (SAGOE-CRENTSIL et al., 2001), como pode ser observado na Figura 6.1.

Ainda que os princípios utilizados no cálculo das propriedades dos concretos com agregados reciclados sejam os mesmos utilizados para os concretos com agregados naturais, possivelmente em função da influência da massa específica e da absorção dos agregados reciclados, os valores de algumas propriedades dos concretos com eles produzidos sejam diferentes. A Tabela 6.7 apresenta coeficientes de correção do módulo de deformação e da retração dos concretos produzidos com esses agregados reciclados quando comparados com concretos com agregados naturais (RILEM, 1994).

Tabela 6.7 Coeficientes de correção das propriedades do concreto produzido com agregados reciclados (RILEM, 1994)

Propriedade	Agregado graúdo reciclado		
	100% alvenaria	100% concreto	Min. 80% natural e máx. 10% alvenaria
Módulo de deformação	0,65	0,80	1,00
Retração	2,00	1,50	1,00

### 6.3 Validação dos modelos obtidos

De posse dos modelos obtidos para a determinação da resistência à compressão e do módulo de deformação dos concretos com agregados reciclados, procedeu-se à validação de tais modelos utilizando dados provenientes de outros pesquisadores. Para tanto, determinou-se os valores dessas propriedades através dos modelos propostos, utilizando a relação água/cimento e os tipos e teores dos agregados reciclados usados pelos autores como dados de entrada dos modelos. De posse dos resultados obtidos, fez-se a comparação desses últimos com os resultados reais publicados por estes autores, com o intuito de verificar o grau de correlação entre os resultados modelados e os resultados reais.

Para a realização dessa comparação, determinou-se o coeficiente de determinação entre os dados reais e os modelados, além de se determinar se existiam diferenças significativas entre os valores calculados pelo modelo e os valores reais. Foram consideradas resistências similares aquelas que não se distanciavam mais de 5,5 MPa, sendo este valor sugerido pela *NBR 12.655/96 – Concreto – preparo, controle e recebimento* como o desvio padrão para a dosagem de concretos onde “o cimento seja medido em massa, a água de amassamento medida em volume mediante dispositivo

*dosador, os agregados medidos em volume, a umidade do agregado miúdo seja conhecida e o volume do agregado miúdo seja corrigido através da curva de inchamento”*, assumindo assim que este é o perfil mais comum dos canteiros de obras brasileiros.

Para o módulo de deformação, uma vez que a norma não contempla o desvio padrão para essa característica, utilizou-se um desvio padrão de mesmo valor que o empregado para a resistência à compressão, pois o valor numérico do módulo de deformação se assemelha aos valores da resistência à compressão.

O modelo referente à retração por secagem não foi utilizado porque não se obteve dados bibliográficos compatíveis para a utilização do mesmo.

### 6.3.1 Resistência à compressão

A Tabela 6.8 traz a composição de concretos de alguns autores (LEITE, 2001; VIEIRA, 2003; RAVINDRARAJAH e TAM, 1985; AKHTARUZZAMAN e HASNAT, 1983; BRITO et al., 2005; HANSEN e NARUD, 1983; RAHAL, 2007; SENTHAMARAI e MANOHARAN, 2005; XIAO e FALKNER, 2007) que utilizaram agregados reciclados similares aos usados nessa pesquisa. Traz também o coeficiente de determinação entre os dados gerados pelo modelo sugerido para a obtenção da resistência à compressão (Equação 6.4) e os dados publicados pelos autores, além do percentual dos dados dos autores que apresentaram diferenças significativas entre os valores da resistência à compressão modelados e os valores apresentados pelos autores.

Como pode ser visto na Tabela 6.8, os valores provenientes do modelo proposto têm um coeficiente de determinação muito bom para com os valores obtidos pelos autores, sendo todos estes coeficientes superiores a 86%, apesar do modelo ser testado em concretos produzidos com diferentes tipos de cimento, de agregados e de processos de misturas. Isso significa que, no pior caso, o modelo descreve com propriedade mais de 86% dos efeitos da substituição dos agregados naturais pelos reciclados sobre a resistência à compressão.

Tabela 6.8 Composição dos concretos, coeficiente de determinação e diferenças significativas entre as resistências à compressão modeladas e as resistências reais

Autor	Teor de agregado reciclado no concreto		Coeficiente de determinação entre os valores modelados e reais	Diferenças entre valores modelados e valores reais
	Agregado miúdo	Agregado graúdo		
LEITE (2001)	28% argamassa, 15% concreto, 26% cer. vermelha, 30% pedras, 1% outros	mesmo que miúdo	93%	há diferenças em 96% dos valores
VIEIRA (2003)	28% argamassa, 19% concreto, 48% cer. vermelha, 3% pedras, 2% outros	mesmo que miúdo	86%	há diferenças em 73% dos valores
RAVINDRARAJAH e TAM (1985)	natural	100% concreto	91%	há diferenças em 17% dos valores
AKHTARUZZAMAN e HASNAT (1983)	natural	100% cer. vermelha	99%	não há diferenças entre os valores
BRITO et al. (2005)	natural	33%, 66% e 100% cer. vermelha	96%	há diferenças em 100% dos valores
HANSEN e NARUD (1983)	natural	100% concreto	96%	há diferenças em 50% dos valores
RAHAL (2007)	natural	100% concreto	94%	há diferenças em 20% dos valores
SENTHAMARAI e MANOHARAN (2005)	natural	100% cer. vermelha	99%	há diferenças em 50% dos valores
XIAO e FALKNER (2007)	natural	100% concreto	100%	há diferenças em 33% dos valores

Utilizando 5,5 MPa como o desvio padrão médio, um limite superior e inferior de resistência podem ser assumidos. Conforme mostrado na Figura 6.12, dos 69 valores de resistência à compressão coletados, somente 24, ou seja, 35% deles, estão inseridos dentro desses limites. Portanto, a grande maioria dos valores de resistência obtidos pelo modelo difere dos valores reais obtidos pelos autores.

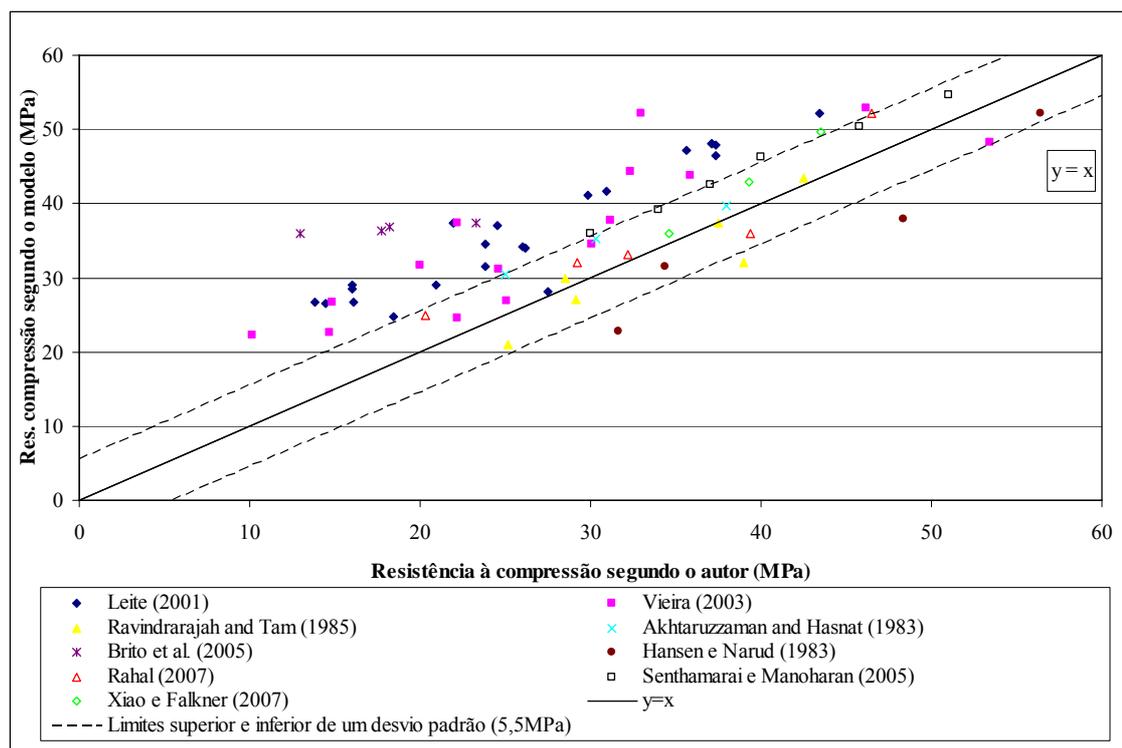


Figura 6.12 Comparação entre as resistências à compressão obtidas pelos autores e as obtidas pelo modelo proposto.

Então, para os dados desses autores, o modelo proposto descreve muito bem o comportamento da resistência à compressão quando se substitui os agregados naturais pelos agregados reciclados utilizados, entretanto este não produz valores de resistências semelhantes aos valores publicados pelos autores. Contudo, para que isso ocorra, basta conhecer o coeficiente de correção entre os valores reais de cada autor e os valores sugeridos pelo modelo e ajustar o modelo para esses dados, uma vez que o comportamento dessa propriedade já é muito bem descrito pelo mesmo.

### 6.3.2 Módulo de deformação

De maneira semelhante ao item anterior, a Tabela 6.9 traz a composição dos concretos de alguns autores (LEITE, 2001; RAVINDRARAJAH e TAM, 1985; AKHTARUZZAMAN e HASNAT, 1983; RAVINDRARAJAH e TAM, 1987; SENTHAMARAI e MANOHARAN, 2005; ETXEBERRIA et al., 2006) que utilizaram agregados reciclados similares aos usados nessa pesquisa, além do coeficiente de determinação entre os dados gerados pelo modelo sugerido para a obtenção do módulo de deformação (Equação 6.8) e os dados publicados pelos autores. Traz também o percentual dos dados dos autores que apresentaram diferenças maiores que um desvio

padrão (5,5 GPa) entre os valores do módulo de deformação modelados e os valores apresentados pelos autores.

Tabela 6.9 Composição dos concretos, coeficiente de determinação e diferenças significativas entre os módulos de deformação modelados e os módulos reais

Autor	Teor de agregado reciclado no concreto		Coeficiente de determinação entre os valores modelados e reais	Diferenças significativas entre valores modelados e valores reais
	Agregado miúdo	Agregado graúdo		
LEITE (2001)	28% argamassa, 15% concreto, 26% cer. vermelha, 30% pedras, 1% outros	mesmo que miúdo	71%	há diferenças em 90% dos valores
RAVINDRARAJAH e TAM (1985)	natural	100% concreto	88%	há diferenças em 83% dos valores
AKHTARUZZAMAN e HASNAT (1983)	natural	100% cer. vermelha	93%	não há diferenças entre os valores
RAVINDRARAJAH e TAM (1987)	100% concreto	natural	88%	não há diferenças entre os valores
SENTHAMARAI e MANOHARAN (2005)	natural	100% cer. vermelha	99%	não há diferenças entre os valores
ETXEBERRIA et al. (2006)	natural	100% concreto	95%	não há diferenças entre os valores

Para esta propriedade, o modelo proposto também obteve grandes coeficientes de determinação entre os valores reais e os valores modelados, sendo que todos estes coeficientes foram superiores a 71%, apesar do modelo ser testado em concretos produzidos com diferentes tipos de cimento, de agregados e de processos de misturas. Isso significa que, no pior caso, o modelo descreve com propriedade mais de 71% dos efeitos da substituição dos agregados naturais pelos reciclados sobre o módulo de deformação.

O modelo proposto para o módulo também não produziu valores tão semelhantes aos valores publicados pelos autores, muito embora tenha apresentado um desempenho ligeiramente superior ao da resistência à compressão, uma vez que utilizando o mesmo

procedimento usado anteriormente, empregando o valor de 5,5 GPa como desvio padrão médio, dos 41 valores utilizados na pesquisa, 54% deles estão inseridos dentro dos limites assumidos. A Figura 6.13 ilustra o que acima foi descrito.

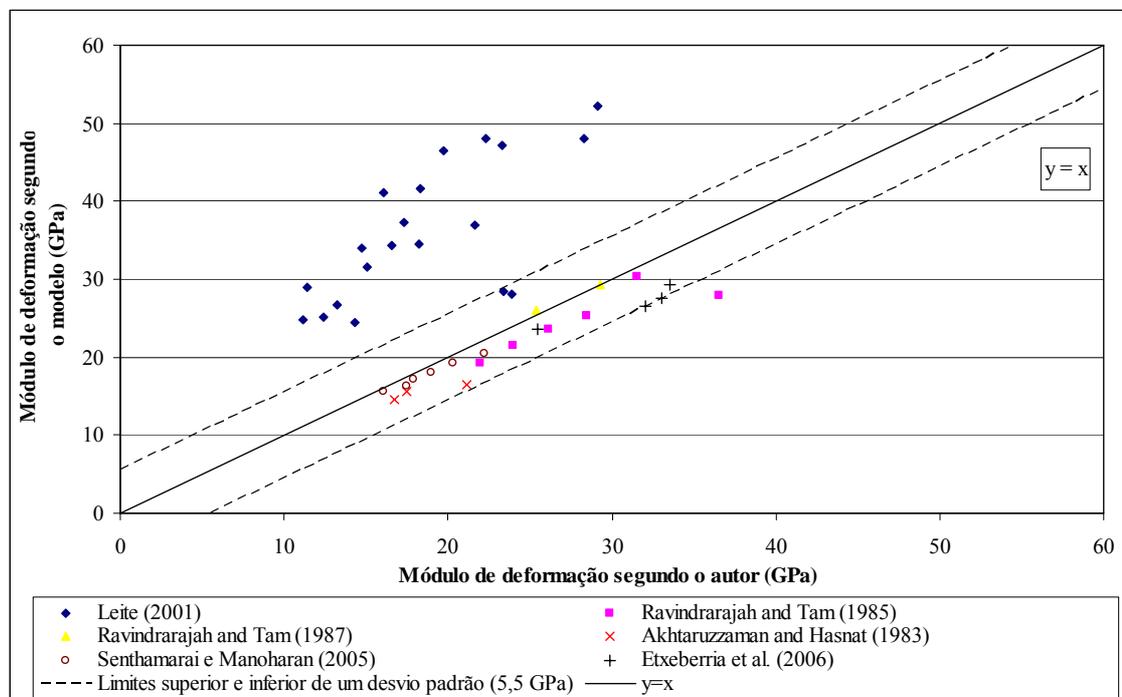


Figura 6.13 Comparação entre os módulos de deformação obtidos pelos autores e os obtidos pelo modelo proposto.

Então, para os dados desses autores, o modelo proposto também descreve muito bem o comportamento do módulo de deformação quando se substitui os agregados naturais pelos agregados reciclados utilizados, embora não produza também valores semelhantes aos valores publicados pelos autores. Contudo, para que isso ocorra, da mesma forma, basta conhecer o coeficiente de correção entre os valores reais de cada autor e os valores sugeridos pelo modelo e ajustar o modelo para esses dados, uma vez que o comportamento dessa propriedade já é muito bem descrito pelo mesmo.

#### 6.4 Simulação do uso dos agregados reciclados de RCD de algumas cidades brasileiras na fabricação de concretos

De posse dos modelos propostos para se determinar a resistência à compressão, o módulo de deformação e a retração por secagem dos concretos feitos com agregados reciclados, utilizou-se dados da literatura sobre a composição dos resíduos de construção e demolição (RCD) de algumas cidades brasileiras, com o intuito de se

verificar o desempenho dos concretos feitos com os agregados oriundos da reciclagem do RCD dessas cidades, com relação às características estudadas.

As composições do RCD das diversas cidades brasileiras utilizadas nessa verificação estão apresentadas na Tabela 3.3, entretanto como há outros constituintes nessas composições, que não somente os considerados nos modelos, refizeram-se as proporções dos constituintes, excluindo-se os demais materiais que não são os estudados. Assim, as novas proporções dos constituintes, para as cidades em estudo, estão dispostas na Tabela 6.10.

Tabela 6.10 Novas proporções dos constituintes do RCD das cidades em estudo após redistribuição

Constituintes	São Carlos	São Paulo	Porto Alegre	Ribeirão Preto	Salvador <sup>8</sup>	Campina Grande	Maceió
Argamassa	65,5%	40%	45,1%	47,2%	42,7%	38,9%	29,4%
Concreto	4,5%	13%	18,6%	26,6%	42,7%	13,9%	19,7%
Material Cerâmico	30,0%	47%	36,3%	26,2%	14,6%	47,2%	50,9%

De posse dessas novas proporções, calcularam-se os valores das propriedades estudadas (resistências à compressão, dos módulos de deformação e das retrações por secagem aos 224 dias) para 3 tipos de concretos produzidos com esses agregados, os quais são: o concreto com substituição de 100% do agregado miúdo natural pelo reciclado miúdo, o concreto com a substituição de 100% do agregado graúdo natural pelo reciclado graúdo e o concreto com a substituição de 100% dos agregados graúdos e miúdos naturais pelos seus respectivos reciclados. Além do tipo de agregado, ainda variou-se a relação água cimento, nos valores de 0,45, 0,60 e 0,75. Os resultados estão dispostos nas Figuras 6.14, 6.15 e 6.16 para a resistência à compressão, para o módulo de deformação e para a retração por secagem aos 224 dias, respectivamente.

No caso da resistência à compressão, observa-se que o concreto com o agregado miúdo reciclado é o que possui a maior resistência dentre os concretos simulados, atingindo valores médios de 46 MPa, 36 MPa e 28 MPa, para as relações a/c de 0,45, 0,6 e 0,75, respectivamente. Com a utilização de somente o agregado graúdo reciclado, os concretos obtidos possuem uma menor resistência à compressão, com valores médios de 32 MPa, 25 MPa e 19 MPa, para as relações a/c de 0,45, 0,6 e 0,75, respectivamente.

---

<sup>8</sup> Foi utilizado para a cidade de Salvador um percentual de 26,5% de concreto e 26,5% de argamassa na proporção inicial.

A utilização conjunta do agregado miúdo e graúdo reciclado propicia a confecção de concretos com resistências bastante similares às dos concretos que contêm somente os agregados graúdos como agregados reciclados, atingindo valores médios de 30 MPa, 24 MPa e 18 MPa, para as relações a/c de 0,45, 0,6 e 0,75, respectivamente.

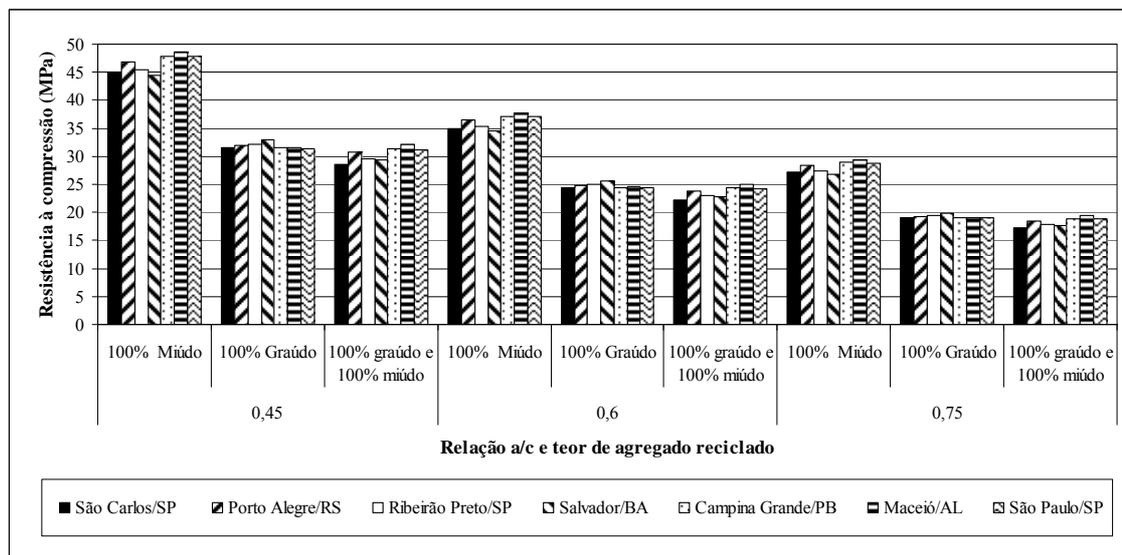


Figura 6.14 Resistência à compressão dos concretos feitos com agregados reciclados de RCD de algumas cidades brasileiras

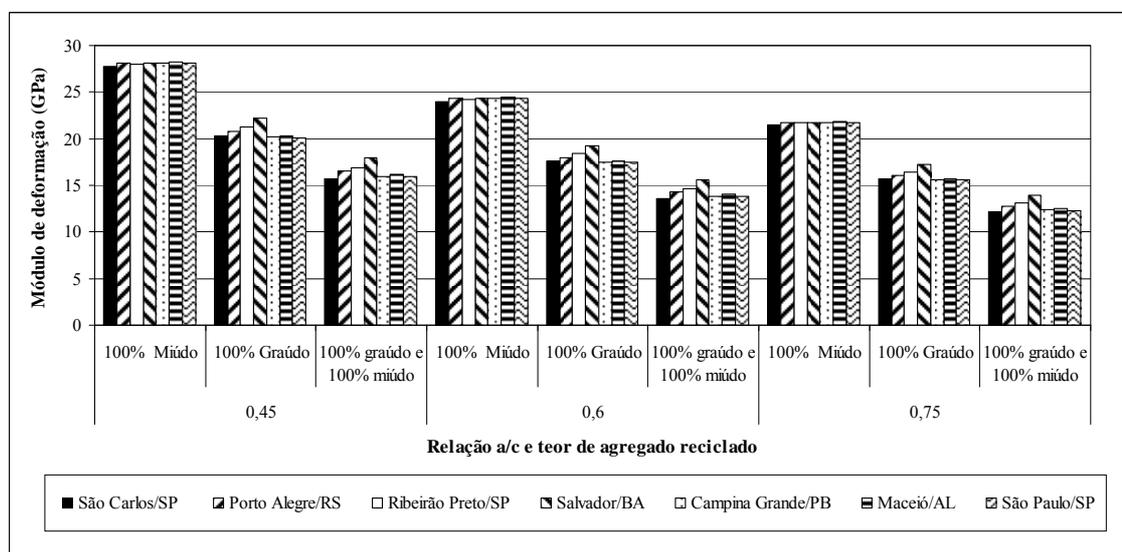


Figura 6.15 Módulo de deformação dos concretos feitos com agregados reciclados de RCD de algumas cidades brasileiras

Para o módulo de deformação, o comportamento dos concretos simulados foi bastante próximo ao comportamento dos mesmos para a resistência à compressão, entretanto notou-se uma perda maior no módulo que na resistência ao se usar

conjuntamente os agregados graúdos e miúdos reciclados. Ratificando o que acima foi dito encontrou-se valores médios de 28 GPa, 24 GPa e 22 GPa, para as relações a/c de 0,45, 0,6 e 0,75, respectivamente, para os concretos com somente agregados miúdos como reciclados. Com a utilização de somente o agregado graúdo reciclado, os concretos obtidos apresentaram valores médios para o módulo de 21 GPa, 18 GPa e 16 GPa, para as relações a/c de 0,45, 0,6 e 0,75, respectivamente. Ao se simular o uso conjunto do agregado graúdo e miúdo reciclado, obtém-se valores médios de 17 GPa, 14 GPa e 13 GPa, para as relações a/c de 0,45, 0,6 e 0,75, respectivamente.

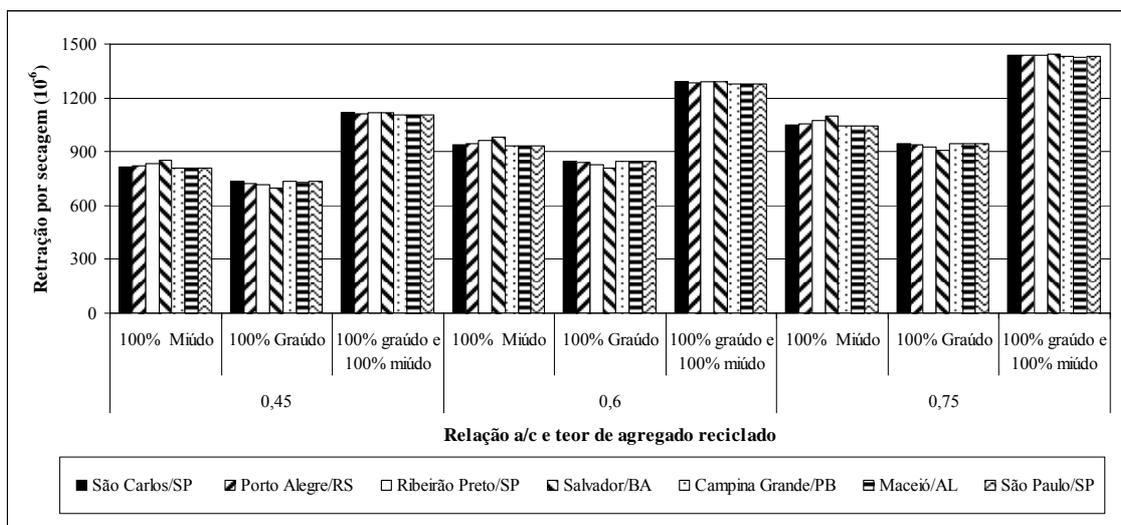


Figura 6.16 Retração por secagem aos 224 dias dos concretos feitos com agregados reciclados de RCD de algumas cidades brasileiras

Finalmente, para a retração por secagem aos 224 dias, observa-se que os valores da retração obtidos para o concreto com agregado graúdo reciclado são os menores encontrados, atingindo valores médios de 723, 834 e 933 micros para as relações a/c de 0,45, 0,6 e 0,75, respectivamente. Já o concreto com agregado miúdo reciclado apresenta uma retração um pouco maior, com valores médios de 822, 949 e 1061 micros para as relações a/c de 0,45, 0,6 e 0,75, respectivamente. Entretanto, ao se utilizar ambos agregados reciclados, a retração por secagem simulada apresenta valores médios bastante altos, atingindo 1112, 1284 e 1436 micros para as relações a/c de 0,45, 0,6 e 0,75, respectivamente.

De uma maneira geral, percebe-se uma grande viabilidade no uso dos agregados provenientes da reciclagem dos RCD das cidades estudadas na fabricação de concretos, uma vez que os concretos simulados com os mesmos ainda atingem consideráveis resistências à compressão e módulos de deformação, principalmente quando se utiliza o

agregado miúdo. Entretanto, deve-se priorizar o uso dos agregados reciclados em concretos de baixa relação água/cimento, por assim produzir concretos de menor retração por secagem, reprimindo o aparecimento de fissuras, aumentando assim a durabilidade das estruturas.

Outro ponto interessante que se pode observar foi que, para todas as propriedades estudadas, os concretos de mesma relação água/cimento e um mesmo tipo e teor de substituição apresentaram comportamento bastante similar, independentemente da origem dos agregados reciclados.

Segundo os dados da Tabela 6.10, o teor de argamassa no RCD varia de 29,4%, em Maceió, para 65,5%, em São Carlos. O teor de concreto, varia de 4,5%, em São Carlos, para 42,7% em Salvador. Já o material cerâmico varia de 14,6% para 50,9%, de Salvador para Maceió, respectivamente.

Analisando os resultados da resistência à compressão para os concretos simulados, observa-se que a diferença percentual máxima obtida entre as resistências para um mesmo tipo de substituição e uma mesma relação água/cimento foi de 9,3%, 4,5% e 12,9%, para os concretos com 100% de substituição de agregado miúdo, 100% de substituição do agregado graúdo e 100% de substituição do agregado miúdo e graúdo, respectivamente. Fazendo uma análise similar para o módulo de deformação, tem-se que a diferença percentual máxima obtida entre os módulos foi de 1,9%, 10,4% e 14,7%, para os concretos com 100% de substituição de agregado miúdo, 100% de substituição do agregado graúdo e 100% de substituição do agregado miúdo e graúdo, respectivamente. Por fim, para a retração por secagem, tem-se que a diferença percentual máxima obtida entre as retrações foi de 5,7%, 4,7% e 1,2%, para os respectivos concretos anteriormente citados.

Diante do exposto, pode-se concluir que a variabilidade da composição do RCD não se constitui um problema ao uso dos agregados reciclados de RCD, uma vez que as diferenças percentuais entre os valores da resistência à compressão, do módulo de deformação e da retração por secagem apresentadas pelos concretos simulados não foram grandes. Assim, tal variabilidade pode ser contemplada nos coeficientes de segurança quando for feito o dimensionamento do concreto, viabilizando, portanto, o uso dos agregados reciclados como matéria-prima para a produção de concretos.

### 6.5 Comparação de custos de concretos de mesma resistência à compressão produzidos com agregados naturais e com agregados reciclados

A fim de se determinar o custo dos concretos com agregados reciclados, utilizando-se a Equação 6.4, determinaram-se as relações água/cimento que originam concretos de 35MPa de resistência à compressão, sendo estes concretos produzidos somente com agregados naturais, concretos com 50% e 100% de substituição do agregado miúdo natural por agregados miúdos reciclados de concreto, argamassa e cerâmica vermelha, individualmente, e concretos com 50% e 100% de substituição do agregado graúdo natural por agregados graúdos reciclados de concreto, argamassa e cerâmica vermelha, também substituídos individualmente.

De posse das relações água/cimento, determinou-se o custo do m<sup>3</sup> para se produzir os concretos. Os preços do cimento e dos agregados naturais foram coletados no mercado de São Carlos e os preços dos agregados reciclados foram obtidos no PROHAB, órgão da Prefeitura Municipal de São Carlos, que mantém uma usina de reciclagem de RCD. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 6.11.

Tabela 6.11 Relação água/cimento e custo dos concretos de 35 MPa

Tipo de concreto	Relação a/c do concreto	Custo do m <sup>3</sup> (R\$)
referência	0,64	147,74
50% AMA	0,59	147,77
50% AMC	0,62	147,52
50% AMCV	0,68	143,80
100% AMA	0,54	168,34
100% AMC	0,60	153,32
100% AMCV	0,71	144,98
50% AGA	0,53	139,47
50% AGC	0,55	142,32
50% AGCV	0,52	139,46
100% AGA	0,39	184,91
100% AGC	0,45	176,64
100% AGCV	0,36	195,55
Custo dos insumos: Cimento: R\$16,00/saco 40kg; Agregado graúdo natural: 34,00/m <sup>3</sup> ; Agregado miúdo natural: 22,00/m <sup>3</sup> ; Agregado graúdo e miúdo reciclados: 7,00/m <sup>3</sup> ; Aditivo superplastificante: R\$15,00/kg.		

Segundo os dados da Tabela 6.11 pode-se observar que exceto os concretos feitos com os agregados miúdos de cerâmica vermelha (AMCV), todos os demais

concretos necessitam de uma menor relação água/cimento para alcançar a resistência desejada (35 MPa). Essa redução na relação água/cimento propicia um aumento no consumo de cimento, encarecendo assim os concretos.

Entretanto, como já mencionado no procedimento experimental, os concretos com agregados reciclados utilizam uma menor massa de agregados por m<sup>3</sup> de concreto produzido, em função da menor massa específica desses agregados. Essa redução no consumo dos agregados e o menor custo dos agregados reciclados quando comparados com os agregados naturais propiciam um ligeiro barateamento dos mesmos, uma vez que o agregado não é o insumo mais caro do concreto.

Considerando a interação dos dois itens acima apontados (consumo de cimento e consumo e custo dos agregados), todos os concretos com substituição de 50% do agregado natural pelo agregado reciclado apresentaram um custo semelhante ou inferior ao custo do concreto de referência, conforme pode ser observado na Tabela 6.11. Entretanto, ao se substituir 100% do agregado natural pelo agregado reciclado, somente o concreto com o agregado reciclado de cerâmica vermelha apresentou um custo ligeiramente inferior ao do concreto de referência. Este resultado possivelmente é devido à exigência de uma maior relação água/cimento para se atingir a resistência especificada, muito provavelmente devido ao efeito pozolânico propiciado por este tipo de agregado. Como consequência, tal concreto consome menos cimento, que aliado ao menor consumo e custo do agregado, propiciou numa redução do custo do concreto.

Para os demais concretos com 100% de substituição, há acréscimos de custos do concreto produzido. Contudo, esses acréscimos são mais agudos quando os agregados graúdos são substituídos, uma vez que os concretos produzidos com 100% de substituição do agregado graúdo natural pelo graúdo reciclado de concreto, de argamassa e de cerâmica vermelha apresentaram acréscimos nos custos de 19,6%, 25,2% e 32,4%, respectivamente, enquanto que os concretos produzidos com 100% de substituição do agregado miúdo natural pelo miúdo reciclado de concreto e de argamassa apresentaram acréscimos nos custos de 3,8% e 13,9%, respectivamente.

Portanto, de uma maneira geral, comparando os custos de concretos de mesma resistência à compressão produzidos com agregados reciclados com o custo de um concreto de referência, de igual resistência, nota-se que é conveniente que se faça a substituição dos agregados naturais pelos reciclados em baixos teores, principalmente para os agregados graúdos.



# **CAPÍTULO 7 – CLASSIFICAÇÃO DOS CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS QUANTO À DURABILIDADE, CONSIDERANDO O VOLUME DE POROS PERMEÁVEIS (VPP)**

7.1 Considerações iniciais

7.2 Procedimento experimental

7.3 Resultados

7.3.1 Apresentação

7.3.2 Análise e discussão

7.3.3 Classificação dos concretos com agregados reciclados quanto à durabilidade

7.4 Considerações finais

## **7 CLASSIFICAÇÃO DOS CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS QUANTO À DURABILIDADE, CONSIDERANDO O VOLUME DE POROS PERMEÁVEIS (VPP)**

### **7.1 Considerações iniciais**

No desenvolvimento de produtos onde a matéria-prima provém de materiais reciclados, a durabilidade é um aspecto fundamental a ser analisado. As transformações que o produto irá sofrer ao ser exposto às intempéries e a ações de uso poderão propiciar a liberação de fases contaminantes, através da lixiviação, por exemplo (JOHN e ÂNGULO, 2003).

Durabilidade do concreto pode ser definida como a sua habilidade de resistir a danos inerentes ao meio ambiente ao qual o mesmo está disposto, sendo esta não somente uma intrínseca propriedade do concreto mas também um atributo, o qual não pode ser diretamente medido, embora possa ser avaliada através do desempenho do material quando submetido a determinadas condições de exposição (ZAKARIA e CABRERA, 1996).

O objetivo final do estudo da durabilidade é determinar o tempo de vida útil do produto, ou seja, o tempo em que o mesmo atende às exigências, sejam de origem técnica ou subjetiva (satisfação do usuário), quando exposto a um determinado ambiente.

Segundo JOHN e ÂNGULO (2003), a avaliação da durabilidade inicia-se pelo entendimento dos fatores de degradação do produto, da forma que estes possam provocar modificações no mesmo, afetando o seu desempenho.

Talvez, o mais importante desses fatores seja a capacidade do concreto de resistir à entrada de fluidos através do mesmo. Esta propriedade do concreto depende não somente da natureza dos seus constituintes, mas também da sua estrutura de poros. Com o uso dos agregados reciclados, a porosidade capilar do concreto é modificada em

função das diferentes propriedades apresentadas por estes tipos de agregados (OLORUNSOGO e PADAYACHEE, 2002).

Devido à grande dificuldade em estabelecer uma medida direta da durabilidade em concretos, aliada a uma intensa procura por testes simples, baratos e práticos para uma rápida determinação da mesma, ou seja, testes indiretos da durabilidade, uma grande ênfase é dada ao uso qualitativo de uma classificação gerada a partir de valores numéricos (valores não absolutos) obtidos a partir desses testes, valores estes que estabelecem um *ranking* de durabilidade relativa de concretos (ANDREWS-PHAEDONOS, 1996).

Por outro lado, HANSEN (1992) afirma que a penetração de água através da absorção é tida como um dos maiores mecanismos de deterioração vigentes dos concretos. Maiores detalhes do comportamento dos concretos com agregados reciclados quanto à absorção de água e propriedades correlatas já foram discutidas nos itens 4.1.3 e 4.1.10.

Segundo ANDREWS-PHAEDONOS (1996), pode-se utilizar o Volume de Poros Permeáveis (VPP) como um indicador da porosidade capilar do concreto e de uma potencial durabilidade do mesmo a longo prazo. O VPP essencialmente fornece o espaço estrutural interconectado dentro do concreto, o qual acomoda a água absorvida e é onde se realiza o movimento da umidade no concreto. Ainda segundo o último autor, há uma significativa correlação entre a água absorvida pelo concreto e o VPP.

ANDREWS-PHAEDONOS (1996) sugere uma classificação dos concretos quanto à durabilidade baseadas no VPP, segundo o tipo de cura, idade da realização dos ensaios e tipo de compactação dos concretos, conforme pode ser observado da Tabela 7.1 a 7.3.

A Tabela 7.1 apresenta a classificação quanto à durabilidade dos concretos feitos em campo e compactados utilizando hastes ou soquetes e subsequentemente curados em câmara úmida ou submersos em água saturada com cal. Já a Tabela 7.2 deve ser utilizada para os concretos feitos em laboratório ou em ambientes de controle similar e compactados utilizando a vibração e subsequentemente curados em câmara úmida ou submersos em água saturada com cal. Para o uso das duas tabelas citadas, os corpos-de-prova devem ser ensaiados aos 28 dias.

Tabela 7.1 Classificação do concreto quanto à durabilidade baseado no VPP de corpos-de-prova, aos 28 dias, compactados com soquete e curados em câmara úmida ou submersos em água saturada com cal.

Classificação do concreto segundo a durabilidade	Volume de Poros Permeáveis (%)	Absorção após imersão e ebulição (%) (em massa)
Excelente	<12	<5,0
Bom	12-14	5,0-6,0
Normal	14-15	6,0-6,5
Marginal	15-17	6,5-7,5
Ruim	>17	>7,5

Tabela 7.2 Classificação do concreto quanto à durabilidade baseado no VPP de corpos-de-prova, aos 28 dias, compactados através de vibração e curados em câmara úmida ou submersos em água saturada com cal.

Classificação do concreto segundo a durabilidade	Volume de Poros Permeáveis (%)	Absorção após imersão e ebulição (%) (em massa)
Excelente	<11	<4,5
Bom	11-13	4,5-5,5
Normal	13-14	5,5-6,0
Marginal	14-16	6,0-7,0
Ruim	>16	>7,0

A Tabela 7.3 traz a classificação de concretos quando o ensaio de VPP é realizado em corpos-de-prova extraídos de estruturas, aos 28 dias de idade. Ao se estabelecer esses limites de classificação foram levados em consideração os efeitos produzidos pela operação de arrancamento dos corpos-de-prova.

Tabela 7.3 Classificação do concreto quanto à durabilidade baseado no VPP de corpos-de-prova extraídos aos 28 dias de estruturas

Classificação do concreto segundo a durabilidade	Volume de Poros Permeáveis (%)	Absorção após imersão e ebulição (%) (em massa)
Excelente	<14	<6,0
Bom	14-16	6,0-7,0
Normal	16-17	7,0-7,5
Marginal	17-19	7,5-8,5
Ruim	>19	>8,5

Quando os ensaios nos corpos-de-prova forem realizados em idades superiores a 28 dias, ANDREWS-PHAEDONOS (1996) sugere utilizar os dados da Tabela 7.4 para se estimar o correspondente VPP para 28 dias de idade. Isso pode ocorrer, por exemplo, quando se usar essa metodologia como parte de um diagnóstico de estruturas.

Tabela 7.4 Determinação do VPP correspondente para 28 dias de idade de concretos antigos

Valor corrente de VPP (%)	Valor correspondente estimado de VPP (%) para a idade de 28 dias
$\leq 10$	adicionar 1
10-15	adicionar 2 a 3
$\geq 15$	adicionar 3 a 4

Embora não fizesse parte dos objetivos iniciais deste trabalho, a obtenção de dados quanto ao desempenho dos concretos com agregados reciclados com relação a parâmetros de durabilidade também foi abordado, uma vez que a qualidade de um concreto é mensurada não somente pelo seu desempenho mecânico, mas também pelas suas características de durabilidade.

Por limitações laboratoriais e de prazo, só foi possível gerar corpos-de-prova dos traços de concreto definidos no projeto estatístico para as características abordadas inicialmente (resistência à compressão, módulo de deformação e retração por secagem). Entretanto, os corpos-de-prova utilizados nos ensaios de retração por secagem, após o término desses ensaios, foram reutilizados para a determinação de algumas características de durabilidade desses concretos.

## 7.2 Procedimento experimental

Após 15 meses que foram moldados, os corpos-de-prova utilizados no ensaio de retração por secagem (ver item 5.4.3) foram serrados ao meio em seu sentido transversal e suas metades foram ensaiadas segundo os procedimentos da norma *ASTM C 642 – 97 Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*, com o intuito de se determinar o Volume de Poros Permeáveis (VPP) desses concretos.

Segundo os procedimentos desta norma, os corpos-de-prova devem ser secados em uma estufa de temperatura entre 100°C e 110°C por um período não inferior a 24 horas, até a constância de massa, a qual deve ser determinada, chamando-a de  $m_1$ . Em seguida deve-se submergir o corpo-de-prova em água a temperatura ambiente, por um período não inferior a 48 horas, até que a diferença de massa entre duas pesagens sucessivas em um intervalo de 24 horas apresente uma diferença menor que 0,5% do maior valor. Deve-se então enxugar a superfície do corpo-de-prova com uma toalha e pesá-lo, chamando essa massa de  $m_2$ . Seguidamente deve-se submergir o corpo-de-prova em água fervente por 5 horas e após esse período deve-se deixar o conjunto

esfriar a uma temperatura de 20 a 25°C em um período não inferior a 14 horas. Deve-se novamente enxugar a superfície do corpo-de-prova com uma toalha e pesá-lo, chamando essa massa de  $m_3$ . Por fim, deve-se suspender o corpo-de-prova por um arame ou tela e determinar a massa aparente do mesmo submerso em água, chamando-a de  $m_4$ .

Através da Figura 7.1, pode-se observar os corpos-de-prova esfriando após imersos por 5 horas em água fervente, enquanto que na Figura 7.2 observa-se a determinação da massa aparente dos corpos-de-prova submersos em água.



Figura 7.1 Corpos-de-prova submersos em água



Figura 7.2 Determinação da massa aparente dos corpos-de-prova submersos em água

Os parâmetros que podem ser calculados com os dados coletados são a absorção, conforme a Equação 7.1, e o volume de poros permeáveis (VPP), conforme a Equação 7.2, as quais encontram-se a seguir.

$$Abs(\%) = \frac{(m_2 - m_1)}{m_1} \cdot 100 \quad (7.1)$$

$$VPP(\%) = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_3 - m_4)} \cdot 100 \quad (7.2)$$

## 7.3 Resultados

### 7.3.1 Apresentação

Os resultados obtidos para o volume de poros permeáveis dos 50 traços de concretos estão apresentados na Figura 7.3.

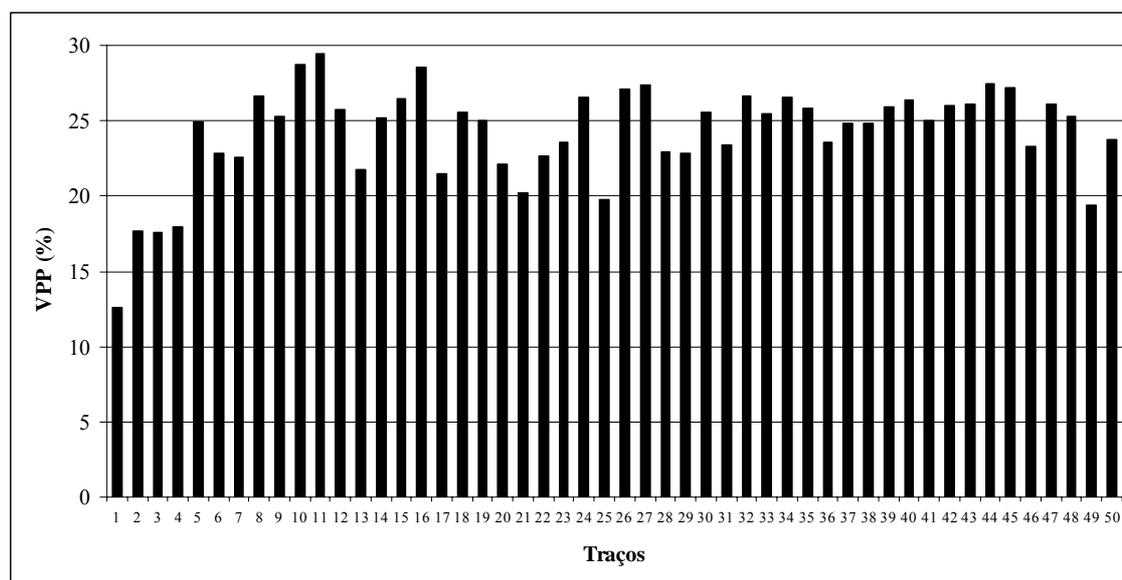


Figura 7.3 Volume de poros permeáveis dos concretos produzidos

De posse desses resultados, utilizando-se uma regressão múltipla não linear, foi realizada uma análise estatística dos dados propondo-se um modelo matemático que relacionasse a variável de resposta (VPP) com as variáveis independentes (teor dos seis tipos de agregados reciclados e a relação água/cimento). O resultado da análise dessa regressão múltipla encontra-se no Anexo H. O modelo obtido está descrito na Equação 7.3, o qual possui um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) bastante satisfatório, de valor igual a 97%.

$$VPP(\%) = 15,1 \cdot (a/c)^{0,23} \cdot (1 + 0,40.rcg + 0,64.rvg + 0,47.rag) \cdot (1 + 0,30.rcm + 0,29.rvm + 0,20.ram) \quad (7.3)$$

Nesse modelo, os percentuais de substituição dos agregados miúdo ou graúdo pelos reciclados devem ser informados na escala de 0 (0%) a 1 (100%), enquanto que a relação água/cimento está expressa na escala usual, variando de 0,4 a 0,8. Convém salientar que o somatório dos percentuais de substituição dos agregados naturais pelo reciclados devem ser no máximo igual a 1 (100%), para cada tipo de agregado (graúdo e miúdo).

### 7.3.2 Análise e discussão

Através da Figura 7.4 e da Tabela 7.5 pode-se observar o comportamento dos concretos obtidos com relação ao VPP quando se varia a relação água/cimento e o teor e o tipo de agregado reciclado. Os dados para a construção da figura e da tabela citadas foram gerados a partir do modelo proposto.

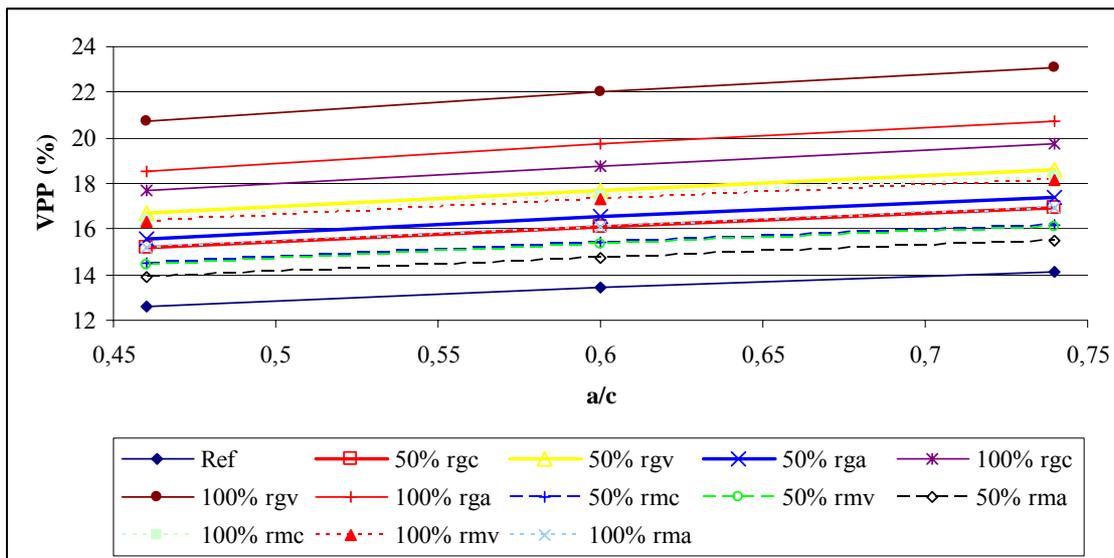


Figura 7.4 Comportamento do volume de poros permeáveis em função da relação água/cimento e dos teores de substituição do agregado natural pelo reciclado

Tabela 7.5 Desempenho dos concretos com relação ao VPP quando feito a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado e quando se varia a relação a/c

Teor de substituição	Tipo de agregado reciclado					
	rag	rcg	rvg	ram	rcm	rvm
0%	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
50%	1,24	1,20	1,32	1,10	1,15	1,15
100%	1,47	1,40	1,64	1,20	1,30	1,29
Relação água/cimento						
0,46		0,60		0,74		
1,00		1,06		1,12		

De acordo com o modelo apresentado, quando é feita a substituição do agregado natural pelos reciclados, há um acréscimo do volume de poros permeáveis do concreto obtido, independentemente do tipo de agregado reciclado utilizado. Observa-se também que a substituição do agregado graúdo natural pelos reciclados produz um efeito maior do que a substituição do agregado miúdo, como se pode observar em função da magnitude dos coeficientes dos mesmos no modelo e dos valores dos acréscimos no VPP mostrados na Tabela 7.5. Tais resultados são coerentes com os previamente apresentados para a resistência à compressão, onde a substituição do agregado graúdo natural pelos grãos reciclados produziu um efeito maior do que a substituição do agregado miúdo natural pelos miúdos reciclados, uma vez que quanto maior o VPP do concreto espera-se que esse apresente mais vazios e, conseqüentemente, uma menor resistência.

Há também uma variação no VPP quando se modifica a relação água/cimento, sendo que quanto maior a relação água/cimento, maior o VPP, resultado este coerente com o esperado. ANDREWS-PHAEDONOS (1996) afirma que a relação água/cimento tem uma grande influência no VPP. Como exemplo, tal autor cita que um aumento na relação água/cimento de 0,3 para 0,75 pode provocar um acréscimo de mais de 50% no VPP. Conforme o modelo encontrado, a elevação da relação água/cimento de 0,46 para 0,60 provoca um acréscimo de 6% no VPP e quando a relação água/cimento é elevada para 0,74, 12% de acréscimo no VPP é manifestado.

Observa-se que o concreto com agregado graúdo reciclado de cerâmica vermelha é o que apresenta os maiores valores para o VPP, com acréscimo de 64% para 100% de substituição, quando comparado com o concreto de referência. Isto significa que o agregado graúdo reciclado de cerâmica vermelha propicia a formação de um concreto mais poroso, onde esses poros parecem estar mais interconectados. Este resultado é bastante coerente com o resultado apresentado para a resistência à compressão, uma vez que o concreto com este tipo de agregado apresentou a menor resistência à compressão dentre todos, o que está de acordo com o resultado do VPP.

Na seqüência, os concretos com agregados reciclados grãos de argamassa e de concreto apresentaram acréscimos no valor de VPP da ordem de 47% e 40%, respectivamente, para 100% de substituição. Novamente, esta também foi a ordem encontrada para o ensaio de resistência à compressão, o que demonstra a coerência entre os resultados.

Os resultados encontrados também apresentam coerência com os de OLORUNSOGO e PADAYACHEE (2002), que analisaram alguns índices de desempenho de durabilidade (condutividade de cloretos, permeabilidade ao oxigênio e absorção de água) de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de RCD, encontrando, para todos, desempenhos inferiores ao do concreto de referência. Especificamente para a condutividade de cloretos, o índice apresentado para os concretos com agregados reciclados aumentou em 73,2%, aos 28 dias, quando comparado ao índice de referência.

Segundo os mesmos autores, essa redução no desempenho quanto à durabilidade apresentado pelos concretos reciclados ocorre por conta das fissuras criadas nos agregados durante o processo de reciclagem, as quais tornam-se um fácil caminho para passagem de fluidos e agentes agressivos, além da presença de uma estrutura por si mais porosa.

Para os concretos com agregados miúdos reciclados, os resultados apresentados foram bastante similares, uma vez que os concretos com 100% de agregados miúdos reciclados de concreto e de cerâmica vermelha obtiveram 30% e 29% de acréscimo no valor do VPP, respectivamente, enquanto que o concreto com 100% de agregado miúdo reciclado de argamassa obteve um acréscimo de 20% no valor do VPP.

Esses acréscimos apresentados para os valores de VPP dos concretos com agregados miúdos reciclados de concreto e de argamassa são coerentes com o comportamento desses concretos quanto à compressão, uma vez que os mesmos apresentaram resistências menores que a resistência do concreto de referência. Entretanto, para o concreto com reciclado miúdo de cerâmica vermelha, esperava-se que os valores do VPP fossem iguais ou inferiores ao do concreto de referência, em função dos valores da resistência à compressão apresentada pelos mesmos.

### 7.3.3 Classificação dos concretos com agregados reciclados quanto à durabilidade

De posse do modelo proposto pela Equação 7.1 gerou-se os valores do VPP dos concretos com 50% e 100% de agregados reciclados de concreto, argamassa e cerâmica vermelha, separadamente. Como os concretos utilizados para gerar o modelo tinham idade de 15 meses, os valores de VPP gerados pelo modelo correspondem para a idade de 15 meses.

Utilizou-se então os dados da Tabela 7.4 para transformar os valores de VPP de 15 meses para 28 dias. Os dados de VPP transformados estão dispostos na Tabela 7.6.

Tabela 7.6 Valores de VPP ajustados para os diversos tipos de concretos com agregados reciclados, em %.

a/c	ref.	Agregado graúdo reciclado						Agregado miúdo reciclado					
		50%			100%			50%			100%		
		rag	rvg	rcg	rag	rvg	rcg	ram	rvm	rcm	ram	rvm	rcm
0,46	15,1	19,1	20,2	18,7	22,1	24,2	21,2	16,4	17,0	17,0	18,7	19,8	19,9
0,60	15,9	20,1	21,2	19,6	23,2	25,5	22,3	17,3	18,9	18,9	19,6	20,8	21,0
0,74	16,6	20,9	22,1	20,4	24,2	26,6	23,2	19,0	19,6	19,7	20,4	21,7	21,8

Pode-se observar, através dos dados dispostos na Tabela 7.6, que os concretos de referência de relação a/c de 0,46 e 0,60 possuem VPP entre 14 e 16%, e o de relação a/c de 0,74 possui VPP acima de 16%. Segundo a classificação apresentada na Tabela 7.2, para concretos compactados através de vibração e curados em câmara úmida, aos 28 dias, estes possuem uma durabilidade marginal e ruim, respectivamente. Entretanto, sabe-se que o traço de concreto produzido com agregados naturais e relação a/c de 0,46 (traço 1 do Anexo C) teve uma resistência à compressão de 46 MPa (Anexo E). Ao se utilizar o modelo que prevê a resistência à compressão, o valor encontrado é de 47,2 MPa. É amplamente difundido no meio técnico-acadêmico que concretos com resistências à compressão deste valor possuem excelente durabilidade, mesmo em ambientes agressivos, como preconiza a NBR 6118.

Coerente com o acima exposto, SHAYAN e XU (2006), testando corpos-de-prova de concretos feitos com agregados naturais e relação a/c de 0,49, obtiveram uma resistência à compressão em torno de 55 MPa e um VPP de 13%, ambos aos 28 dias.

Então, para corrigir essas distorções, resolveu-se classificar o concreto de referência de relação a/c=0,46 segundo a durabilidade como um concreto excelente. Para se classificar os demais concretos obtidos, utilizou-se da mesma proporção usada previamente na Tabela 7.2, entretanto ao invés de se trabalhar com os valores de VPP obtidos, trabalhou-se com os acréscimos entre os diversos níveis de classificação. A Tabela 7.7 traz os níveis de classificação do concreto segundo a durabilidade, de acordo com os acréscimos do VPP para com o nível excelente.

Tabela 7.7 Classificação do concreto segundo a durabilidade, de acordo com os acréscimos de VPP entre os níveis

Classificação do concreto segundo a durabilidade	Acréscimo entre níveis (%)
Excelente (E)	-
Bom (B)	Acréscimo de até 2
Normal (N)	Acréscimo de 2 a 3
Marginal (M)	Acréscimo de 3 a 5
Ruim (R)	Acréscimo superior a 5

Determinou-se então os valores dos acréscimos de VPP dos demais concretos com relação ao concreto de referência de relação  $a/c=0,46$ . Os resultados encontram-se dispostos na Tabela 7.8.

Tabela 7.8 Valores dos acréscimos de VPP com relação ao concreto de referência de relação  $a/c=0,46$ , em %.

a/c	ref.	Agregado graúdo reciclado						Agregado miúdo reciclado					
		50%			100%			50%			100%		
		rag	rvg	rcg	rag	rvg	rcg	ram	rvm	rcm	ram	rvm	rcm
0,46	-	4,0	5,0	3,5	6,9	9,1	6,1	1,3	1,8	1,9	3,5	4,7	4,8
0,60	0,8	5,0	6,1	4,5	8,1	10,4	7,2	2,1	3,7	3,8	4,5	5,7	5,8
0,74	1,5	5,8	7,0	5,3	9,1	11,5	8,1	3,9	4,5	4,6	5,3	6,5	6,7

Utilizou-se então os dados da Tabela 7.7 para classificar todos os demais concretos. Os resultados dessa classificação encontra-se na Tabela 7.9.

Tabela 7.9 Classificação dos concretos quanto à durabilidade baseado nos acréscimos do VPP para com o concreto de referência de relação  $a/c=0,46$ .

a/c	ref.	Agregado graúdo reciclado						Agregado miúdo reciclado					
		50%			100%			50%			100%		
		rag	rvg	rcg	rag	rvg	rcg	ram	rvm	rcm	ram	rvm	rcm
0,46	E	M	M	M	R	R	R	B	B	B	M	M	M
0,60	B	M	R	M	R	R	R	N	M	M	M	R	R
0,74	B	R	R	R	R	R	R	M	M	M	R	R	R

Observa-se que a substituição do agregado natural pelo reciclado diminui o desempenho dos concretos produzidos com relação à sua durabilidade, independentemente da relação água/cimento do concreto. Entretanto, concretos com baixas relações água/cimento tendem a apresentar melhor desempenho quanto à durabilidade que os concretos produzidos com altas relações água/cimento.

Dentre as substituições simuladas, apenas os concretos com relação água/cimento de 0,46 e com um teor de 50% de substituição do agregado miúdo

apresentaram uma classificação como bom. Todos os demais concretos simulados apresentaram um desempenho marginal ou ruim, com exceção do traço de relação água/cimento de 0,6 e substituição de 50% do agregado miúdo natural pelo reciclado de argamassa, que foi classificado como normal.

#### **7.4 Considerações finais**

O modelo desenvolvido para a determinação do volume de poros permeáveis dos concretos em estudo apresentou comportamento condizente com os demais dados anteriormente pesquisados. Entretanto, ao se utilizar os dados gerados pelo modelo para se classificar os concretos com relação à sua durabilidade usando as tabelas de classificação encontradas na bibliografia, estes geraram grandes distorções. Para corrigir tais distorções, criou-se uma nova tabela de classificação, agora baseada nos acréscimos do VPP para com o concreto de referência de relação água/cimento de 0,46. A classificação encontrada sugere que os concretos com elevados teores de substituição não possuem um bom desempenho com relação a sua durabilidade, sendo a substituição de pequenos teores dos agregados miúdos mais recomendada.



## **CAPÍTULO 8 – CONSIDERAÇÕES FINAIS**

8.1 Conclusões

8.2 Sugestões para trabalhos futuros

## **8 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

### **8.1 Conclusões**

As conclusões estão dispostas conforme os objetivos específicos propostos para o trabalho, ou seja, segundo a caracterização dos agregados confeccionados a partir da reciclagem dos principais componentes do RCD, segundo os resultados experimentais para a resistência à compressão, para o módulo de deformação, para a retração por secagem e para o volume de poros permeáveis dos concretos confeccionados com estes agregados reciclados e por fim, segundo a classificação dos concretos com agregados reciclados, quanto à durabilidade, utilizando os valores obtidos para o volume de poros permeáveis, nesta ordem.

Portanto, diante dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- tanto para os agregados miúdos quanto para os agregados graúdos, o agregado reciclado de cerâmica vermelha foi o que apresentou a maior taxa de absorção de água e o agregado natural, a menor. Os agregados reciclados de concreto e de argamassa apresentaram valores intermediários.

- Quanto à massa específica, observou-se que o agregado reciclado de cerâmica vermelha apresentou as menores massas específicas, tanto para os agregados miúdos quanto para os graúdos, e os agregados naturais, as maiores, também para ambos tipos de agregados. Para esta propriedade, os agregados reciclados de concreto e de argamassa também apresentaram valores intermediários.

- Quanto à massa unitária, para os agregados miúdos, a seqüência obtida, do material de maior massa unitária para o de menor foi: agregado natural, agregado reciclado de concreto, agregado reciclado de argamassa e agregado reciclado de cerâmica vermelha. Para os agregados graúdos, também do material de maior massa unitária para o de menor, o resultado obtido foi: agregado reciclado de concreto, agregado reciclado de cerâmica vermelha, agregado natural e agregado reciclado de argamassa.

• Foi possível modelar o comportamento da resistência à compressão dos concretos com agregados reciclados, aos 28 dias, com um elevado coeficiente de determinação ( $R^2=0,98$ ), sendo que o modelo encontrado foi:

$$f_c = \left( \frac{102,43}{5,38^{a/c}} \right) \cdot [1 - (0,338.rag + 0,152.ram + 0,275.rvg + 0,067.rcm + 0,371.rvg - 0,138.rvm)]$$

• A substituição do agregado natural pelo agregado reciclado proporcionou uma redução na resistência à compressão dos concretos, à exceção do concreto produzido com a substituição do agregado miúdo natural pelo reciclado miúdo de cerâmica vermelha, para o qual foi observado um incremento na resistência à compressão.

• A substituição do agregado graúdo natural pelos agregados graúdos reciclados produziu um efeito maior sobre a resistência à compressão do que a substituição do agregado miúdo.

• Dentre os agregados graúdos reciclados utilizados, o agregado reciclado de cerâmica vermelha exerceu a maior influência sobre a resistência à compressão e o agregado reciclado de concreto, a menor.

• Segundo o modelo obtido, o agregado miúdo reciclado de concreto exerceu pouquíssima influência negativa sobre a resistência à compressão dos concretos, seguido do agregado miúdo reciclado de argamassa. O agregado miúdo reciclado de cerâmica vermelha também exerceu uma pequena influência sobre a resistência à compressão dos concretos, embora positivamente.

• Também foi possível modelar o comportamento do módulo de deformação, aos 28 dias, com um elevado coeficiente de determinação ( $R^2=0,99$ ), sendo que o modelo encontrado foi:

$$E_c = \left( \frac{21,69}{a/c^{0,5}} \right) \cdot [1 - (0,352.rag + 0,158.ram + 0,231.rvg + 0,110.rcm + 0,440.rvg + 0,113.rvm)]$$

• A substituição do agregado natural pelo agregado reciclado proporcionou uma redução no módulo de deformação dos concretos produzidos com os mesmos, para todos os tipos de agregados reciclados utilizados.

• A substituição do agregado graúdo natural pelos agregados graúdos reciclados também produziu um efeito maior sobre o módulo de deformação do que a substituição do agregado miúdo.

• Dentre os agregados graúdos reciclados utilizados, da mesma maneira que para a resistência à compressão, o agregado reciclado de cerâmica vermelha também exerceu

a maior influência sobre o módulo de deformação e o agregado reciclado de concreto, a menor.

- Os concretos confeccionados com os agregados miúdos reciclados apresentaram um módulo de deformação mais homogêneo que os produzidos com os agregados graúdos reciclados, com perdas bastante similares.

- Os modelos propostos para a resistência à compressão e para o módulo de deformação dos concretos com agregados reciclados apresentaram valores que, quando correlacionados, obtiveram um bom coeficiente de determinação ( $R^2=0,81$ ). A equação encontrada que descreve a correlação entre tais variáveis foi:  $E_c = 2,58.f_c^{0,63}$ .

- Para a idade de 56 dias, observou-se uma excessiva variabilidade nos resultados da retração por secagem dos concretos produzidos. O modelo obtido para essa idade apresentou somente 4 das 7 variáveis como termos significativos ( $a/c$ ,  $rag$ ,  $rcg$  e  $rvg$ ), em função dessa grande variabilidade, apresentando assim um baixo coeficiente de determinação ( $R^2=0,33$ ).

- Para a idade de 224 dias, apesar do modelo construído para a retração por secagem ainda apresentar grande variabilidade, uma vez que o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) deste foi de 42%, houve a inserção de todas as variáveis no mesmo, como termos significativos. O modelo encontrado foi:

$$\varepsilon_{224} = (796.a/c^{0,5})(1 + 0,232.rvg + 0,432.rcg + 0,351.rag)(1 + 0,687.rvm + 0,412.rvm + 0,567.ram)$$

- A substituição do agregado natural pelo agregado reciclado proporcionou um acréscimo na retração por secagem aos 224 dias dos concretos produzidos com os mesmos, para todos os tipos de agregados reciclados utilizados.

- A substituição do agregado miúdo natural pelos agregados miúdos reciclados produziu um efeito maior sobre a retração por secagem aos 224 dias do que a substituição do agregado graúdo natural pelos graúdos reciclados. O efeito mais pronunciado está associado ao agregado miúdo reciclado de concreto ( $rcm$ ) e o menor efeito ao agregado graúdo reciclado de concreto ( $rcg$ ), em função da magnitude dos seus coeficientes. Entretanto, o modelo proposto deve ser tomado com cautela, uma vez que ele explica somente 42% dos efeitos dos agregados reciclados na retração por secagem dos concretos com eles confeccionados, sendo deixados de fora 58% dos efeitos.

- Ao se validar o modelo proposto para a resistência à compressão, notou-se que tal modelo descreveu muito bem o comportamento desta propriedade ao se substituir os agregados naturais pelos agregados reciclados utilizados, uma vez que o coeficiente de

determinação entre valores obtidos pelos outros pesquisadores e os valores obtidos pelo modelo proposto foram todos superiores a 86%. Entretanto, o modelo proposto não produziu valores de resistências semelhantes aos valores publicados pelos autores, uma vez que somente 35% deles obtiveram resistências não distantes de 5,5 MPa, para mais ou para menos, dos valores obtidos pelos pesquisadores.

- Ao se validar o modelo proposto para o módulo de deformação, notou-se que tal modelo descreveu muito bem o comportamento desta propriedade ao se substituir os agregados naturais pelos agregados reciclados utilizados, uma vez que o coeficiente de determinação entre valores obtidos pelos outros pesquisadores e os valores obtidos pelo modelo proposto foram todos superiores a 71%. Entretanto, o modelo proposto não produziu valores do módulo tão semelhantes aos valores publicados pelos autores, uma vez que somente 54% deles obtiveram resistências não distantes de 5,5 MPa, para mais ou para menos, dos valores obtidos pelos pesquisadores.

- Ao se simular o uso dos agregados reciclados de RCD de algumas cidades brasileiras na fabricação de concretos, verificou-se, de uma maneira geral, uma grande viabilidade no uso desses agregados reciclados como matéria-prima na fabricação de concretos, uma vez que os concretos produzidos com os mesmos ainda atingiram consideráveis resistências à compressão e módulos de deformação, principalmente quando se utilizou o agregado miúdo. Entretanto, deve-se priorizar o uso dos agregados reciclados em concretos de baixa relação água/cimento, por assim produzir concretos de menor retração por secagem, reprimindo o aparecimento de fissuras, aumentando assim a durabilidade das estruturas.

- Também foi possível modelar o comportamento do volume de poros permeáveis (VPP) dos concretos com agregados reciclados, aos 15 meses de idade, com um elevado coeficiente de determinação ( $R^2=0,93$ ), sendo que o modelo encontrado foi:

$$VPP = (15,1.a/c^{0,23})(1 + 0,40.rvg + 0,64.rvg + 0,47.rag)(1 + 0,30.rvm + 0,29.rvm + 0,20.ram)$$

- A substituição do agregado natural pelo agregado reciclado proporcionou um acréscimo no VPP dos concretos produzidos com os mesmos, para todos os tipos de agregados reciclados utilizados.

- A substituição do agregado grúdo natural pelos agregados grúdos reciclados produziu um efeito maior sobre o VPP do que a substituição do agregado miúdo.

- Dentre os agregados grúdos reciclados utilizados, o agregado reciclado de cerâmica vermelha também exerceu a maior influência sobre o VPP, seguido do

reciclado de argamassa e de concreto. Para os concretos com agregados miúdos reciclados, os resultados apresentados foram bastante similares para todos os agregados utilizados.

- Ao se utilizar os dados de VPP gerados para os concretos com agregados reciclados, classificaram-se tais concretos quanto à sua durabilidade, baseado nos acréscimos do VPP para com o concreto de referência de relação  $a/c=0,46$ , podendo-se concluir que a substituição do agregado natural pelo reciclado diminuiu o desempenho dos concretos produzidos com relação à sua durabilidade, independentemente da relação água/cimento do concreto.

- Dentre as substituições simuladas, apenas os concretos com agregados reciclados de relação água/cimento de 0,46 com o teor de 50% de substituição do agregado miúdo apresentaram uma classificação como “bom”. Todos os demais concretos simulados apresentaram um desempenho “marginal” ou “ruim”, com exceção do traço de relação água/cimento de 0,6 e substituição de 50% do agregado miúdo natural pelo reciclado de argamassa que foi considerado “normal”.

- De uma maneira geral, pode-se concluir que é possível utilizar agregados reciclados, considerando-se as variabilidades dos mesmos, na produção de concretos com desempenho mecânico e durabilidade satisfatórios, dentro das condições estudadas.

## **8.2 Sugestões para trabalhos futuros**

O uso de agregados reciclados de RCD como insumo na indústria da construção civil é um tema que ainda anseia de pesquisa no Brasil e no mundo. Nesse sentido, algumas sugestões para trabalhos futuros são abaixo mencionadas, considerando-se a linha de pesquisa deste tema que foi abordada nesta tese.

- Modelagem da resistência à compressão e do módulo de deformação dos concretos feitos com a substituição dos agregados graúdos e miúdos naturais pelos reciclados de RCD para idades mais avançadas.

- Modelagem das propriedades aqui estudadas para concretos feitos com a substituição dos agregados graúdos e miúdos naturais pelos reciclados de RCD, quando tais agregados reciclados contiverem impurezas, tais como madeira, vidro, metais, solos, dentre outras.

- Estudo da influência da substituição dos agregados graúdos e miúdos naturais pelos reciclados de RCD, em outras propriedades mecânicas do concreto, tais como,

resistência à tração, à flexão, à torção, à pulsão e ao arrancamento, dentre outras, com determinação dos modelos matemáticos que descrevem o comportamento do concreto com agregados reciclados para estas propriedades.

- Estudo da influência da substituição dos agregados graúdos e miúdos naturais pelos reciclados de RCD, em outras propriedades de durabilidade do concreto, tais como, penetração de cloretos, carbonatação, fissuração por fluência, dentre outras, com determinação dos modelos matemáticos que descrevem o comportamento do concreto com agregados reciclados para estas propriedades.

- Estudo do uso dos agregados reciclados em argamassas, com a modelagem de algumas propriedades mecânicas, como a resistência à compressão, ao arrancamento, o módulo de deformação, dentre outras, e de durabilidade, como a retração por secagem, penetração de cloretos, carbonatação, dentre outras.



## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil – 2006**. São Paulo. 157p. 2006.
- ADAMS, K. T.; PHILLIPS, P. S.; MORRIS, J. R. A radical new development for sustainable waste management in the UK: the introduction of local authority Best Value legislation. **Resources, Conservation and Recycling**, Vol. 30, p. 221-244, 2000.
- AHMED, S. A.; ALI, M. Partnerships for solid waste management in developing countries: linking theories to realities. **Habitat International**, Vol. 28, p. 467-479, 2004.
- AJDUKIEWICZ, A.; KLISZCZEWICZ, A. Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. **Cement and Concrete Composites**. Vol. 24, pg. 269-279, 2002.
- AKHTARUZZAMAN, A. A.; HASNAT, A. Properties of concrete using crushed brick as aggregate. **Concrete International**, February, p. 58-63, 1983.
- ALTHEMAN, D. Avaliação da durabilidade de concretos confeccionados com entulho de construção civil. Campinas-SP, 2002. 102 p. **Relatório Final das Atividades de Iniciação Científica**. Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas.
- ANDRADE, J. B. L. Análise do fluxo e das características físicas, químicas e microbiológicas dos resíduos de serviços de saúde: proposta de metodologia para o gerenciamento em unidades hospitalares. São Carlos-SP, 1997. 208 p. **Tese (Doutorado)**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

- ANDREWS-PHAEDONOS, F. Establishing the durability performance of structural concrete. **Technical Report**. VicRoads, Materials Technology Department. 79 pp. January, 1996.
- BAI, R.; SUTANTO, M. The practice and challenges of solid waste management in Singapore. **Waste Management**, Vol. 22, p. 557-567, 2002.
- BAIRAGI, N. K.; RAVANDE, K.; PAREEK, V. K. Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates. **Resources, Conservation and Recycling**, Vol. 9, p. 109-126, 1993.
- BAKOSS, S. L.; RAVINDRARAJAH, R. S. Recycled construction and demolition materials for use in roadworks and other local government activities. **Scoping Report**. Sydney, 1999. 72 p. Centre for Built Infrastructure Research. University of Technology, Sydney.
- BARLAZ, M. A.; KAPLAN, P. O.; RANJITHAN, S. R.; RYNK, R. Evaluating environmental impacts of solid waste management alternatives. **Biocycle**, Vol. 44, N. 10, pg. 52-56, 2003.
- BARRITT, J. The evolution of recycled aggregates for concrete. **Concrete Engineering International**, Autumn, p. 58-60, 2006.
- BEGUN, R. A.; SIWAR, C.; PEREIRA, J. J.; JAAFAR, A. H. A benefit-cost analysis on the economic feasibility of construction waste minimization: the case of Malaysia. **Resources, Conservation and Recycling**, Vol. 48, p. 86-98, 2006.
- BIANCHINI, G.; MARROCCHINO, E.; TASSINARI, R.; VACCARO, C. Recycling of construction and demolition waste materials: a chemical-mineralogical appraisal. **Waste Management**, Vol. 25, pg. 149-159, 2005.
- BIDONE, F. R. A.; POVINELLI, J. **Conceitos básicos de resíduos sólidos**. São Carlos; EESC/USP, 1999.
- BRITO FILHO, J. A. Cidades versus entulho. In: Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil, Anais. São Paulo: Comitê Técnico do IBRACON; CT 206 – Meio Ambiente, p.56-67, 1999.
- BRITO, J. de; PEREIRA, A. S.; CORREIA, J. R. Mechanical behavior of non-structural concrete made with recycled aggregates. **Cement & Concrete Composites**, Vol. 27, N. 4, pg 429-433, 2005.

- BROVIAK, P. Managing C&D debris. **Publick Works**, February, p. 29-31, 2005.
- BUENROSTRO, O.; BOCCO, G. Solid waste management in municipalities in Mexico: goals and perspectives. **Resources, Conservation and Recycling**, Vol. 39, p. 251-263, 2003.
- BURNLEY, S. J. A review of municipal solid waste composition in the United Kingdom. **Waste Management**, doi:10.1016/j.wasman.2006.06.018, 2007.
- BUTTLER, A. M. Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto – influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados. São Carlos, 2003. 199p. **Dissertação (Mestrado)** – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- CÁNOVAS, M. F. **Patologia e terapia do concreto armado**. Coordenação técnica: L. A. Falcão Bauer; Tradução: M. Celeste Marcondes, Carlos W. F. dos Santos; Beatriz Cannabrava. 399p. São Paulo: PINI, 1998.
- CASTRO, A. H. Avaliação do panorama atual da prática da coleta seletiva e da logística reversa de resíduos sólidos domiciliares em cidades brasileiras. São Carlos, 2004. 123p. **Dissertação (Mestrado)** – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- CASTRO NETO, P.P. e GUIMARAES, P.C.V. A gestão dos resíduos sólidos em São Paulo e o desafio do desenvolvimento sustentável. **Revista de Administração Pública**. São Paulo, V. 7, N. 2, p. 58-69, 2000.
- CAIXA ECONÔMICA FEDERAL (CEF). **Manejo e gestão de resíduos da construção civil**: Volume 1 – Manual de Orientação: como implantar um sistema de manejo e gestão nos municípios / Coordenadores: Tarcísio Paula Pinto, Juan Luís Rodrigo Gonzáles. Brasília, 194 p., 2005.
- CARNEIRO, A. P.; QUADROS, B. E. C.; OLIVEIRA, A. M. V.; BRUM, I. A. S.; SAMPAIO, T. S.; ALBERTE, E. PP. V.; COSTA, D. B. Características do entulho e do agregado reciclado. In: **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção** / Organizado por Alex Pires Carneiro, Irineu Antônio Schadach de Brum e José Clodoaldo da Silva Cassa. Salvador: EDUFBA; 312 p.; 2001; p. 144-187.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). Prevenção à Poluição. **Conceitos e definições**. Disponível em <[http://www.cetesb.sp.gov.br/Ambiente/prevencao\\_poluicao/conceitos.asp](http://www.cetesb.sp.gov.br/Ambiente/prevencao_poluicao/conceitos.asp)>. Acessado em 17.10.2005a.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). **Inventário estadual de resíduos sólidos domiciliares: relatório 2004**. São Paulo, CETESB, 114 p., 2005b.

DA SILVA, C. E.; HOPPE, A. E.; RAVANELLO, M. M.; MELLO, N. Medical wastes management in the south of Brazil. **Waste Management**, Vol. 25, p. 600-605, 2005.

DASKALOPOULOS, E.; BADR, O.; PROBERT S. D. Na integrated approach to municipal solid waste management. **Resources, Conservation and Recycling**, Vol. 24, p. 33-50, 1998.

DHIR, R.; PAINE, K.; DYER, T. Recycling construction and demolition wastes in concrete. **Concrete**, March, p. 25-28, 2004a.

DHIR, R.; PAINE, K.; DYER, T. TANG, A. Value-added recycling of domestic, industrial and construction arisings as concrete aggregate. **Concrete Engineering International**, Spring, p. 43-48, 2004b.

DUTCH WASTE MANAGEMENT ASSOCIATION. **Annual Report 2005**, 2005. Disponível em <[http://www.verenigingafvalbedrijven.nl/downloads/annual\\_report\\_2005.pdf](http://www.verenigingafvalbedrijven.nl/downloads/annual_report_2005.pdf)>. Acessado em 07.06.2006.

EIGHMY, T. T.; KOSSON, D. S. USA national overview on waste management. **Waste Management**, Vol. 16, N. 5/6, p. 361-366, 1996.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States: Facts and Figures for 2003**, 2003. Disponível em <<http://www.epa.gov/epaoswer/non-hw/muncpl/pubs/msw05rpt.pdf>>. Acessado em 06.06.2006.

ERIKSSON, O.; REICH, M. C.; FROSTELL, B.; BJÖRKLUND, A.; ASSEFA, G.; SUNDQVIST, J. O.; GRANATH, J.; BAKY, A.; THYSELIUS, L. Municipal solid waste management from a systems perspective. **Journal of Cleaner Production**, Vol. 13, p. 241-252, 2005.

- ESIN, T.; COSGUN, N. A study conducted to reduce construction waste generation in Turkey. **Building and Environment**, Vol. 42, p. 1667-1674, 2007.
- ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; MARÍ, A. Microstructure analysis of hardened recycled aggregate concrete. **Magazine of Concrete Research**, Vol. 58, p. 683-690, 2006.
- EUN, S.; REINHART, D. R.; COOPER, C. .D; TOWNSEND, T. G.; FAOUR, A. Hydrogen sulfide flux measurements from construction and demolition debris (C&D) landfills. **Waste Management**, Vol. 27, p. 220-227, 2007.
- EUROPEAN THEMATIC NETWORK ON RECYCLING IN CONSTRUCTION (ETNRC). **An EC report on construction and demolition waste**. Combined Vol. 1, N.1/2, March/September, p. 9. 1999.
- FINNVEDEN, G.; JOHANSSON, J.; LIND, P.; MOBERG, A. Life cycle assessment of energy from solid waste – part 1: general methodology and results. **Journal of Cleaner Production**, Vol. 13, p. 213-229, 2005.
- FREITAS, C. S.; CORREIA, R. F.; FRANÇA, K. P.; SANTANA, F. G.; LEITE, M. B. Diagnóstico do descarte clandestino de resíduos de construção e demolição em Feira de Santana/BA: estudo piloto. In: VI Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil. **Anais**. São Paulo, IBRACON, CT-206, 2003.
- GÓMEZ-SOBERÓN, J. M. V. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: na experimental study. **Cement and Concrete Research**, Vol. 32, p. 1301-1311, 2002.
- GÓMEZ-SOBERÓN, J. M. V. Relationship between gas absorption and the shrinkage and creep of recycled aggregate concrete. **Cement, Concrete and Aggregates**, Vol. 25, N. 2, p. 42-48, 2003.
- HANSEN, T. C. Recycled aggregates and recycled aggregate concrete: second state-of-art report developments 1945-1985. **Matériaux et Constructions**, Vol. 19, N. 111, 1986.
- HANSEN, T. C. Recycled aggregates and recycled aggregate concrete: third state-of-the-art report 1945-1989. In: **Recycling of Demolished Concrete and Masonry**, RILEM Technical Committee Report N. 6, Editor: T. C. HANSEN, E & FN SPON, London, p. 1-163, 1992.

- HANSEN, T. C.; BØEGH, E. Elasticity and drying shrinkage of recycled-aggregate concrete. **ACI Journal**, Vol. 82, N. 5, p. 648-652, 1985.
- HANSEN, T. C.; NARUD, H. Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. **Concrete International**, Vol. 5, N. 1, 1983.
- HARTLÉN, J. Waste management in Sweden. **Waste Management**, Vol. 16, N. 5/6, p. 385-388, 1996.
- HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: PINI, Brasília: SENAI, 1992. 349p.
- HENDRIKS, Ch. F. e JANSSEN, G. M. T. Application of construction and demolition waste. **Heron**, v. 46, N.2, p. 95-108, 2001.
- HENRICHSEN, A. Use of recycled aggregate. In: International Workshop on Recycled Aggregate. **Proceedings**. Niigata, Japan. pp. 1-8, 2000.
- HENRY, R. K.; YONGSHENG, Z.; JUN, D. Municipal solid waste management challenges in developing countries – Kenyan case study. **Waste Management**, Vol. 26, p. 92-100, 2006.
- HJELMAR, O. Waste management in Denmark. **Waste Management**, Vol. 16, N. 5/6, p. 389-394, 1996.
- HOORNWEG, D. “What a waste”: solid waste management in Asia. **UNEP Industry and Environment**, Vol. 23, N. 1-2, 65-70, 2000.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL (IBAM). **Gestão integrada de resíduos sólidos: manual gerenciamento integrado de resíduos sólidos**. Coordenação técnica: Victor Zular Zveibil. Rio de Janeiro, 2001.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa nacional de saneamento básico 2000**. Rio de Janeiro, 2002.
- INTERNATIONAL SOLID WASTE ASSOCIATION (ISWA). **International waste information**. Disponível em < [http://www.iswa.org/uploadfiles/Final\\_Waste\\_Info\\_1\\_oktober.htm](http://www.iswa.org/uploadfiles/Final_Waste_Info_1_oktober.htm) >. Acessado em 07.07.2005.
- JOHN, V. M. Aproveitamento de resíduos sólidos como materiais de construção. In: **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção /**

- Organizado por Alex Pires Carneiro, Irineu Antônio Schadach de Brum e José Clodoaldo da Silva Cassa. Salvador: EDUFBA; 312 p.; 2001; p. 27-45.
- JOHN, V. M. Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. São Paulo-SP, 2000. 102 p. **Tese (Livre Docência)**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- JOHN, V. M.; ÂNGULO, S. C. Metodologia para desenvolvimento de reciclagem de resíduos. In: **Utilização de resíduos na construção habitacional**. Editores: Janaíde Cavalcante Rocha e Vanderley Moacyr John. Porto Alegre: ANTAC, 2003 - Coleção Habitare, v. 4, 272 p.
- KAHLOO, A. R. Properties of concrete using crushed clinker brick as coarse aggregate. **ACI Materials Journal**, Vol.91, N. 2, July-August, p. 401-407, 1994.
- KARTAM, N.; AL-MUTAIRI N.; AL-GHUSAIN, I.; AL-HUMOUND, J. Environmental management of construction and demolition waste in Kuwait. **Waste Management**, Vol. 24, p. 1049-1059, 2004.
- KATZ, A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. **Cement and Concrete Research**, Vol. 33, p. 703-711, 2003.
- KATZ, A. Treatments for the improvement of recycled aggregate. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Vol. 16, N. 06, pg. 597-602, 2004.
- KAWANO, H. Outline of JIS/TR on recycled concrete using recycled aggregate. International Workshop on Recycled Aggregate. **Proceedings**. Niigata, Japan. p. 43-48, 2000.
- KHALAF, F. M. Using crushed clay brick as coarse aggregate in concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**. Vol. 18, N. 04, p. 518-526, 2006.
- KHALAF, F. M.; DeVENNY, A. Recycling of demolished masonry rubble as coarse aggregate in concrete: review. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Vol. 16, N. 04, pg. 331-340, 2004a.
- KHALAF, F. M.; DeVENNY, A. Performance of brick aggregate concrete at high temperatures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Vol. 16, N. 06, pg. 556-565, 2004b.

- KHATIB, J. M. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. **Cement and Concrete Research**, Vol. 35, p. 763-769, 2005.
- KOKUBU, K.; SHIMIZU, T.; UENO, A. Effects of recycled aggregate qualities on the mechanical properties of concrete. International Workshop on Recycled Aggregate. **Proceedings**. Niigata, Japan. pp. 107-115, 2000.
- LAMOND, J. F.; CAMPBELL, R. L.; CAMPBELL, T. R., CAZARES, J. A.; GIRALDI, A.; HALCZAK, W.; HALE, H. C.; JENKINS, N. J.; MILLER, R.; SEABROOK, P. T. Removal and reuse of hardened concrete. **ACI Materials Journal**, May-June, p. 300-325, 2002.
- LAURITZEN, E. K. The global challenge of recycled concrete. In: **Use of recycled concrete aggregate**. DHIR, HENDERSON & LIMBACHIYA eds. Tomas Telford, p. 506-519, 1998.
- LAY, J. European standardization of recycled aggregates. **Concrete Engineering International**. Autumn, p. 62-63, 2006.
- LEACH, M. A.; BAUEN, A.; LUCAS, N. J. D. A systems approach to materials flow in sustainable cities: a case study of paper. **J. Environmental Planning and Management**. V.40, n.6, p.705-723, 1997.
- LEITE, M. A. Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. Porto Alegre-RS, 2001. 270 p. **Tese (Doutorado)**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- LEITE, W. C. A. Estudo da gestão de resíduos sólidos: uma proposta de modelo tomando a unidade de gerenciamento de recursos hídricos (UGRHI-5) como referência. São Carlos-SP, 1997. 270 p. **Tese (Doutorado)**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- LEVY, S. M. Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria. São Paulo-SP, 2001. 194 p. **Tese (Doutorado)**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- LEVY, S. M. Sustentabilidade na construção civil: a contribuição do concreto. In: **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações** / ed. G. C. Isaia – São Paulo: IBRACON, 2005. 2v. p. 1551-1579.

- LIMA, J. A. R. Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos. São Carlos-SP, 1999. 222 p. **Dissertação (Mestrado)**. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- LIMBACHIYA, M. C.; LEELAWAT, T.; DHIR, R. K. Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. **Materials and Structures**, Vol. 33, November, p. 574-580, 2000.
- LIMBACHIYA, M. C.; MARROCCHINO, E.; KOULOURIS, A. Chemical-mineralogical characterization of coarse recycled concrete aggregate. **Waste Management**, Vol. 27, p. 201-208, 2007.
- LIU, Y.; TYAN, Y.; CHANG, T.; CHANG, C. An assessment of optimal mixture for concrete made with recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Research**, Vol. 34, pg. 1373-1380, 2004.
- LOUIS, G. E. A historical context of municipal solid waste management in the United States. **Waste Management Research**, Vol. 22, p. 306-322, 2004.
- LOVATO, P. S. Verificação dos Parâmetros de Controle de Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição para Utilização em Concreto. Porto Alegre, 2007. 180p. **Dissertação (Mestrado)**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- MAGRINHO A.; DIDELET, F.; SEMIAO, V. Municipal solid waste disposal in Portugal. **Waste Management**, Vol. 26, p. 1477-1489, 2006.
- MARTINS, G. D. Levantamento qualitativo dos resíduos sólidos industriais gerados nas micros e pequenas indústrias do município de São Carlos (SP) e panorama atual dos inventários estaduais. São Carlos, 2004. **Dissertação (Mestrado)**, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MASCE, N. O.; MIYAZATO, S.; YODSUDJAI, W. Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Vol 15, N. 5, pg. 443-451, 2003.
- MATTOSO, V. D. B. Classificação, quantificação e análise microbiológica dos resíduos de serviço de saúde da Santa Casa de Misericórdia de São Carlos. São Carlos-SP,

1996. 90 p. **Dissertação (Mestrado)**. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- MEHTA P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estruturas, propriedades e materiais**. São Paulo, Ed. PINI, 1994.
- MELO, A. B. Influência da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica no desenvolvimento da microestrutura dos concretos de cimento Portland. São Carlos-SP, 2000. 262 p. **Tese (Doutorado)**. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- MENDES, M. R.; ARAMAKI, T.; HANAKI, K. Comparison of the environmental impact of incineration and landfilling in São Paulo City as determined by LCA. **Resources, Conservation and Recycling**, Vol. 41, p. 47-63, 2004.
- METIN, E.; ERÖZTÜRK, A.; NEYIM, C. Solid waste management practices and review of recovery and recycling operations in Turkey. **Waste Management**, Vol. 23, p. 425-432, 2003.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, DOS RECURSOS HÍDRICOS E DA AMAZÔNIA LEGAL (MMA). Disponível em <<http://www.mma.gov.br>>. Acessado em 19.01.2007.
- MIRANDA, L. F. R. Estudo de fatores que influem na fissuração de revestimentos de argamassa com entulho reciclado. São Paulo-SP, 2000. 172 p. **Dissertação (Mestrado)**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- MOBERG, A.; FINNVEDEN, G.; JOHANSSON, J.; LIND, P. Life cycle assessment of energy from solid waste – part 2: landfilling compared to other treatment methods. **Journal of Cleaner Production**, Vol. 13, p. 231-240, 2005.
- MONTGOMERY, D.C. **Design and analysis of experiments**. New York: John. Wiley and Sons, 2001.
- NAGATAKI, S.; IIDA, K.; SAEKI, T.; HISADA, M. Properties of recycled aggregate and recycled aggregate concrete. International Workshop on Recycled Aggregate. **Proceedings**. Niigata, Japan. pp. 53-68, 2000.
- NETO, J. C. M. **Gestão dos resíduos de construção e demolição no Brasil**. São Carlos: Rima, 2005. 162 p.

- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução: Salvador E. Giammusso. 2ª ed. rev. atual. São Paulo: Pini, 1997.
- OJEDA-BENÍTEZ, S.; BERAUD-LOZANO, J. L. The municipal solid waste cycle in Mexico: final disposal. **Resources, Conservation and Recycling**, Vol. 39, p. 239-250, 2003.
- OJEDA-BENITEZ, S.; VEGA. C. A.; RAMÍREZ-BARRETO, M. E. Characterization and quantification of household solid wastes in a Mexican city. **Resources, Conservation and Recycling**, Vol. 39, p. 211-222, 2003.
- OLIVEIRA, M. J. E. Materiais descartados pelas obras de construção civil: estudos dos resíduos de concreto para a reciclagem. Rio Claro-SP, 2002. 191 p. **Tese (Doutorado)**. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- OLORUNSOGO, F. T.; PADAYACHEE, N. Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. **Cement and Concrete Research**, Vol. 32, p. 179-185, 2002.
- OTSUKI, N.; MIYAZATO, S. The influence of recycled aggregate on ITZ, permeability and strength of concrete. International Workshop on Recycled Aggregate. **Proceedings**. Niigata, Japan. pp. 77-93, 2000.
- OTSUKI, N.; YODSUDJAI, W.; NISHIDA, T.; YAMANE, H. Developed method for measuring flexural strength and modulus of elasticity of micro-regions in normal and recycled aggregate concretes. **Magazine of Concrete Research**, Vol. 55, N. 5, pg. 439-448, 2003.
- PADMINI, A. K.; RAMAMURTHY, K.; MATHEWS, M. S. Relative moisture movement through recycled aggregate concrete. **Magazine of Concrete Research**, Vol. 54, N. 5, pg. 377-384, 2002.
- PILAPITIYA, S.; VIDANAARACHCHI, C.; YUEN, S. Effects of the tsunami on waste management in Sri Lanka. **Waste Management**, Vol. 26, p. 107-109, 2006.
- PIMENTEIRA, C. A. P.; CARPIO, L. G. T.; ROSA, L. P.; TOLMANSQUIM, M. T. Solid wastes integrated management in Rio de Janeiro: input-output analysis. **Waste Management**, Vol. 25, p. 539-553, 2005.

- PINTO, T. P. Utilização de resíduos de construção: estudo do uso em argamassas. São Carlos, 1986. 140p. **Dissertação (Mestrado)** - Departamento de Arquitetura e Planejamento da Universidade de São Carlos - Universidade de São Paulo.
- PINTO, T. P. Metodologia para gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana. São Paulo-SP, 1999. 203 p. **Tese (Doutorado)**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- PINTO, T. P. Gestão dos resíduos de construção e demolição em áreas urbanas – da ineficácia a um modelo de gestão sustentável. In: **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção** / Organizado por Alex Pires Carneiro, Irineu Antônio Schadach de Brum e José Clodoaldo da Silva Cassa. Salvador: EDUFBA; 312 p.; 2001; p. 78-113.
- POON, C. S. Management of construction and demolition waste. **Waste Management**, Vol. 27, p. 159-160, 2007.
- POON, C. S.; ANN, T. W. YU; NG L. H. On site sorting of construction and demolition waste in Hong Kong. **Resources, Conservation and Recycling**, Vol. 32, p. 157-172, 2001.
- POON, C. S.; KOU, S. C.; LAM, L. Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks. **Construction and Building Materials**, Vol. 16, p. 281-289, 2002.
- POON, C. S.; SHUI, Z. H.; LAM, L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, Vol. 18, p. 461-468, 2004.
- PREFEITURA MUNICIPAL DA CIDADE DE SÃO PAULO (PMSP). Departamento de Limpeza Urbana. In: **Seminário Gestão e reciclagem de resíduos de construção e demolição - avanços e desafios**. EPUSP, São Paulo, 2005.
- QUADROS, B. E. C.; OLIVEIRA, A. M. V. Gestão diferenciada do entulho na cidade de Salvador. In: **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção** / Organizado por Alex Pires Carneiro, Irineu Antônio Schadach de Brum e José Clodoaldo da Silva Cassa. Salvador: EDUFBA; 312 p.; 2001; p. 116-141.

- RAHAL, K. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. **Building and Environmental**, Vol. 42, p. 407-415, 2007.
- RAKSHVIR, M.; BARAI, S. V. Studies on recycled aggregates-based concrete. **Waste Management and Research**, Vol. 24, p. 225-233, 2006.
- RASHWAN, M. S.; ABOURIZK, S. The properties of recycled concrete: factors affecting strength and workability. **Concrete International**, Vol. 19, N. 07, 1997.
- RAVINDRARAJAH, S. R.; STEWART, M.; GRECO, D. Variability of recycled concrete aggregate and its effects on concrete properties: a case of study in Australia. In: International Workshop on Recycled Aggregate. **Proceedings**. Niigata, Japan. pp. 9-25, 2000.
- RAVINDRARAJAH, S. R.; TAM, C. T. Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. **Magazine of Concrete Research**, Vol. 37, N. 130, 1985.
- RAVINDRARAJAH, S. R.; TAM, C. T. Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete. **Magazine of Concrete Research**, Vol. 39, N. 141, 1987a.
- RAVINDRARAJAH, S. R.; TAM, C. T. Recycling concrete as fine aggregates in concrete. **The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, Vol. 9, N. 4, 1987b.
- RIBEIRO, J. L. D.; C. S. T. CATEN. **Projeto de experimentos**. Porto Alegre: FEEng/UFRGS, 2001. 128 p.
- RIBEIRO, J. L. D. **Projeto de experimentos na otimização de produtos e processos**. Porto Alegre, PPGE/UFRRGS, 1995. Notas de aula.
- RILEM RECOMMENDATION. Specifications for concrete with recycled aggregates. 121- DRG guidance for demolition and reuse of concrete and masonry. **Materials and Structures**, Vol. 27, p. 557-559, 1994.
- RYU, J. S. An experimental study on the effect of recycled aggregate on concrete properties. **Magazine of Concrete Research**, Vol. 54, N° 01, p. 7-12, 2002a.
- RYU, J. S. Improvement on strength and impermeability of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. **Journal of Materials Science Letters**, Vol. 21, pg. 1565-1567, 2002b.

- SAGOE-CRENTSIL, K. K.; BROWN, T.; TAYLOR, A. H. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. **Cement and Concrete Research**, Vol. 31, p. 707-712, 2001.
- SAKAI, S.; SAWELL, S.; CHANDLER, A. J.; EIGHMY, T. T.; KOSSON, D. S.; VEHLLOW, J. van der SLOOT, H. A.; HARLÉN J.; HJELMAR, O. World trends in municipal solid waste management. **Waste Management**, Vol. 16, N. 5/6, p. 341-350, 1996.
- SAKAI, S. Municipal solid waste management in Japan. **Waste Management**, Vol. 16, N. 5/6, p. 395-405, 1996.
- SANI, D.; MORICONI, G.; FAVA, G. CORINALDESI, V. Leaching and mechanical behavior of concrete manufactured with recycled aggregates. **Waste Management**, Vol. 25, pg. 177-182, 2005.
- SANTOS, J. M. R.; MARTINS, M. T. Coleta seletiva de lixo: uma alternativa ecológica no manejo integrado dos resíduos sólidos urbanos. São Paulo, 1995. **Boletim Técnico**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária.
- SARDÁ, M. C.; ROCHA, J. C. Métodos de classificação e redução dos resíduos da construção civil tirados em Blumenau/SC, utilizando como base a resolução do CONAMA nº 307. In: VI Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil. **Anais**. São Paulo, IBRACON, CT-206, 2003.
- SCHALCH, V. Estratégias para a gestão e o gerenciamento de resíduos sólidos. São Carlos-SP, 2002. 149 p. **Tese (Livre Docência)**. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- SCHALCH, V., LEITE, W. C. A., FERNANDES JR., J. L., CASTRO, M. C. A. A. **Gestão e gerenciamento de resíduos sólidos**. Disciplina do curso de Pós-graduação em Hidráulica e Saneamento. São Carlos (Apostila), 91 p., 2002. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.
- SCHULZ, R. R.; HENDRICKS, Ch. F. Recycling of masonry rubble. In: **Recycling of Demolished Concrete and Masonry**, RILEM Technical Committee Report N. 6, Editor: T. C. HANSEN, E & FN SPON, London, p. 164-255, 1992.

- SENTHAMARAI, R. M.; MANOHARAN, P. D. Concrete with ceramic waste aggregate. **Cement and Concrete Composites**. Vol. 27, p. 910-913, 2005.
- SGS UNITED KINGDOM LTD. **Curso avançado para auditores SGA**. Manual do Curso. São Paulo/SP, 181 p., 2005.
- SHARHOLY, M.; AHMAD, K.; MAHMOOD, G.; TRIVEDI, R. C. Municipal solid waste management in Indian cities – a review. **Waste Management**, doi:10.1016/j.wasman.2007.02.008, 2007.
- SHAYAN A.; XU, A. Performance and properties of structural concrete made with recycled concrete aggregate. **ACI Materials Journal**, Vol. 100, N. 5, p. 371-380, 2003.
- SILVA, I. J. Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura. São Carlos-SP, 2000. 242 p. **Tese (Doutorado)**. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- SOUZA, M. P. **Instrumentos de gestão ambiental: Fundamentos e prática**. São Carlos-SP: Editora Riani Costa, 112 p., 2000.
- SOUZA, U. E. L., AGOPYAN, V., PALIARI, J. C., ANDRADE, A. C. Simpósio Nacional. Desperdício de Materiais nos Canteiros de Obras: A Quebra do Mito. **Anais**. São Paulo. PCC/EPUSP, 1999.
- TAM, V. W. Y.; GAO, X. F.; TAM, C. M. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. **Cement and Concrete Research**, Vol. 35, p. 1195-1203, 2005.
- TAM, V. W. Y.; TAM, C. M. A review on the viable technology for construction waste recycling. **Resources, Conservation and Recycling**. Vol. 47, p. 209-221, 2006.
- TAVAKOLI, M.; SOROUSHIAN, P. Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate. **ACI Materials Journal**, March-April, p. 182-190, 1996a.
- TAVAKOLI, M.; SOROUSHIAN, P. Drying shrinkage behavior of recycled aggregate concrete. **Concrete International**, Vol. 18, N. 11, p. 58-61, 1996b.

- TERRY, M. Waste minimization in the construction and demolition industry. Sydney, 2004. 78p. **Capstone Project (Thesis of Bachelor of Civil & Environmental Engineering)** – Faculty of Engineering, University of Technology, Sydney.
- TOPÇU, I. B. Physical and mechanical properties of concretes produced with waste concrete. **Cement and Concrete Research**, Vol. 27, N. 12, p. 1817-1823, 1997.
- TOPÇU, I. B.; SENDEL, S. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. **Cement and Concrete Research**, Vol. 34, pg. 1307-1312, 2004.
- TSUJI, M.; SAWAMOTO, T.; KIMACHI, Y. Technical method to improve properties of recycled aggregate concrete. International Workshop on Recycled Aggregate. **Proceedings**. Niigata, Japan. pp. 105-176, 2000.
- TU, T.; CHEN Y.; HWANG, C. Properties of HPC with recycled aggregates. **Cement and Concrete Research**, Vol. 36, p. 943-950, 2006.
- UJIKE, I. Air and water permeability of concrete with recycled aggregate. International Workshop on Recycled Aggregate. **Proceedings**. Niigata, Japan. pp. 95-106, 2000.
- VALLE, C. E. **Qualidade ambiental: ISO 14000**. São Paulo-SP: Editora Senac, 5ª ed., 195 p., 2004.
- VÁZQUEZ, E. Recycling of aggregates in Spain. International Workshop on Recycled Aggregate. **Proceedings**. Niigata, Japan. pp. 27-41, 2000.
- VEHLOW, J. Municipal solid waste management in Germany. **Waste Management**, Vol. 16, N. 5/6, p. 367-374, 1996.
- VIEIRA, C. M. F.; CARDOSO, B. R.; MONTEIRO, S. N. Influência da adição de argila fundente em massa de cerâmica vermelha caulínica. In: Jornadas SAM/CONAMET/ SIMPÓSIO MATÉRIA 2003. **Anais**. P. 796-799, 2003.
- VIEIRA, G. L. 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-RS, 2003. 151p. **Dissertação (Mestrado)**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- XIAO, J.; FALKNER, H. Bond behavior between recycled aggregate concrete and steel rebars. **Construction and Building Materials**, Vol. 21, pg. 395-401, 2007.

- XIAO, J.; LI, J.; ZHANG, Ch. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. **Cement and Concrete Research**, Vol. 35, pg. 1187-1194, 2005.
- XIAO, J.; SUN, Y.; FALKNER, H. Seismic performance of frame structures with recycled aggregate concrete. **Engineering Structures**, Vol. 28, p. 1-8, 2006.
- WANG, H.; NIE, Y. Municipal solid waste characteristics and management in China. **Journal of the Air and Waste Management Association**, Vol. 51, February, p. 250-263, 2001.
- WEIL, M.; JESKE, U.; SCHEBEK, L. Closed-loop recycling of construction and demolition waste in Germany in view of stricter environmental threshold values. **Waste Management and Research**, Vol. 24, p. 197-206, 2006.
- WEITZ, K. A.; THORNELOE, S. A.; NISHTALA, S. R.; YARKOSKY, S.; ZANNES, M. The impact of municipal solid waste management on greenhouse gas emissions in the United States. **Journal of the Air and Waste Management**, Vol. 52, September, p. 1000-1011, 2002.
- WERKEMA, M. C. C.; AGUIAR, S. **Planejamento e análise de experimentos: como identificar e avaliar as principais variáveis influentes em um processo**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1996. 294 p.
- WOLFE, P. Tsunami recovery costs US\$1.5 billion in Sri Lanka. **Water and Wastewater International**, Vol. 20, N. 1, p.9, 2005.
- WORLD BANK. **World Development Indicators 2000**. Washington, DC, March, 2000.
- ZAHARIEVA, R.; BUYLE-BODIN, F.; SKOCZYLAS, F. WIRQUIN, E. Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Composites**, Vol. 25, pg. 223-232, 2003.
- ZAKARIA, M.; CABRERA, J. G. Performance and durability of concrete made with demolition waste and artificial fly ash-clay aggregates. **Waste Management**, Vol. 16, N. 1-3, p. 151-158, 1996.
- ZORDAN, S. E. Utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto. Campinas-SP, 1997. 140 p. **Dissertação (Mestrado)**. Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas.



## ANEXOS

ANEXO A – LEGISLAÇÃO AMBIENTAL BRASILEIRA SOBRE  
RESÍDUOS SÓLIDOS

ANEXO B - ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA  
DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE  
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

ANEXO C – TRAÇOS DE CONCRETOS PRODUZIDOS

ANEXO D – PROCEDIMENTO PARA REALIZAÇÃO DA LEITURA DA  
RETRAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA

ANEXO E – RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À  
COMPRESSÃO

ANEXO F – RESULTADOS DO ENSAIO DE MÓDULO DE  
DEFORMAÇÃO

ANEXO G – RESULTADOS DO ENSAIO DE RETRAÇÃO POR  
SECAGEM

ANEXO H – RESULTADOS DAS ANÁLISES DE REGRESSÃO  
MÚLTIPLA

## **ANEXOS**

**ANEXO A – LEGISLAÇÃO AMBIENTAL BRASILEIRA SOBRE  
RESÍDUOS SÓLIDOS**

Requisito	Escopo	Resumo/Título
Constituição de 1988	Federal	Nos seus artigos 23, 196 e 225, incisos X, VI e IX, respectivamente, sem mencionar lixo, apresenta uma preocupação com a saúde do cidadão, mediante políticas sociais e econômicas e com a defesa e preservação do meio ambiente, mantendo-o ecologicamente equilibrado.
Lei 6.938 de 31/08/81	Federal	Prevê o Sistema de Licenciamento Ambiental, cria o SISNAMA
Decreto 99.274 de 06/06/90	Federal	Regulamenta o Sistema de Licenciamento Ambiental
Lei 6.902 de 27/04/81	Federal	Dispõe sobre a criação da Estação Ecológica, Áreas de Proteção Ambiental e dá outras providências
Resolução CONAMA 1 de 23/01/86	Federal	Trata dos Estudos de Impacto Ambiental (EIA) e Relatórios de Impacto do Meio Ambiente (RIMA). Foi alterada pelo Resolução CONAMA 11 de 18/03/86
Lei 9.659 de 12/02/98	Federal	Dispõe sobre as ações penais e administrativas derivadas de conduta e atividades lesivas ao meio ambiente e dá outras providências (Lei de Crimes Ambientais)
Lei 997 de 31/05/76	Estado de SP	Dispõe sobre controle da poluição do meio ambiente
Decreto 8.468/76	Estado de SP	Aprova o regulamento da Lei 997 e dispõe sobre a poluição do solo
Decreto 50.887/61	Federal	Dispõe sobre o lançamento de resíduos tóxicos ou oleosos nas águas interiores ou litorâneas do país e dá outras providências (alterada pela Lei 6.513/77)
Portaria Ministerial 53 de 01/03/79	Federal	Estabelecem as normas para projetos específicos de tratamento e disposição de resíduos sólidos, bem como a fiscalização da sua implantação, operação e manutenção
Resolução CONAMA 6 de 15/07/88	Federal	Exige o estabelecimento dos inventários dos tipos e quantidades dos resíduos gerados pelas empresas
Resolução CONAMA 8 de 19/09/91	Federal	Veta a entrada de materiais residuais destinados à disposição final e incineração no país
Resolução CONAMA 5 de 05/08/93	Federal	Dispõe sobre o tratamento de resíduos gerados em estabelecimentos de saúde, portos, aeroportos e terminais rodoviários e ferroviários
Lei 8.999 de 26/12/94	Estado de SP	Proíbe a utilização de embalagens descartáveis espumadas em cujo processo de fabricação seja utilizado o CFC (cloro-flúor-carbono) como agente expensor

Requisito	Escopo	Resumo/Título
Resolução CONAMA 23 de 12/12/96	Federal	Estabelece critérios para importação e exportação de resíduos sólidos, estabelecendo ainda a classificação desses resíduos
Portaria nº961 de 10/11/98	Federal	Regula os processos de autorização das operações de gestão de resíduos industriais, sólidos urbanos e outros tipos de resíduos
Deliberação CONAMA 13 de 28/08/98	Federal	Aprova as diretrizes estratégicas para a disposição do lodo de ETE
Resolução CONAMA 257 de 30/06/99	Federal	Dispõe sobre o uso de pilhas e baterias que contenham em sua decomposição chumbo, cádmio, mercúrio e seus compostos necessários ao funcionamento de qualquer tipo de aparelho, veículo ou sistemas, bem como produtos eletroeletrônicos
Lei 10.888 de 20/09/01	Federal	Dispõe sobre o descarte final de produtos potencialmente perigosos do resíduo urbano (pilhas, baterias, lâmpadas fluorescentes e frascos aerossóis em geral) que contenham metais pesados e dá outras providências
Resolução conjunta SMA/SS – 1 de 05/03/02	Federal	Dispõe sobre a tritura ou retalhamento de pneus para fins de disposição em aterros sanitários e dá providências
Resolução CONAMA 308 de 21/03/02	Federal	Dispõe sobre o licenciamento ambiental dos sistemas de disposição final dos resíduos sólidos urbanos gerados em municípios de pequeno porte
Decreto 96044 de 18/05/88	Federal	Aprova o regulamento para o transporte rodoviário de produtos perigosos e dá outras providências
Resolução 6.05 de 27/11/85	Federal	Resolução da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) que aprova a norma experimental: gerência de rejeitos radioativos em instalações radioativas
Resolução CONAMA 6 de 19/09/91	Federal	Desobriga a incineração ou qualquer outro tratamento de queima de resíduos sólidos provenientes dos estabelecimentos de saúde, porto e aeroportos, ressalvados os casos previstos em lei e acordos internacionais
Portaria do Ministério do Interior nº53 de 12/03/79	Federal	Estabelece normas aos projetos específicos de tratamento e disposição de resíduos sólidos, bem como a fiscalização de sua implantação, operação e manutenção
Resolução CONAMA 283 de 07/12/01	Federal	Dispõe sobre o tratamento e a destinação final de resíduos dos serviços de saúde
NBR 12.807/93	Federal	Resíduos de serviço de saúde - terminologia

Requisito	Escopo	Resumo/Título
NBR 12.808/93	Federal	Resíduos de serviço de saúde – classificação
NBR 12.809/93	Federal	Manuseio de resíduos de serviço de saúde – procedimento
NBR 12.810/93	Federal	Coleta de resíduos de serviço de saúde – procedimento
Resolução CONAMA 307 de 05/07/02	Federal	Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil
Decreto Lei 1.413 de 14/08/75	Federal	Dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente provocada por atividades industriais
Decreto 10.229 de 29/08/77	Estado de SP	Acrescenta dispositivo ao regulamento aprovado pelo Decreto 8.468/76, que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição no meio ambiente
Resolução CONAMA 3 de 28/07/90	Federal	Dispõe sobre os padrões de qualidade do ar
Resolução CONAMA 313 de 29/10/02	Federal	Dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais
Lei 9.795 de 27/04/99	Federal	Dispõe sobre educação ambiental, institui a política nacional de educação ambiental e dá outras providências
Lei Estadual 12.300 de 2006	Estado de SP	Institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos e define princípios e diretrizes.

## **ANEXO B - ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

### **1. OBJETIVO**

Este ensaio tem como objetivo determinar a taxa de absorção de agregados de resíduos de construção e demolição, visando sua aplicação no estudo da dosagem e produção de concretos.

### **2. APARELHAGEM**

#### **2.1. Balança**

2.1.1. A balança utilizada deve ter resolução mínima de 0,01 g, ser digital e ter capacidade compatível com a massa a determinar.

2.1.2. Deve haver um dispositivo para manter suspenso na água, pelo centro do prato da balança, o recipiente que contém a amostra.

#### **2.2. Recipientes para amostra**

2.2.1. O recipiente utilizado para a amostra do agregado reciclado é composto de um caixilho metálico com tampa, no qual está estendida no fundo uma tela de fios metálicos de abertura nominal de 0,044 mm fixada de forma contínua em todo o seu contorno.

2.2.2. Na tampa do recipiente também deve ser estendida uma tela de fios metálicos de abertura nominal de 0,044 mm fixada de forma contínua em todo o seu contorno. A tampa deve estar perfeitamente ajustada sobre a abertura do caixilho metálico de forma a não permitir a passagem de qualquer partícula de material. Além disso, a tampa deve ser dotada de um sistema de fixação para que não se solte no caixilho durante a execução do ensaio.

2.2.3. O caixilho metálico deve possuir suportes laterais que permitam sua fixação ao dispositivo de pesagem que fica sobre o prato da balança, permitindo que o mesmo fique suspenso em água.

### **3. PREPARAÇÃO DA AMOSTRA**

3.1. A amostra de agregado reciclado deve ser coletada de acordo com a NBR 7216 (1982) e reduzida conforme a NBR 9941 (1987).

### **4. EXECUÇÃO DO ENSAIO**

4.1. Determinar a massa do recipiente para a amostra seco e massa do recipiente submerso.

4.2. Secar a amostra por 24 horas, à temperatura de (105 – 110) °C.

4.3. Deixar a amostra resfriar ao ar à temperatura ambiente. Pesquisar uma quantidade de material da amostra seca e fria entre 1000 e 1500 g. Determinar a massa da amostra seca em estufa ( $M_{seca}$ ).

4.4. Colocar a amostra seca no recipiente para a amostra, tampar e fixar a tampa ao caixilho metálico.

4.5. Submergir o recipiente com a amostra cuidadosamente em água à temperatura ambiente. Executar a primeira leitura da massa do conjunto entre 30 e 60 segundos após a imersão do recipiente em água. NOTA: Este é um tempo considerado necessário para que haja uma certa estabilização da leitura da massa do conjunto.

4.6. Efetuar leituras consecutivas do ganho de massa do conjunto em intervalos predeterminados apresentados na Tabela abaixo.

4.7. Antes da realização de cada leitura o material deve ser cuidadosamente agitado para facilitar a saída do ar aprisionado entre as partículas de agregados.

4.8. O ensaio deve ser realizado durante 24 horas.

4.9. Ao fim das 24 horas de ensaio, deve ser escoado o excesso de água presente na amostra e o recipiente com a amostra deve ser colocado em estufa para que o material possa secar até estabilidade de massa. A massa do conjunto deve ser determinada para que com isso se obtenha a massa da amostra após o ensaio, calculando a perda de material durante o ensaio.

## 5. RESULTADOS

5.1. Calcular a taxa de absorção do material seco e a taxa de absorção do material submerso com o auxílio das expressões:

$$A_{SECA} (\%) = \frac{M_{SUB-F} - M_{SUB-0}}{M_{SECA}}$$

$$A_{SUB} (\%) = \frac{M_{SUB-F} - M_{SUB-0}}{M_{SUB-0}}$$

Onde:

$A_{SECA} (\%)$  = Taxa de absorção do material seco

$A_{SUB} (\%)$  = Taxa de absorção do material submerso

$M_{SUB-F}$  = Massa do material submerso no instante final, em g

$M_{SUB-0}$  = Massa do material submerso no instante inicial, em g

$M_{SECA}$  = Massa do material seco em estufa, em g

5.2. A taxa de absorção final dos agregados é a média entre os resultados da taxa de absorção do material seco e a taxa de absorção do material submerso.

5.3. Devem ser realizadas no mínimo duas determinações consecutivas com amostras do mesmo agregado.

5.4. O resultado é a média entre os resultados de cada determinação e deve ser expresso com dois algarismos significativos.

5.5. Deve ser calculado o percentual de perda do material durante o ensaio, que deve ser menor ou igual a 5 %.

5.6. Construir o gráfico de absorção de água percentual em função do tempo em minutos.

5.7. O cálculo da absorção em g é realizado através da expressão:

$$A(g) = \frac{M_n}{M_0}$$

Onde:

$A(g)$  = Massa de água absorvida até o instante n, em g

$M_n$  = Massa do conjunto submerso no instante n, em g

$M_0$  = Massa do conjunto submerso no instante inicial, em g

5.8. O cálculo da absorção % é realizado através da expressão:

$$A_n(\%) = \frac{A(g)_n}{A(g)_{24h}} \times 100$$

Onde:

$A_n(\%)$  = Absorção de água percentual no instante n

$A(g)_n$  = Massa de água absorvida até o instante n, em g

$A(g)_{24h}$  = Massa de água absorvida em 24 horas de ensaio, em g

ENSAIO DE ABSORÇÃO DO MATERIAL RECICLADO					
Tipo de agregado:					
Massa do recipiente seco (g) =					
Massa do recipiente submerso (g) =					
Massa da amostra seca antes do ensaio (g) =					
Massa da amostra seca depois do ensaio (g) =					
Tempo (hh:mm)	Intervalo para leitura	Ganho de massa (g)	Intervalo (min)	Absorção (g)	Absorção percentual (%)
	Inicial		0		
	1 min		1		
	2 min		2		
	3 min		3		
	4 min		4		
	5 min		5		
	6 min		6		
	7 min		7		
	8 min		8		
	9 min		9		
	10 min		10		
	15 min		15		
	20 min		20		
	25 min		25		
	30 min		30		
	40 min		40		
	50 min		50		
	1h		60		
	1h 15min		75		
	1h 30min		90		
	1h 45min		105		
	2h		120		
	3h		180		
	4h		240		
	5h		300		
	6h		360		
	24h		1440		

## ANEXO C – TRAÇOS DE CONCRETOS PRODUZIDOS

Traço nº	A/c	Agregado Grosso					Agregado Miúdo					SEM COMPENSAÇÃO DE VOLUME									
		% AGN	% AGC	% AGCV	% AGA	% AMN	% AMC	% AMCV	% AMA	Cimento (kg)	C.AGN <sup>1</sup> (kg)	AGC (kg)	AGCV (kg)	AGA (kg)	AMN (kg)	AMC (kg)	AMCV (kg)	AMA (kg)			
1	0,46	100%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	5,952	15,000	0,000	0,000	0,000	9,642	0,000	0,000	0,000			
4	0,46	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	5,952	15,000	0,000	0,000	0,000	0,000	4,821	4,821	0,000	0,000			
6	0,46	0%	0%	0%	100%	0%	0%	50%	5,952	0,000	0,000	0,000	15,000	0,000	4,821	4,821	4,821	4,821			
7	0,46	0%	0%	0%	100%	0%	0%	50%	5,952	0,000	0,000	0,000	15,000	0,000	4,821	0,000	0,000	9,642			
9	0,46	0%	0%	0%	100%	0%	0%	33%	5,952	0,000	0,000	15,000	0,000	0,000	3,214	3,214	3,214	3,214			
12	0,46	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	5,952	0,000	0,000	15,000	0,000	0,000	0,000	9,642	0,000	0,000			
14	0,46	0%	0%	0%	50%	0%	0%	0%	5,952	0,000	0,000	7,500	7,500	0,000	9,642	0,000	0,000	0,000			
15	0,46	0%	0%	0%	50%	0%	0%	100%	5,952	0,000	0,000	7,500	7,500	0,000	9,642	0,000	0,000	0,000			
17	0,46	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	5,952	0,000	15,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	9,642	9,642			
20	0,46	0%	100%	0%	0%	0%	0%	33%	5,952	0,000	15,000	0,000	0,000	0,000	3,214	3,214	3,214	3,214			
22	0,46	0%	50%	0%	50%	0%	0%	100%	5,952	0,000	7,500	0,000	7,500	0,000	0,000	9,642	0,000	0,000			
23	0,46	0%	50%	0%	50%	0%	0%	100%	5,952	0,000	7,500	0,000	7,500	0,000	9,642	0,000	0,000	0,000			
25	0,46	0%	50%	0%	50%	0%	0%	0%	5,952	0,000	7,500	7,500	0,000	9,642	0,000	0,000	0,000	0,000			
28	0,46	0%	50%	0%	50%	0%	0%	50%	5,952	0,000	7,500	7,500	0,000	4,821	4,821	0,000	0,000	0,000			
30	0,46	0%	33%	33%	33%	0%	0%	50%	5,952	0,000	5,000	5,000	5,000	0,000	4,821	4,821	4,821	4,821			
31	0,46	0%	33%	33%	33%	0%	0%	50%	5,952	0,000	5,000	5,000	5,000	0,000	4,821	0,000	4,821	4,821			
45	0,80	0%	33%	33%	33%	0%	0%	33%	3,521	0,000	5,000	5,000	5,000	0,000	4,025	4,025	4,025	4,025			
46	0,40	0%	33%	33%	33%	0%	0%	33%	6,787	0,000	5,000	5,000	5,000	0,000	2,941	2,941	2,941	2,941			
49	0,46	25%	25%	25%	25%	25%	0%	25%	5,952	3,750	3,750	3,750	3,750	2,411	2,411	2,411	2,411	2,411			
2	0,74	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	3,797	15,000	0,000	0,000	0,000	0,000	11,809	0,000	0,000	0,000			
3	0,74	100%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	3,797	15,000	0,000	0,000	0,000	0,000	11,809	0,000	0,000	0,000			
5	0,74	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	3,797	0,000	0,000	0,000	15,000	0,000	0,000	0,000	11,809	11,809			
8	0,74	0%	0%	0%	0%	100%	0%	33%	3,797	0,000	0,000	0,000	15,000	0,000	3,936	3,936	3,936	3,936			
10	0,74	0%	0%	0%	100%	0%	0%	50%	3,797	0,000	0,000	15,000	0,000	0,000	5,904	5,904	5,904	5,904			
11	0,74	0%	0%	0%	100%	0%	0%	50%	3,797	0,000	0,000	15,000	0,000	0,000	5,904	0,000	0,000	5,904			

Traço nº	COM COMPENSAÇÃO DE VOLUME DO AGREGADO										COMPENSAÇÃO ÁGUA (80% ABSORÇÃO)									
	Cimento (kg)	C.AGN (kg)	AGC (kg)	AGCV (kg)	AGA (kg)	AMN (kg)	AMC (kg)	AMCV (kg)	AMA (kg)	AGC (kg)	AGCV (kg)	AGA (kg)	AMC (kg)	AMCV (kg)	AMA (kg)					
1	5,952	15,000	0,000	0,000	0,000	9,642	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000					
4	5,952	15,000	0,000	0,000	0,000	0,000	4,675	4,748	0,000	0,000	0,000	0,282	0,406	0,000	0,000					
6	5,952	0,000	0,000	0,000	10,505	0,000	0,000	4,748	4,292	0,000	0,000	0,800	0,000	0,406	0,142					
7	5,952	0,000	0,000	0,000	10,505	0,000	4,675	0,000	4,292	0,000	0,000	0,282	0,000	0,000	0,284					
9	5,952	0,000	0,000	9,721	0,000	0,000	0,000	0,000	8,583	0,000	1,215	0,000	0,000	0,000	0,284					
12	5,952	0,000	0,000	9,721	0,000	0,000	3,116	3,165	2,861	0,000	1,215	0,000	0,188	0,271	0,095					
14	5,952	0,000	0,000	4,861	5,253	0,000	0,000	9,496	0,000	0,000	0,607	0,400	0,000	0,812	0,000					
15	5,952	0,000	0,000	4,861	5,253	0,000	9,350	0,000	0,000	0,000	0,607	0,400	0,565	0,000	0,000					
17	5,952	0,000	11,864	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	8,583	0,536	0,000	0,000	0,000	0,284	0,000					
20	5,952	0,000	11,864	0,000	0,000	0,000	3,116	3,165	2,861	0,536	0,000	0,000	0,188	0,271	0,095					
22	5,952	0,000	5,932	0,000	5,253	0,000	0,000	9,496	0,000	0,268	0,000	0,400	0,000	0,812	0,000					
23	5,952	0,000	5,932	0,000	5,253	0,000	9,350	0,000	0,268	0,000	0,400	0,565	0,000	0,000	0,000					
25	5,952	0,000	5,932	4,861	0,000	9,642	0,000	0,000	0,268	0,607	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000					
28	5,952	0,000	5,932	4,861	0,000	4,675	4,748	0,000	0,268	0,607	0,000	0,282	0,406	0,000	0,000					
30	5,952	0,000	3,954	3,240	3,501	0,000	0,000	4,748	4,292	0,179	0,405	0,267	0,000	0,406	0,142					
31	5,952	0,000	3,954	3,240	3,501	0,000	4,675	0,000	4,292	0,179	0,405	0,267	0,282	0,000	0,142					
45	3,521	0,000	3,954	3,240	3,501	0,000	3,903	3,964	3,583	0,179	0,405	0,267	0,236	0,339	0,118					
46	6,787	0,000	3,954	3,240	3,501	0,000	2,852	2,896	2,618	0,179	0,405	0,267	0,172	0,248	0,086					
49	5,952	3,750	2,966	2,430	2,626	2,411	2,338	2,374	2,146	0,134	0,304	0,200	0,141	0,203	0,071					
2	3,797	15,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	11,630	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,995	0,000					
3	3,797	15,000	0,000	0,000	0,000	0,000	11,451	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,692	0,000	0,000					
5	3,797	0,000	0,000	0,000	10,505	0,000	0,000	0,000	10,512	0,000	0,000	0,800	0,000	0,347	0,000					
8	3,797	0,000	0,000	0,000	10,505	0,000	3,817	3,876	3,503	0,000	0,800	0,231	0,331	0,116	0,000					
10	3,797	0,000	0,000	9,721	0,000	0,000	0,000	5,815	5,256	0,000	1,215	0,000	0,000	0,497	0,174					
11	3,797	0,000	0,000	9,721	0,000	0,000	5,725	0,000	5,256	0,000	1,215	0,000	0,346	0,000	0,174					

Traço nº	A/c	Agregado Graúdo						Agregado Miúdo						SEM COMPENSAÇÃO DE VOLUME										
		% AGN	% AGC	% AGCV	% AGA	% AMN	% AMC	% AMCV	% AMA	Cimento (kg)	C.AGN (kg)	AGC (Kg)	AGCV (kg)	AGA (kg)	AMN (kg)	AMC (kg)	AMCV (kg)	AMA (kg)						
13	0,74	0%	0%	50%	50%	50%	100%	0%	0%	50%	50%	0%	3,797	0,000	0,000	7,500	7,500	7,500	11,809	0,000	5,904	5,904	0,000	0,000
16	0,74	0%	0%	50%	50%	50%	0%	0%	50%	50%	50%	0%	3,797	0,000	0,000	7,500	7,500	7,500	0,000	0,000	5,904	5,904	5,904	5,904
18	0,74	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	50%	50%	50%	3,797	0,000	15,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	5,904	5,904	5,904	5,904
19	0,74	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	50%	0%	0%	50%	3,797	0,000	15,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	5,904	5,904	5,904	5,904
21	0,74	0%	50%	0%	50%	50%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	3,797	0,000	7,500	0,000	7,500	7,500	11,809	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
24	0,74	0%	50%	0%	50%	50%	0%	0%	50%	50%	50%	0%	3,797	0,000	7,500	0,000	7,500	7,500	0,000	5,904	5,904	5,904	5,904	0,000
26	0,74	0%	50%	50%	50%	0%	0%	0%	0%	100%	100%	0%	3,797	0,000	7,500	7,500	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	11,809	11,809	0,000
27	0,74	0%	50%	50%	50%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	3,797	0,000	7,500	7,500	0,000	0,000	0,000	11,809	0,000	0,000	0,000	0,000
29	0,74	0%	33%	33%	33%	33%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	3,797	0,000	5,000	5,000	5,000	5,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	11,809
32	0,74	0%	33%	33%	33%	33%	0%	0%	33%	33%	33%	33%	3,797	0,000	5,000	5,000	5,000	5,000	0,000	3,936	3,936	3,936	3,936	3,936
33	0,60	0%	50%	25%	25%	25%	0%	0%	33%	33%	33%	33%	4,644	0,000	7,500	3,750	3,750	3,750	0,000	3,668	3,668	3,668	3,668	3,668
34	0,60	0%	0%	50%	50%	50%	0%	0%	33%	33%	33%	33%	4,644	0,000	0,000	7,500	7,500	7,500	0,000	3,668	3,668	3,668	3,668	3,668
41	0,60	0%	33%	33%	33%	33%	0%	0%	25%	50%	50%	25%	4,644	0,000	5,000	5,000	5,000	5,000	0,000	2,752	5,503	5,503	2,752	2,752
42	0,60	0%	33%	33%	33%	33%	0%	0%	50%	0%	50%	50%	4,644	0,000	5,000	5,000	5,000	5,000	0,000	5,503	0,000	5,503	5,503	5,503
43	0,60	0%	33%	33%	33%	33%	0%	0%	25%	25%	50%	50%	4,644	0,000	5,000	5,000	5,000	5,000	0,000	2,752	2,752	2,752	2,752	5,503
44	0,60	0%	33%	33%	33%	33%	0%	0%	50%	50%	0%	0%	4,644	0,000	5,000	5,000	5,000	5,000	0,000	5,503	5,503	5,503	5,503	0,000
47	0,60	0%	33%	33%	33%	33%	0%	0%	33%	33%	33%	33%	4,644	0,000	5,000	5,000	5,000	5,000	0,000	3,668	3,668	3,668	3,668	3,668
48	0,74	0%	33%	33%	33%	33%	0%	0%	33%	33%	33%	33%	3,797	0,000	5,000	5,000	5,000	5,000	0,000	3,668	3,668	3,668	3,668	3,668
50	0,74	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	3,797	3,750	3,750	3,750	3,750	3,750	2,952	2,952	2,952	2,952	2,952	2,952
35	0,60	0%	25%	50%	50%	25%	0%	0%	33%	33%	33%	33%	4,644	0,000	3,750	7,500	3,750	3,750	0,000	3,668	3,668	3,668	3,668	3,668
36	0,60	0%	50%	0%	0%	50%	0%	0%	33%	33%	33%	33%	4,644	0,000	7,500	0,000	7,500	7,500	0,000	3,668	3,668	3,668	3,668	3,668
37	0,60	0%	25%	25%	25%	50%	0%	0%	33%	33%	33%	33%	4,644	0,000	3,750	3,750	7,500	7,500	0,000	3,668	3,668	3,668	3,668	3,668
38	0,60	0%	50%	50%	50%	0%	0%	0%	33%	33%	33%	33%	4,644	0,000	7,500	7,500	0,000	0,000	0,000	3,668	3,668	3,668	3,668	3,668
39	0,60	0%	33%	33%	33%	33%	0%	0%	50%	50%	25%	25%	4,644	0,000	5,000	5,000	5,000	5,000	0,000	5,503	2,752	2,752	2,752	2,752
40	0,60	0%	33%	33%	33%	33%	0%	0%	0%	50%	50%	50%	4,644	0,000	5,000	5,000	5,000	5,000	0,000	0,000	0,000	5,503	5,503	5,503

Traço nº	COM COMPENSAÇÃO DE VOLUME DO AGREGADO											COMPENSAÇÃO ÁGUA (80% ABSORÇÃO)										
	Cimento (kg)	C/AGN (kg)	AGC (Kg)	AGCV (kg)	AGA (kg)	AMN (kg)	AMC (kg)	AMCV (kg)	AMA (kg)	AGC (kg)	AGCV (kg)	AGA (kg)	AMC (kg)	AMCV (kg)	AMA (kg)							
13	3.797	0,000	0,000	4,861	5,253	11,809	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000							
16	3.797	0,000	0,000	4,861	5,253	0,000	5,725	5,815	0,000	0,000	0,000	0,000	0,346	0,497	0,000							
18	3.797	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	5,815	5,256	0,000	0,000	0,000	0,000	0,497	0,174							
19	3.797	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	5,725	0,000	5,256	0,536	0,000	0,000	0,346	0,000	0,174							
21	3.797	0,000	5,932	0,000	5,253	11,809	0,000	0,000	0,000	0,268	0,000	0,400	0,000	0,000	0,000							
24	3.797	0,000	5,932	0,000	5,253	0,000	5,725	5,815	0,000	0,268	0,000	0,400	0,346	0,497	0,000							
26	3.797	0,000	5,932	4,861	0,000	0,000	0,000	11,630	0,000	0,268	0,607	0,000	0,000	0,995	0,000							
27	3.797	0,000	5,932	4,861	0,000	0,000	11,451	0,000	0,000	0,268	0,607	0,000	0,692	0,000	0,000							
29	3.797	0,000	3,954	3,240	3,501	0,000	0,000	0,000	10,512	0,179	0,405	0,267	0,000	0,000	0,347							
32	3.797	0,000	3,954	3,240	3,501	0,000	3,817	3,876	3,503	0,179	0,405	0,267	0,231	0,331	0,116							
33	4.644	0,000	5,932	2,430	2,626	0,000	3,557	3,613	3,265	0,268	0,304	0,200	0,215	0,309	0,108							
34	4.644	0,000	0,000	4,861	5,253	0,000	3,557	3,613	3,265	0,000	0,607	0,400	0,215	0,309	0,108							
41	4.644	0,000	3,954	3,240	3,501	0,000	2,668	5,420	2,449	0,179	0,405	0,267	0,161	0,463	0,081							
42	4.644	0,000	3,954	3,240	3,501	0,000	5,336	0,000	4,899	0,179	0,405	0,267	0,322	0,000	0,162							
43	4.644	0,000	3,954	3,240	3,501	0,000	2,668	2,710	4,899	0,179	0,405	0,267	0,161	0,232	0,162							
44	4.644	0,000	3,954	3,240	3,501	0,000	5,336	5,420	0,000	0,179	0,405	0,267	0,322	0,463	0,000							
47	4.644	0,000	3,954	3,240	3,501	0,000	3,557	3,613	3,265	0,179	0,405	0,267	0,215	0,309	0,108							
48	3.797	0,000	3,954	3,240	3,501	0,000	3,557	3,613	3,265	0,179	0,405	0,267	0,215	0,309	0,108							
50	3.797	3,750	2,966	2,430	2,626	2,952	2,863	2,907	2,628	0,134	0,304	0,200	0,173	0,249	0,087							
35	4.644	0,000	2,966	4,861	2,626	0,000	3,557	3,613	3,265	0,134	0,607	0,200	0,215	0,309	0,108							
36	4.644	0,000	5,932	0,000	5,253	0,000	3,557	3,613	3,265	0,268	0,000	0,400	0,215	0,309	0,108							
37	4.644	0,000	2,966	2,430	5,253	0,000	3,557	3,613	3,265	0,134	0,304	0,400	0,215	0,309	0,108							
38	4.644	0,000	5,932	4,861	0,000	0,000	3,557	3,613	3,265	0,268	0,607	0,000	0,215	0,309	0,108							
39	4.644	0,000	3,954	3,240	3,501	0,000	5,336	2,710	2,449	0,179	0,405	0,267	0,322	0,232	0,081							
40	4.644	0,000	3,954	3,240	3,501	0,000	0,000	5,420	4,899	0,179	0,405	0,267	0,000	0,463	0,162							

## **ANEXO D – PROCEDIMENTO PARA REALIZAÇÃO DA LEITURA DA RETRAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA**

1. Posicionar o aparelho de leitura de retração em uma superfície plana, de forma que o defletômetro digital fique à esquerda do usuário.
2. Colocar a haste de referência entre o defletômetro digital e o parafuso de ajuste
3. Girar o parafuso de ajuste até que a leitura apresentada no defletômetro digital seja de 5,000mm
4. Colocar os CP's de retração no aparelho, utilizando-se uma espátula para retrain o cursor do defletômetro digital, propiciando assim, maior facilidade na introdução dos mesmos. Os CP's devem ser colocados com seus nomes para cima, e estes nomes devem ser lidos da esquerda para a direita.
5. Quando os CP's não couberem no aparelho de leitura de retração da maneira como foram dispostos conforme item 4, deve-se girar o CP até que se encontre uma face que caiba na base de leitura do aparelho. Quando isso acontecer, marcar o lado que ficou para cima. As leituras devem ser realizadas com os CP's sempre na mesma posição.
6. Verificar se o cursor do defletômetro digital e o parafuso de ajuste do aparelho de leitura encontram-se tocando os pinos externos do CP.
7. Posicionar o CP o mais próximo possível para frente e para a direita, dentro do aparelho de leitura de retração.
8. Anotar o valor apresentado no display do defletômetro digital em planilha, observando a nomenclatura do CP que está sendo lido e a data da leitura da retração.

## ANEXO E – RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

TRAÇO	Nº CP	Carga (KN)	Resis. Comp. (MPa)
1	1	194,5	27,44
	2	327	46,13
	3 (E <sub>c</sub> )	311	43,88
	4 (E <sub>c</sub> )	258	36,40
4	1	338	47,69
	2	267	37,67
	3 (E <sub>c</sub> )	255	35,98
	4 (E <sub>c</sub> )	329,5	46,49
6	1	176,5	24,90
	2	201	28,36
	3 (E <sub>c</sub> )	194	27,37
	4 (E <sub>c</sub> )	220,5	31,11
7	1	175	24,69
	2	144,5	20,39
	3 (E <sub>c</sub> )	126	17,78
	4 (E <sub>c</sub> )	184	25,96
9	1	156	22,01
	2	160,5	22,64
	3 (E <sub>c</sub> )	146	20,60
	4 (E <sub>c</sub> )	171	24,13
12	1	190,5	26,88
	2	144,5	20,39
	3 (E <sub>c</sub> )	171	24,13
	4 (E <sub>c</sub> )	178,5	25,18
14	1	205,5	28,99
	2	203	28,64
	3 (E <sub>c</sub> )	244,5	34,49
	4 (E <sub>c</sub> )	251,5	35,48
15	1	213,5	30,12
	2	206,5	29,13
	3 (E <sub>c</sub> )	201	28,36
	4 (E <sub>c</sub> )	190,5	26,88
17	1	214	30,19
	2	246	34,71
	3 (E <sub>c</sub> )	205,5	28,99
	4 (E <sub>c</sub> )	216	30,47

TRAÇO	Nº CP	Carga (KN)	Resis. Comp. (MPa)
20	1	276,5	39,01
	2	252,5	35,62
	3 (E <sub>c</sub> )	230	32,45
	4 (E <sub>c</sub> )	272,5	38,45
22	1	264	37,25
	2	299	42,18
	3 (E <sub>c</sub> )	248	34,99
	4 (E <sub>c</sub> )	259	36,54
23	1	156	22,01
	2	238,5	33,65
	3 (E <sub>c</sub> )	168	23,70
	4 (E <sub>c</sub> )	219	30,90
45	1	119,5	16,86
	2	123	17,35
	3 (E <sub>c</sub> )	116,5	16,44
	4 (E <sub>c</sub> )	108	15,24
25	1	239,5	33,79
	2	223	31,46
	3 (E <sub>c</sub> )	246,5	34,78
	4 (E <sub>c</sub> )	216	30,47
46	1	250	35,27
	2	240,5	33,93
	3 (E <sub>c</sub> )	259	36,54
	4 (E <sub>c</sub> )	256,5	36,19
49	1	206,5	29,13
	2	162,5	22,93
	3 (E <sub>c</sub> )	213	30,05
	4 (E <sub>c</sub> )	247	34,85
30	1	187,5	26,45
	2	205,5	28,99
	3 (E <sub>c</sub> )	220,5	31,11
	4 (E <sub>c</sub> )	220,5	31,11
28	1	249	35,13
	2	214,5	30,26
	3 (E <sub>c</sub> )	228	32,17
	4 (E <sub>c</sub> )	209,5	29,56

TRAÇO	Nº CP	Carga (KN)	Resis. Comp. (MPa)
31	1	169,5	23,91
	2	161	22,71
	3 (E <sub>c</sub> )	176	24,83
	4 (E <sub>c</sub> )	193	27,23
10	1	131,5	18,55
	2	132	18,62
	3 (E <sub>c</sub> )	121,5	17,14
	4 (E <sub>c</sub> )	122	17,21
11	1	86	12,13
	2	97	13,69
	3 (E <sub>c</sub> )	104	14,67
	4 (E <sub>c</sub> )	88,5	12,49
3	1	106	14,95
	2	126	17,78
	3 (E <sub>c</sub> )	112,5	15,87
	4 (E <sub>c</sub> )	126	17,78
8	1	135,5	19,12
	2	124	17,49
	3 (E <sub>c</sub> )	115	16,22
	4 (E <sub>c</sub> )	125	17,64
5	1	106,5	15,03
	2	111,5	15,73
	3 (E <sub>c</sub> )	87,5	12,34
	4 (E <sub>c</sub> )	107	15,10
2	1	236,5	33,37
	2	244	34,42
	3 (E <sub>c</sub> )	236	33,30
	4 (E <sub>c</sub> )	30,5	4,30
13	1	130	18,34
	2	122,5	17,28
	3 (E <sub>c</sub> )	100,5	14,18
	4 (E <sub>c</sub> )	129,5	18,27
16	1	135	19,05
	2	128	18,06
	3 (E <sub>c</sub> )	128	18,06
	4 (E <sub>c</sub> )	137	19,33
19	1	88,5	12,49
	2	103,5	14,60
	3 (E <sub>c</sub> )	101,5	14,32
	4 (E <sub>c</sub> )	100	14,11

TRAÇO	Nº CP	Carga (KN)	Resis. Comp. (MPa)
24	1	133	18,76
	2	131,5	18,55
	3 (E <sub>c</sub> )	111,5	15,73
	4 (E <sub>c</sub> )	135	19,05
18	1	114,5	16,15
	2	114,5	16,15
	3 (E <sub>c</sub> )	111	15,66
	4 (E <sub>c</sub> )	124,5	17,56
21	1	136,5	19,26
	2	137,5	19,40
	3 (E <sub>c</sub> )	121	17,07
	4 (E <sub>c</sub> )	134,5	18,98
29	1	101	14,25
	2	97,5	13,76
	3 (E <sub>c</sub> )	104	14,67
	4 (E <sub>c</sub> )	93,5	13,19
33	1	174,5	24,62
	2	177,5	25,04
	3 (E <sub>c</sub> )	159	22,43
	4 (E <sub>c</sub> )	165,5	23,35
34	1	166	23,42
	2	160	22,57
	3 (E <sub>c</sub> )	145	20,46
	4 (E <sub>c</sub> )	150,5	21,23
32	1	96	13,54
	2	132	18,62
	3 (E <sub>c</sub> )	130	18,34
	4 (E <sub>c</sub> )	99	13,97
27	1	119	16,79
	2	97,5	13,76
	3 (E <sub>c</sub> )	112,5	15,87
	4 (E <sub>c</sub> )	102,5	14,46
26	1	172,5	24,34
	2	181,5	25,61
	3 (E <sub>c</sub> )	184,5	26,03
	4 (E <sub>c</sub> )	166	23,42
37	1	153,5	21,66
	2	166,5	23,49
	3 (E <sub>c</sub> )	159	22,43
	4 (E <sub>c</sub> )	162	22,86

TRAÇO	Nº CP	Carga (KN)	Resis. Comp. (MPa)
38	1	171,5	24,20
	2	165,5	23,35
	3 (E <sub>c</sub> )	149	21,02
	4 (E <sub>c</sub> )	176,5	24,90
35	1	125	17,64
	2	168	23,70
	3 (E <sub>c</sub> )	153,5	21,66
	4 (E <sub>c</sub> )	136,5	19,26
36	1	180,5	25,47
	2	181	25,54
	3 (E <sub>c</sub> )	184	25,96
	4 (E <sub>c</sub> )	179	25,25
40	1	182	25,68
	2	153	21,59
	3 (E <sub>c</sub> )	185	26,10
	4 (E <sub>c</sub> )	177,5	25,04
39	1	167,5	23,63
	2	122,5	17,28
	3 (E <sub>c</sub> )	159,5	22,50
	4 (E <sub>c</sub> )	145,5	20,53
42	1	155	21,87
	2	167	23,56
	3 (E <sub>c</sub> )	124,5	17,56
	4 (E <sub>c</sub> )	137,5	19,40

TRAÇO	Nº CP	Carga (KN)	Resis. Comp. (MPa)
44	1	197,5	27,86
	2	184,5	26,03
	3 (E <sub>c</sub> )	178	25,11
	4 (E <sub>c</sub> )	148,5	20,95
50	1	104,5	14,74
	2	135	19,05
	3 (E <sub>c</sub> )	126,5	17,85
	4 (E <sub>c</sub> )	119,5	16,86
43	1	165,5	23,35
	2	154	21,73
	3 (E <sub>c</sub> )	155,5	21,94
	4 (E <sub>c</sub> )	149,5	21,09
41	1	188,5	26,59
	2	183	25,82
	3 (E <sub>c</sub> )	184	25,96
	4 (E <sub>c</sub> )	175,5	24,76
47	1	168	23,70
	2	168,5	23,77
	3 (E <sub>c</sub> )	165	23,28
	4 (E <sub>c</sub> )	150	21,16
48	1	140	19,75
	2	150,4	21,22
	3 (E <sub>c</sub> )	140,6	19,84
	4 (E <sub>c</sub> )	32,8	4,63

## ANEXO F – RESULTADOS DO ENSAIO DE MÓDULO DE DEFORMAÇÃO

Traço	CP1 (GPa)	CP2 (GPa)
01	34,47	32,08
02	20,62	-
03	15,14	12,42
04	26,35	29,06
05	11,85	11,31
06	16,70	16,48
07	15,31	15,11
08	13,31	14,47
09	12,57	13,47
10	11,83	11,17
11	10,46	10,64
12	12,56	12,61
13	15,42	12,33
14	15,49	15,83
15	16,29	15,39
16	14,28	13,13
17	20,48	20,04
18	16,88	15,91
19	15,65	14,07
20	21,18	20,43
21	17,70	18,07
22	18,69	18,45
23	18,92	21,66
24	13,10	15,01
25	21,15	19,31
26	14,39	14,15

Traço	CP1 (GPa)	CP2 (GPa)
27	13,18	13,01
28	18,70	17,46
29	12,06	11,80
30	17,12	16,57
31	16,29	16,64
32	14,15	13,74
33	15,80	16,77
34	14,30	14,51
35	13,07	12,93
36	16,68	16,16
37	16,21	15,10
38	14,87	16,00
39	16,12	14,89
40	15,62	14,58
41	14,98	14,95
42	14,72	16,24
43	15,85	14,49
44	14,73	15,68
45	13,55	12,87
46	19,70	18,30
47	15,37	15,54
48	16,16	15,52
49	20,08	21,07
50	16,04	15,71

## ANEXO G – RESULTADOS DO ENSAIO DE RETRAÇÃO POR SECAGEM

TRAÇO	CP	1 dia	4 dias	7 dias	14 dias	28 dias	56 dias	112 dias	224 dias
		1ª LEITURA	2ª LEITURA	3ª LEITURA	4ª LEITURA	5ª LEITURA	6ª LEITURA	7ª LEITURA	8ª LEITURA
1	A	0,000	-0,008	-0,077	0,178	0,178	-0,154	-0,353	-0,414
	B	0,000	0,012	-0,101	0,345	0,142	-0,122	-0,353	-0,373
	Média	<b>0,000</b>	<b>0,002</b>	<b>-0,089</b>	<b>0,262</b>	<b>0,160</b>	<b>-0,138</b>	<b>-0,353</b>	<b>-0,393</b>
2	A	0,000	-0,028	-0,730	-0,008	-0,024	-0,109	-0,456	-0,726
	B	0,000	-0,045	-0,016	0,008	-0,004	-0,093	-0,738	-0,827
	Média	<b>0,000</b>	<b>-0,036</b>	<b>-0,016</b>	<b>0,000</b>	<b>-0,014</b>	<b>-0,101</b>	<b>-0,597</b>	<b>-0,777</b>
3	A	0,000	-0,077	0,000	0,004	-0,097	-0,572	-0,864	-0,892
	B	0,000	-0,860	-0,571	-0,685	-0,448	-2,209	-2,185	-2,185
	Média	<b>0,000</b>	<b>-0,469</b>	<b>-0,285</b>	<b>-0,340</b>	<b>-0,273</b>	<b>-1,390</b>	<b>-1,524</b>	<b>-1,538</b>
4	A	0,000	-0,110	-0,365	-0,032	0,024	-0,369	-0,686	-0,787
	B	0,000	0,061	-0,069	0,240	0,204	-0,139	-0,436	-0,562
	Média	<b>0,000</b>	<b>-0,024</b>	<b>-0,217</b>	<b>0,104</b>	<b>0,114</b>	<b>-0,254</b>	<b>-0,561</b>	<b>-0,675</b>
5	A	0,000	-0,111	-0,094	0,000	-0,074	-0,653	-1,335	-1,450
	B	0,000	0,016	0,106	0,106	0,093	-0,581	-1,255	-1,324
	Média	<b>0,000</b>	<b>-0,047</b>	<b>0,006</b>	<b>0,053</b>	<b>0,010</b>	<b>-0,617</b>	<b>-1,295</b>	<b>-1,387</b>
6	A	0,000	-0,012	0,278	0,846	0,074	-0,417	-0,764	-1,066
	B	0,000	0,000	0,041	0,353	0,520	-0,337	-0,569	-1,008
	Média	<b>0,000</b>	<b>-0,006</b>	<b>0,159</b>	<b>0,600</b>	<b>0,297</b>	<b>-0,377</b>	<b>-0,666</b>	<b>-1,037</b>
7	A	0,000	-0,228	-0,199	0,016	-0,061	-0,773	-1,347	-1,465
	B	0,000	0,041	-0,081	0,281	0,183	-0,443	-1,090	-1,224
	Média	<b>0,000</b>	<b>-0,094</b>	<b>-0,140</b>	<b>0,148</b>	<b>0,061</b>	<b>-0,608</b>	<b>-1,219</b>	<b>-1,345</b>
8	A	0,000	0,024	0,069	0,069	0,106	-0,623	-1,161	-1,251
	B	0,000	-0,073	0,049	0,037	0,012	-0,682	-1,227	-1,430
	Média	<b>0,000</b>	<b>-0,024</b>	<b>0,059</b>	<b>0,053</b>	<b>0,059</b>	<b>-0,653</b>	<b>-1,194</b>	<b>-1,340</b>
9	A	0,000	-0,004	0,081	0,162	0,118	-0,365	-0,989	-1,151
	B	0,000	0,000	-0,146	0,260	0,134	-0,342	-0,899	-1,041
	Média	<b>0,000</b>	<b>-0,002</b>	<b>-0,033</b>	<b>0,211</b>	<b>0,126</b>	<b>-0,353</b>	<b>-0,944</b>	<b>-1,096</b>
10	A	0,000	-0,106	-0,098	0,139	0,147	-0,715	-1,209	-1,364
	B	0,000	-0,077	-0,016	0,004	-0,004	-0,640	-1,068	-1,313
	Média	<b>0,000</b>	<b>-0,092</b>	<b>-0,057</b>	<b>0,071</b>	<b>0,071</b>	<b>-0,677</b>	<b>-1,138</b>	<b>-1,338</b>
11	A	0,000	0,045	0,135	0,143	0,070	-0,520	-1,118	-1,221
	B	0,000	-0,029	0,012	0,020	0,033	-0,432	-1,210	-1,271
	Média	<b>0,000</b>	<b>0,008</b>	<b>0,074</b>	<b>0,082</b>	<b>0,051</b>	<b>-0,476</b>	<b>-1,164</b>	<b>-1,246</b>
12	A	0,000	0,000	0,041	0,297	-3,842	-0,179	-0,833	-1,012
	B	0,000	-0,012	0,085	0,291	0,150	-0,389	-0,919	-1,000
	Média	<b>0,000</b>	<b>-0,006</b>	<b>0,063</b>	<b>0,294</b>	<b>0,150</b>	<b>-0,284</b>	<b>-0,876</b>	<b>-1,006</b>
13	A	0,000	0,171	0,134	0,008	-0,020	-0,423	-0,749	-0,761
	B	0,000	-0,428	-0,355	-0,139	-0,448	-0,913	-1,239	-1,239
	Média	<b>0,000</b>	<b>-0,128</b>	<b>-0,110</b>	<b>-0,065</b>	<b>-0,234</b>	<b>-0,668</b>	<b>-0,994</b>	<b>-1,000</b>
14	A	0,000	0,053	0,012	0,175	0,118	-0,114	-0,783	-0,987
	B	0,000	0,082	-0,020	0,094	0,070	-0,225	-0,839	-1,092
	Média	<b>0,000</b>	<b>0,067</b>	<b>-0,004</b>	<b>0,135</b>	<b>0,094</b>	<b>-0,170</b>	<b>-0,811</b>	<b>-1,040</b>
15	A	0,000	0,170	0,323	0,380	0,198	-0,344	-0,845	-0,914
	B	0,000	0,177	0,048	0,278	0,229	-0,254	-0,765	-0,885
	Média	<b>0,000</b>	<b>0,173</b>	<b>0,186</b>	<b>0,329</b>	<b>0,214</b>	<b>-0,299</b>	<b>-0,805</b>	<b>-0,900</b>
16	A	0,000	0,045	-0,073	0,456	-0,081	-0,635	-1,099	-1,437
	B	0,000	0,118	-0,033	0,127	0,151	-0,449	-1,164	-1,332
	Média	<b>0,000</b>	<b>0,082</b>	<b>-0,053</b>	<b>0,291</b>	<b>0,035</b>	<b>-0,542</b>	<b>-1,132</b>	<b>-1,384</b>
17	A	0,000	0,102	-0,486	0,184	0,147	-0,314	-0,931	-1,062
	B	0,000	0,171	-0,012	0,086	0,277	-0,179	-0,930	-0,999
	Média	<b>0,000</b>	<b>0,137</b>	<b>-0,012</b>	<b>0,135</b>	<b>0,212</b>	<b>-0,247</b>	<b>-0,930</b>	<b>-1,030</b>
18	A	0,000	0,074	-0,041	0,029	0,029	-0,442	-0,895	-1,100
	B	0,000	0,355	-0,016	0,110	0,061	-0,404	-0,963	-1,102
	Média	<b>0,000</b>	<b>0,214</b>	<b>-0,029</b>	<b>0,069</b>	<b>0,045</b>	<b>-0,423</b>	<b>-0,929</b>	<b>-1,101</b>
19	A	0,000	0,138	-0,020	0,024	0,032	-0,329	-0,723	-0,926
	B	0,000	-0,033	-0,078	0,078	0,082	-0,332	-0,980	-1,070
	Média	<b>0,000</b>	<b>0,053</b>	<b>-0,049</b>	<b>0,051</b>	<b>0,057</b>	<b>-0,331</b>	<b>-0,852</b>	<b>-0,998</b>
20	A	0,000	0,150	-0,403	0,374	0,252	-0,313	-0,801	-0,964
	B	0,000	0,033	-0,488	0,134	0,065	-0,386	-0,903	-1,033
	Média	<b>0,000</b>	<b>0,091</b>	<b>-0,445</b>	<b>0,254</b>	<b>0,159</b>	<b>-0,350</b>	<b>-0,852</b>	<b>-0,998</b>
21	A	0,000	0,106	-0,073	-0,008	-0,016	-0,410	-0,808	-0,812
	B	0,000	0,082	-0,078	0,033	0,070	-0,317	-0,650	-0,687
	Média	<b>0,000</b>	<b>0,094</b>	<b>-0,076</b>	<b>0,012</b>	<b>0,027</b>	<b>-0,363</b>	<b>-0,729</b>	<b>-0,749</b>
22	A	0,000	0,130	0,175	0,276	0,207	-0,122	-0,520	-0,845
	B	0,000	0,105	0,117	0,149	0,153	-0,222	-0,707	-0,916
	Média	<b>0,000</b>	<b>0,118</b>	<b>0,146</b>	<b>0,213</b>	<b>0,180</b>	<b>-0,172</b>	<b>-0,613</b>	<b>-0,881</b>

TRAÇO	CP	1 dia	4 dias	7 dias	14 dias	28 dias	56 dias	112 dias	224 dias
		1ª LEITURA	2ª LEITURA	3ª LEITURA	4ª LEITURA	5ª LEITURA	6ª LEITURA	7ª LEITURA	8ª LEITURA
23	A	0,000	0,102	0,143	0,237	0,286	-0,307	-0,831	-1,040
	B	0,000	0,110	0,204	0,350	0,212	-0,191	-0,863	-0,969
	Média	<b>0,000</b>	<b>0,106</b>	<b>0,173</b>	<b>0,294</b>	<b>0,249</b>	<b>-0,249</b>	<b>-0,847</b>	<b>-1,004</b>
24	A	0,000	0,077	0,045	0,012	-0,020	-0,422	-0,965	-1,265
	B	0,000	0,200	-0,053	-0,033	-0,012	-0,245	-0,828	-1,219
	Média	<b>0,000</b>	<b>0,138</b>	<b>-0,004</b>	<b>-0,010</b>	<b>-0,016</b>	<b>-0,333</b>	<b>-0,896</b>	<b>-1,242</b>
25	A	0,000	-0,020	0,061	-0,069	0,057	-0,339	-0,781	-0,818
	B	0,000	-0,957	-0,134	-0,200	-0,399	-0,770	-1,051	-1,153
	Média	<b>0,000</b>	<b>-0,020</b>	<b>-0,037</b>	<b>-0,135</b>	<b>-0,171</b>	<b>-0,555</b>	<b>-0,916</b>	<b>-0,985</b>
26	A	0,000	0,037	0,057	0,037	0,057	-0,502	-0,975	-1,130
	B	0,000	-0,049	-0,086	-0,090	-0,065	-0,636	-1,069	-1,991
	Média	<b>0,000</b>	<b>-0,006</b>	<b>-0,014</b>	<b>-0,027</b>	<b>-0,004</b>	<b>-0,569</b>	<b>-1,022</b>	<b>-1,560</b>
27	A	0,000	0,077	0,065	0,000	0,028	-0,574	-1,143	-1,908
	B	0,000	-0,008	-0,065	-0,105	-0,122	-0,710	-1,221	-2,003
	Média	<b>0,000</b>	<b>0,035</b>	<b>0,000</b>	<b>-0,053</b>	<b>-0,047</b>	<b>-0,642</b>	<b>-1,182</b>	<b>-1,956</b>
28	A	0,000	-0,548	0,020	0,000	0,037	-0,380	-1,198	-0,973
	B	0,000	-0,585	0,203	0,069	0,065	-0,276	-0,788	-1,130
	Média	<b>0,000</b>	<b>-0,567</b>	<b>0,112</b>	<b>0,035</b>	<b>0,051</b>	<b>-0,328</b>	<b>-0,993</b>	<b>-1,051</b>
29	A	0,000	0,073	0,061	-0,020	0,004	-0,727	-1,251	-1,893
	B	0,000	0,798	0,777	0,773	0,806	-0,270	-1,002	-1,890
	Média	<b>0,000</b>	<b>0,073</b>	<b>0,061</b>	<b>-0,020</b>	<b>0,004</b>	<b>-0,727</b>	<b>-1,127</b>	<b>-1,892</b>
30	A	0,000	-0,577	0,167	-0,045	0,081	-0,475	-0,955	-1,162
	B	0,000	-0,570	0,057	-0,065	0,065	-0,496	-0,948	-1,180
	Média	<b>0,000</b>	<b>-0,573</b>	<b>0,112</b>	<b>-0,055</b>	<b>0,073</b>	<b>-0,486</b>	<b>-0,952</b>	<b>-1,171</b>
31	A	0,000	-0,627	0,041	-0,081	-0,061	-0,643	-1,127	-1,270
	B	0,000	-0,543	0,057	0,012	0,037	-0,616	-1,077	-1,216
	Média	<b>0,000</b>	<b>-0,585</b>	<b>0,049</b>	<b>-0,035</b>	<b>-0,012</b>	<b>-0,629</b>	<b>-1,102</b>	<b>-1,243</b>
32	A	0,000	-0,016	0,147	0,045	0,073	-0,583	-1,093	-1,932
	B	0,000	0,110	0,195	-0,118	-0,049	-0,610	-1,094	-1,830
	Média	<b>0,000</b>	<b>0,047</b>	<b>0,171</b>	<b>-0,037</b>	<b>0,012</b>	<b>-0,597</b>	<b>-1,093</b>	<b>-1,881</b>
33	A	0,000	0,008	0,024	-0,041	-0,061	-0,631	-1,038	-1,770
	B	0,000	0,184	0,025	-0,102	-0,078	-0,704	-1,080	-1,919
	Média	<b>0,000</b>	<b>0,096</b>	<b>0,024</b>	<b>-0,072</b>	<b>-0,069</b>	<b>-0,667</b>	<b>-1,059</b>	<b>-1,845</b>
34	A	0,000	-0,082	-0,114	-0,192	-0,155	-0,750	-1,231	-2,059
	B	0,000	0,187	0,134	-0,028	0,012	-0,602	-0,948	-1,706
	Média	<b>0,000</b>	<b>0,053</b>	<b>0,010</b>	<b>-0,110</b>	<b>-0,071</b>	<b>-0,676</b>	<b>-1,090</b>	<b>-1,882</b>
35	A	0,000	-0,143	-0,152	-0,176	-0,152	-0,750	-1,282	-1,331
	B	0,000	0,148	0,016	0,041	0,049	-0,430	-0,701	-1,226
	Média	<b>0,000</b>	<b>0,002</b>	<b>-0,068</b>	<b>-0,068</b>	<b>-0,051</b>	<b>-0,590</b>	<b>-0,991</b>	<b>-1,278</b>
36	A	0,000	0,081	0,045	-0,012	0,000	-0,586	-0,981	-1,189
	B	0,000	0,065	-0,045	-0,028	0,000	-0,557	-0,959	-1,195
	Média	<b>0,000</b>	<b>0,073</b>	<b>0,000</b>	<b>-0,020</b>	<b>0,000</b>	<b>-0,572</b>	<b>-0,970</b>	<b>-1,192</b>
37	A	0,000	0,045	-0,012	-0,004	0,016	-0,632	-1,121	-1,178
	B	0,000	0,037	0,358	-0,033	-0,016	-0,644	-1,116	-1,201
	Média	<b>0,000</b>	<b>0,041</b>	<b>0,173</b>	<b>-0,018</b>	<b>0,000</b>	<b>-0,638</b>	<b>-1,118</b>	<b>-1,190</b>
38	A	0,000	-0,208	-0,290	-0,298	-0,270	-0,911	-1,348	-1,438
	B	0,000	-0,020	-0,106	-0,122	-0,102	-0,639	-1,037	-1,180
	Média	<b>0,000</b>	<b>-0,114</b>	<b>-0,198</b>	<b>-0,210</b>	<b>-0,186</b>	<b>-0,775</b>	<b>-1,193</b>	<b>-1,309</b>
39	A	0,000	0,212	0,020	-0,012	-0,020	-0,594	-1,600	-1,307
	B	0,000	0,086	0,012	0,086	0,094	-0,571	-0,991	-1,207
	Média	<b>0,000</b>	<b>0,149</b>	<b>0,016</b>	<b>0,037</b>	<b>0,037</b>	<b>-0,583</b>	<b>-1,295</b>	<b>-1,257</b>
40	A	0,000	-0,081	-0,162	-0,110	-0,106	-0,621	-1,056	-1,308
	B	0,000	0,711	0,597	0,687	0,642	-0,102	-0,532	-1,064
	Média	<b>0,000</b>	<b>0,315</b>	<b>0,217</b>	<b>0,288</b>	<b>0,268</b>	<b>-0,361</b>	<b>-0,794</b>	<b>-1,186</b>
41	A	0,000	0,134	0,049	0,000	0,008	-0,653	-1,079	-1,302
	B	0,000	0,069	0,049	0,024	0,077	-0,543	-0,932	-1,232
	Média	<b>0,000</b>	<b>0,101</b>	<b>0,049</b>	<b>0,012</b>	<b>0,043</b>	<b>-0,598</b>	<b>-1,006</b>	<b>-1,267</b>
42	A	0,000	0,191	0,134	0,134	0,150	-0,594	-1,008	-1,207
	B	0,000	0,089	0,045	0,089	0,093	-0,649	-1,001	-1,083
	Média	<b>0,000</b>	<b>0,140</b>	<b>0,089</b>	<b>0,112</b>	<b>0,122</b>	<b>-0,621</b>	<b>-1,005</b>	<b>-1,145</b>
43	A	0,000	0,077	0,081	0,057	0,089	-0,618	-1,142	-1,338
	B	0,000	0,106	0,073	-0,008	0,041	-0,653	-0,954	-1,149
	Média	<b>0,000</b>	<b>0,091</b>	<b>0,077</b>	<b>0,024</b>	<b>0,065</b>	<b>-0,636</b>	<b>-1,048</b>	<b>-1,243</b>
44	A	0,000	0,057	-0,012	-0,012	-0,020	-0,834	-0,989	-1,623
	B	0,000	0,106	0,106	0,041	0,077	-0,635	-1,001	-1,225
	Média	<b>0,000</b>	<b>0,082</b>	<b>0,047</b>	<b>0,014</b>	<b>0,028</b>	<b>-0,734</b>	<b>-0,995</b>	<b>-1,424</b>
45	A	0,000	0,012	0,004	-0,077	-0,049	-0,752	-1,122	-1,244
	B	0,000	0,016	0,077	-0,289	0,012	-0,716	-1,143	-1,261
	Média	<b>0,000</b>	<b>0,014</b>	<b>0,041</b>	<b>-0,183</b>	<b>-0,018</b>	<b>-0,734</b>	<b>-1,133</b>	<b>-1,253</b>
46	A	0,000	-0,259	0,420	-0,024	-0,077	-0,461	-0,853	-0,982
	B	0,000	-0,423	-0,137	-0,226	-0,367	-0,685	-1,192	-1,321
	Média	<b>0,000</b>	<b>-0,341</b>	<b>0,142</b>	<b>-0,125</b>	<b>-0,222</b>	<b>-0,573</b>	<b>-1,023</b>	<b>-1,152</b>

TRAÇO	CP	1 dia	4 dias	7 dias	14 dias	28 dias	56 dias	112 dias	224 dias
		1ª LEITURA	2ª LEITURA	3ª LEITURA	4ª LEITURA	5ª LEITURA	6ª LEITURA	7ª LEITURA	8ª LEITURA
47	A	0,000	0,134	0,049	0,073	0,081	-0,579	-0,939	-1,145
	B	0,000	0,081	0,057	0,033	0,069	-0,660	-1,128	-1,303
	<b>Média</b>	<b>0,000</b>	<b>0,107</b>	<b>0,053</b>	<b>0,053</b>	<b>0,075</b>	<b>-0,619</b>	<b>-1,033</b>	<b>-1,224</b>
48	A	0,000	0,037	-0,029	0,020	-0,008	-0,796	-1,147	-1,254
	B	0,000	0,033	-0,020	0,049	0,024	-0,781	-1,094	-1,151
	<b>Média</b>	<b>0,000</b>	<b>0,035</b>	<b>-0,024</b>	<b>0,035</b>	<b>0,008</b>	<b>-0,788</b>	<b>-1,121</b>	<b>-1,202</b>
49	A	0,000	-0,057	-0,008	-0,135	-0,008	-0,416	-0,877	-0,938
	B	0,000	-0,004	0,029	-0,086	0,012	-0,416	-0,876	-0,949
	<b>Média</b>	<b>0,000</b>	<b>-0,031</b>	<b>0,010</b>	<b>-0,110</b>	<b>0,002</b>	<b>-0,416</b>	<b>-0,876</b>	<b>-0,944</b>
50	A	0,000	0,020	0,094	-0,004	-0,008	-0,598	-0,920	-0,989
	B	0,000	0,065	0,045	-0,049	-0,024	-0,555	-0,910	-1,040
	<b>Média</b>	<b>0,000</b>	<b>0,043</b>	<b>0,069</b>	<b>-0,027</b>	<b>-0,016</b>	<b>-0,577</b>	<b>-0,915</b>	<b>-1,015</b>

## ANEXO H – RESULTADOS DAS ANÁLISES DE REGRESSÃO MÚLTIPLA

### Multiple Regression Analysis

-----  
Dependent variable: Modificação da Resistencia  
-----

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
rag	0,337839	0,0307383	10,9908	0,0000
ram	0,152611	0,0333292	4,57889	0,0000
rcg	0,275439	0,0307383	8,96079	0,0000
rcm	0,0665345	0,0325824	2,04204	0,0473
rvg	0,371439	0,0307383	12,0839	0,0000
rvm	-0,137566	0,0282576	-4,86829	0,0000

### Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	5,99103	6	0,998504	357,64	0,0000
Residual	0,120054	43	0,00279196		
Total	6,11108	49			

R-squared = 98,0355 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 97,807 percent

Standard Error of Est. = 0,052839

Mean absolute error = 0,0383263

Durbin-Watson statistic = 2,2337

### The StatAdvisor

-----  
The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between PerdaR and 6 independent variables. The equation of the fitted model is

$$\text{Modif.Resist.} = 0,337839*\text{rag} + 0,152611*\text{ram} + 0,275439*\text{rcg} + 0,0665345*\text{rcm} + 0,371439*\text{rvg} - 0,137566*\text{rvm}$$

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0.01, there is a statistically significant relationship between the variables at the 99% confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 98,0355% of the variability in PerdaR. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 97,807%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 0,052839. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 0,0383263 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the DW value is greater than 1.4, there is probably not any serious autocorrelation in the residuals.

In determining whether the model can be simplified, notice that the highest P-value on the independent variables is 0,0473, belonging to rcm. Since the P-value is less than 0.05, that term is statistically significant at the 95% confidence level. Consequently, you probably don't want to remove any variables from the model.

## Multiple Regression Analysis

-----  
Dependent variable: Modificação do Módulo  
-----

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
rag	0,351726	0,016689	21,0754	0,0000
ram	0,157895	0,0180957	8,72555	0,0000
rcg	0,231256	0,016689	13,8568	0,0000
rcm	0,109632	0,0176902	6,19734	0,0000
rvg	0,440197	0,016689	26,3765	0,0000
rvm	0,112525	0,0153421	7,3344	0,0000

-----  
Analysis of Variance  
-----

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	9,69661	6	1,6161	1963,63	0,0000
Residual	0,0353897	43	0,000823017		
Total	9,732	49			

R-squared = 99,6364 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 99,5941 percent

Standard Error of Est. = 0,0286883

Mean absolute error = 0,021993

Durbin-Watson statistic = 2,04473

The StatAdvisor  
-----

The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between PerdaM and 6 independent variables. The equation of the fitted model is

$$\text{Modific. Mod.} = 0,351726 \cdot \text{rag} + 0,157895 \cdot \text{ram} + 0,231256 \cdot \text{rcg} + 0,109632 \cdot \text{rcm} + 0,440197 \cdot \text{rvg} + 0,112525 \cdot \text{rvm}$$

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0.01, there is a statistically significant relationship between the variables at the 99% confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 99,6364% of the variability in PerdaM. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 99,5941%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 0,0286883. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 0,021993 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the DW value is greater than 1.4, there is probably not any serious autocorrelation in the residuals.

In determining whether the model can be simplified, notice that the highest P-value on the independent variables is 0,0000, belonging to rcm. Since the P-value is less than 0.01, the highest order term is statistically significant at the 99% confidence level. Consequently, you probably don't want to remove any variables from the model.

## Multiple Regression Analysis

Dependent variable: Ret56 - **Retração aos 56 dias**

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	0,0971409	0,127133	0,764089	0,4491
rag	-0,348233	0,101782	-3,42135	0,0014
rcg	-0,225409	0,101782	-2,21462	0,0323
rvg	-0,368468	0,101782	-3,62015	0,0008
a/c	-0,496889	0,173155	-2,86963	0,0064

## Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	0,564156	4	0,141039	6,53	0,0004
Residual	0,907324	42	0,021603		
Total (Corr.)	1,47148	46			

R-squared = 38,3394 percent  
R-squared (adjusted for d.f.) = 32,4669 percent  
Standard Error of Est. = 0,146979  
Mean absolute error = 0,11805  
Durbin-Watson statistic = 1,08597

## The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between Ret56 and 4 independent variables. The equation of the fitted model is

$$\text{Ret56} = 0,0971409 - 0,348233*\text{rag} - 0,225409*\text{rcg} - 0,368468*\text{rvg} - 0,496889*\text{aci}$$

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0.01, there is a statistically significant relationship between the variables at the 99% confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 38,3394% of the variability in Ret56. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 32,4669%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 0,146979. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu.

The mean absolute error (MAE) of 0,11805 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the DW value is less than 1.4, there may be some indication of serial correlation. Plot the residuals versus row order to see if there is any pattern which can be seen.

In determining whether the model can be simplified, notice that the highest P-value on the independent variables is 0,0323, belonging to rcg. Since the P-value is less than 0.05, that term is statistically significant at the 95% confidence level. Consequently, you probably don't want to remove any variables from the model.

## Multiple Regression Analysis

-----  
 Dependent variable: Ret224 - **Retração aos 224 dias - modelo linear**  
 -----

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	0,124057	0,228121	0,543819	0,5894
a/c	-1,08092	0,279887	-3,862	0,0004
rcg	-0,235617	0,158487	-1,48666	0,1446
rvg	-0,423852	0,158487	-2,67436	0,0106
rag	-0,32644	0,158487	-2,05972	0,0457
rcm	-0,524286	0,152703	-3,43337	0,0014
rvm	-0,297933	0,152703	-1,95106	0,0577
ram	-0,440893	0,160157	-2,75287	0,0087

-----

## Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	2,37148	7	0,338783	5,79	0,0001
Residual	2,45576	42	0,0584704		
Total (Corr.)	4,82724	49			

-----

R-squared = 49,1271 percent  
 R-squared (adjusted for d.f.) = 40,6483 percent  
 Standard Error of Est. = 0,241807  
 Mean absolute error = 0,161919  
 Durbin-Watson statistic = 1,23781

## The StatAdvisor

-----  
 The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between Ret224 and 7 independent variables. The equation of the fitted model is

$$\text{Ret224} = 0,124057 - 1,08092 \cdot \text{aci} - 0,235617 \cdot \text{rcg} - 0,423852 \cdot \text{rvg} - 0,32644 \cdot \text{rag} - 0,524286 \cdot \text{rcm} - 0,297933 \cdot \text{rvm} - 0,440893 \cdot \text{ram}$$

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0.01, there is a statistically significant relationship between the variables at the 99% confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 49,1271% of the variability in Ret224. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 40,6483%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 0,241807. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 0,161919 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the DW value is less than 1.4, there may be some indication of serial correlation. Plot the residuals versus row order to see if there is any pattern which can be seen.

In determining whether the model can be simplified, notice that the highest P-value on the independent variables is 0,1446, belonging to rcg. Since the P-value is greater or equal to 0.10, that term is not statistically significant at the 90% or higher confidence level.

Consequently, you should consider removing rcg from the model.

## Nonlinear Regression

-----  
 Dependent variable: rps224- Retração por secagem aos 224 dias - modelo não-linear  
 Independent variables:

a/c  
 rcg  
 rvg  
 rag  
 rcm  
 rvm  
 ram

Function to be estimated:

$(b0*aci^{0,5})*(1+b1*rcg+b2*rvg+b3*rag)*(1+b4*rcm+b5*rvm+b6*ram)$

Estimation method: Marquardt

Estimation stopped due to convergence of residual sum of squares.

Number of iterations: 4

Number of function calls: 34

## Estimation Results

Parameter	Estimate	Asymptotic Standard Error	Asymptotic 95,0% Confidence Interval	
			Lower	Upper
b0	796,027	152,278	488,929	1103,12
b1	0,231759	0,1935	-0,158472	0,621989
b2	0,432226	0,217897	-0,00720559	0,871658
b3	0,351416	0,209257	-0,0705917	0,773424
b4	0,686913	0,279022	0,12421	1,24962
b5	0,411684	0,242242	-0,0768451	0,900214
b6	0,567189	0,264164	0,0344491	1,09993

## Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square
Model	7,49822E7	7	1,07117E7
Residual	2,45143E6	43	57010,0
Total	7,74337E7	50	
Total (Corr.)	4,82763E6	49	

R-Squared = 49,2209 percent

R-Squared (adjusted for d.f.) = 42,1355 percent

Standard Error of Est. = 238,768

Mean absolute error = 165,533

Durbin-Watson statistic = 1,24287

## Residual Analysis

	Estimation	Validation
n	50	
MSE	57010,0	
MAE	165,533	
MAPE	13,6667	
ME	-1,966	
MPE	-3,44724	

## The StatAdvisor

-----  
 The output shows the results of fitting a nonlinear regression model to describe the relationship between rps224 and 7 independent variables. The equation of the fitted model is

$(796,027*aci^{0,5})*(1+0,231759*rcg+0,432226*rvg+0,351416*rag)*(1+0,686913*rcm+0,411684*rvm+0,567189*ram)$

In performing the fit, the estimation process terminated successfully after 4 iterations, at which point the estimated coefficients appeared to converge to the current estimates.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 49,2209% of the variability in rps224. The adjusted R-Squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 42,1355%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 238,768. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Forecasts option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 165,533 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Because the DW value is less than 1.4, there may be some indication of serial correlation. Plot the residuals versus row order to see if there is any pattern which can be seen.

The output also shows asymptotic 95,0% confidence intervals for each of the unknown parameters. These intervals are approximate and most accurate for large sample sizes. You can determine whether or not an estimate is statistically significant by examining each interval to see whether it contains the value 0.0. Intervals covering 0.0 correspond to coefficients which may well be removed from the model without hurting the fit substantially.

Nonlinear Regression

-----  
 Dependent variable: vpp  
 Independent variables:  
     aci  
     agc  
     agv  
     aga  
     amc  
     amv  
     ama

Function to be estimated:  
 $b0*(aci^{b7})*(1+b1*agc+b2*agv+b3*aga)*(1+b4*amc+b5*amv+b6*ama)$

Estimation method: Marquardt  
 Estimation stopped due to convergence of parameter estimates.  
 Number of iterations: 4  
 Number of function calls: 37

Estimation Results

Parameter	Estimate	Standard Error	Asymptotic		Asymptotic 95,0% Confidence Interval
			Error Lower	Upper	
b0	15,1233	0,529057	14,0557	16,191	
b7	0,228476	0,0249914	0,178041	0,278911	
b1	0,399434	0,0428129	0,313034	0,485835	
b2	0,638213	0,0486629	0,540007	0,736418	
b3	0,472177	0,0446727	0,382023	0,56233	
b4	0,298821	0,0347789	0,228634	0,369008	
b5	0,285741	0,0345208	0,216075	0,355407	
b6	0,196708	0,0328973	0,130319	0,263098	

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square
Model	29735,3	8	3716,92
Residual	32,1884	42	0,766389
Total	29767,5	50	
Total (Corr.)	514,564	49	

R-Squared = 93,7445 percent  
 R-Squared (adjusted for d.f.) = 92,702 percent  
 Standard Error of Est. = 0,875437  
 Mean absolute error = 0,591791

## Residual Analysis

```

-----
Estimation      Validation
n              50
MSE    0,766389
MAE    0,591791
MAPE   2,51402
ME     0,000615597
MPE   -0,104648

```

## The StatAdvisor

-----

The output shows the results of fitting a nonlinear regression model to describe the relationship between vpp and 7 independent variables. The equation of the fitted model is

$$15,1233*(aci^{0,228476})*(1+0,399434*agc+0,638213*agv+0,472177*aga)*(1+0,298821*amc+0,285741*amv+0,196708*ama)$$

In performing the fit, the estimation process terminated successfully after 4 iterations, at which point the residual sum of squares appeared to approach a minimum.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 93,7445% of the variability in vpp. The adjusted R-Squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 92,702%. The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 0,875437. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Forecasts option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 0,591791 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Because the DW value is greater than 1.4, there is probably not any serious autocorrelation in the residuals.

The output also shows asymptotic 95,0% confidence intervals for each of the unknown parameters. These intervals are approximate and most accurate for large sample sizes. You can determine whether or not an estimate is statistically significant by examining each interval to see whether it contains the value 0.0. Intervals covering 0.0 correspond to coefficients which may well be removed from the model without hurting the fit substantially. As none of the intervals contains the zero, all terms and respective coefficients should be maintained in the model.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)