

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

TESE DE DOUTORADO

AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM
AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Mônica Batista Leite

Orientadora: Prof^a. Dr.^a Denise Carpena Coitinho Dal Molin

Porto Alegre

2001

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

TESE DE DOUTORADO

AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM
AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Mônica Batista Leite

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil da Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Doutor em Engenharia

Orientadora: Prof^a. Dr.^a Denise Carpena Coitinho Dal Molin

Porto Alegre

2001

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

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

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

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Paulo José Melaragno Monteiro
PhD., University of Califórnia, Berkeley (Universidade
da Califórnia, Berkeley)

Prof. Dr. Vladimir Antônio Paulon
Dr. pela Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Washington Almeida Moura
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
PhD., University of Leeds (Universidade de Leeds,
Inglaterra)

Dedico este trabalho a toda minha família, em especial,

aos meus pais, João Leite e Airma,

aos meus irmãos, Kelly Regina e João Lincoln,

e a Ana Maria que me apoiaram e me deram força em todos os momentos para que eu realizasse mais este sonho.

Quero dedicá-lo também ao meu grande amigo Washington Moura.

...

E aprendi que se depende sempre

De tanta muita diferente gente

Toda pessoa sempre é as marcas

Das lições diárias de outras tantas pessoas

É tão bonito quando a gente entende

Que a gente é tanta gente

Onde quer que a gente vá

É tão bonito quando a gente sente

Que nunca está sozinho

Por mais que se pense estar.

...

(Luís Gonzaga Júnior)

AGRADECIMENTOS

As nossas conquistas são fruto de grande esforço pessoal e colaboração de muitas pessoas. O apoio de todos foi fundamental para realização desta pesquisa e não é possível encerrá-lo sem antes agradecer especialmente a algumas destas pessoas.

À Professora Denise Dal Molin pela orientação séria, pela disponibilidade apresentada em todos os momentos e pela amizade dispensados durante todo o curso. Obrigada sobretudo por acreditar no meu potencial. O seu exemplo é bastante valioso a todos que estão ao seu lado.

À Giovana Pasa da Engenharia de Produção pelo apoio dispensado no desenvolvimento e análise do projeto estatístico de experimentos realizado nesta pesquisa e ao Professor José Luís Ribeiro pelas contribuições durante a análise dos dados.

À Professora Angela Masuero, pelo conhecimento transmitido e por todo apoio e amizade dispensados durante a execução deste trabalho, sempre pronta a ajudar no que fosse possível.

Aos Professores Ruy Cremonini, Carlos Formoso e todos os outros professores do NORIE pelo conhecimento transmitido.

Ao Professor Paulo Monteiro pelas valiosas contribuições dadas ao desenvolvimento do nosso trabalho.

Ao grande Professor e sobretudo Amigo Washington Almeida Moura que sempre acreditou na minha capacidade. A amizade, o companheirismo, a alegria e o carinho são pontos fortes da sua personalidade. Hoje devo agradecer muito toda inestimável amizade e colaboração recebidas.

Às grandes amigas Thaís e Valéria que a Pós-graduação me deu a oportunidade de conhecer. Obrigada pelo apoio e amizade de vocês em todos os momentos difíceis desta caminhada e também por comemorar todas as vitórias em cada etapa vencida. A minha conquista é também de vocês.

Aos amigos Barros Neto e Andréa, Antônio Eduardo, Ercília, Fábio Peixoto, Keller Augustus, Carlos Alberto e Roberto Barbosa que junto com as meninas e Washington formaram a nossa grande família em Porto Alegre e ajudaram a amenizar a saudade de casa.

À Patrícia Pedrozo, companheira de pesquisa de todas as horas, com quem atravessei todos os momentos deste trabalho e com quem dividi todas as angustias e alegrias durante a realização da pesquisa.

À amiga Graziella Oliari pela amizade, solidariedade e carinho durante os dois anos primeiros anos em Porto Alegre.

Aos colegas de turma Andréa Kern, Alessandra Brito, e Martha Alves pelo companheirismo, dificuldades e alegrias divididos durante a fase dos créditos.

Aos amigos Aguida Abreu, Adriana Silveira, Adriana Gumieri, Fernanda, Marlova, Adriane, Maurício Bernardes, Jairo Andrade, Elvira, Tamara, Rosana, Márcia Sperb, Alberto Folle, Márcio Carvalho, Márcio Barata, Nelson, Felice, Andréa Naguissa, Maki Tokudome, Marcelo Azambuja, Giane, Cristina e muitos outros com quem tive a oportunidade de conviver.

À Ariane pela amizade e toda ajuda dispensada durante a difícil fase da análise de dados.

À Lúcia Helena e a Luís Carlos pela presteza e disponibilidade de todos os momentos.

Aos auxiliares de pesquisa do Norie: Daniel Pagnussat; Guilherme Lovati; Alexandre Salani; Luiz Carlos; Gustavo; Rodrigo Benedeti; Diego; Ivy; Claudia Abreu; Fabiano e todos os outros que ajudam a transformar em realidade os desejos de cada um de nós. Sem vocês as pesquisas estariam em muito comprometidas. Obrigada pela dedicação e carinho.

Aos amigos do LEME: Fontes, Airton, Ederson, Flávio, Seu Texeirinha e Bueno. O profissionalismo e amizade de cada um de vocês é que nos ajudam a dar continuidade aos nossos sonhos. Ainda, aos amigos Andriei Beber, Alexandre, Ranier e Luiz Carlos pela paciência e boa vontade na resolução de problemas durante a execução dos ensaios mecânicos deste trabalho. Também aos auxiliares de pesquisa do LEME: Alessandra, Theisen, Eduardo, e Tarso pelas horas de trabalho dispensadas à nossa pesquisa.

À CAPES pelo financiamento da bolsa de estudo e pelo apoio individual a esta pesquisa.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFRGS pela oportunidade e apoio dados no transcorrer do curso.

Ao Departamento Municipal de Limpeza Urbana de Porto Alegre pelo apoio na coleta e transporte do material usado nesta pesquisa.

À Cimentos Itambé e a SIKA pela doação de alguns dos materiais necessários ao desenvolvimento desta pesquisa.

Aos meus pais, irmãos e todas as pessoas da minha família de quem furtei os três últimos anos de convivência e que estiveram sempre dispostos a me apoiar. Por vocês e em vocês busquei forças para seguir o meu caminho apesar da enorme saudade.

A minha tia Maria, a Aline e Raul, por estarem sempre próximos da minha família. Aos meus tios Adelma e Peter, e a Tia Hilda pelo apoio dado durante a minha formação educacional.

A todos os amigos da Universidade Estadual de Feira de Santana, Departamento e do Laboratório de Tecnologia. Em especial a Jardel, Wilma e Áurea pelo constante incentivo e disponibilidade.

A Cristóvão César pelo inestimável incentivo e colaboração dados em todos os momentos desde que o conheci. Obrigada pelo apoio, amizade e carinho de sempre.

Aos amigos distantes Cristina Mascarenhas, Jana Manuela, Paulo Peruna, Ailton, Edvaldo, Consuelo, Marcelo, Edson, César, Gustavo e tantos outros que mesmo de longe participaram com seu incentivo e confiança.

A todos que contribuíram de alguma forma para o desenvolvimento deste trabalho.

A Deus pela fé, perseverança e por estar presente em todos os momentos na minha vida.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	XII
LISTA DE TABELAS.....	XV
RESUMO	XVIII
ABSTRACT	XIX
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	6
1.2 ESTRUTURA DA APRESENTAÇÃO DA PESQUISA.....	6
2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	8
2.1 TERMINOLOGIA.....	8
2.2 HISTÓRICO	10
2.3 DEFINIÇÃO, ORIGEM E CLASSIFICAÇÃO DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO.....	11
2.4 IMPACTO AMBIENTAL CAUSADO PELOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	14
2.5 COMPOSIÇÃO DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO.....	19
2.5.1 Panorama das perdas de materiais na construção civil	19
2.5.2 Composição do resíduo.....	21
2.5.3 Impurezas na composição do resíduo de construção e demolição.....	25
2.6 BENEFICIAMENTO DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO	29
2.6.1 Usinas de reciclagem.....	30
2.6.2 Tipos de processos de beneficiamento do resíduo de construção.....	33
2.6.3 Equipamentos para beneficiamento do resíduo de construção e demolição.....	37
2.6.4 Moinho e argamassadeira	40
2.6.5 Separação dos resíduos de construção e demolição	40
2.7 ASPECTOS ECONÔMICOS E PRÁTICOS DO ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	42
2.8 NORMAS, PROPOSTAS E ESPECIFICAÇÕES PARA AGREGADOS RECICLADOS.....	46
3 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO PARA PRODUÇÃO DE CONCRETOS..	62
3.1 USO DO MATERIAL RECICLADO COMO AGREGADO.....	62
3.1.1 Composição granulométrica	63
3.1.2 Forma e textura das partículas.....	66
3.1.3 Massa específica e massa unitária	67
3.1.4 Absorção de água	71
3.1.5 Desgaste por abrasão do agregado.....	77
3.1.6 Teor de matéria orgânica e materiais pulverulentos.....	78
3.2 CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO.....	78
3.2.1 Aspectos relativos à dosagem de concretos com agregados reciclados.....	78

3.2.2	Propriedades do concreto reciclado	80
3.2.2.1	Massa específica	80
3.2.2.2	Trabalhabilidade	81
3.2.2.2.1	Trabalhabilidade dos concretos reciclados	81
3.2.2.2.2	Avaliação da trabalhabilidade dos concretos	86
3.2.2.3	Resistência à compressão	88
3.2.2.4	Resistência à tração	94
3.2.2.5	Módulo de deformação	97
3.2.3	Durabilidade	100
3.2.4	Uso de aditivos e adições no concreto reciclado	105
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL	107
4.1	PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS E PROJETO ESTATÍSTICO UTILIZADO	107
4.2	PROPRIEDADES AVALIADAS – MÉTODOS DE ENSAIO	112
4.2.1	Massa específica	112
4.2.2	Trabalhabilidade	112
4.2.2.1	Abatimento do tronco de cone	113
4.2.2.2	Perda de abatimento	113
4.2.2.3	Trabalhabilidade e perda de trabalhabilidade dos concretos reciclados medidas através do abatimento do tronco de cone e do ensaio VeBe	114
4.2.2.3.1	Procedimento do ensaio	115
4.2.2.3.2	Produção dos concretos	116
4.2.3	Resistência à compressão axial	117
4.2.4	Resistência à tração na flexão	117
4.2.5	Resistência à tração por compressão diametral	117
4.2.6	Módulo de deformação	117
4.2.7	Investigação da microestrutura dos concretos	119
4.3	DEFINIÇÃO E COLETA DA AMOSTRA DE RESÍDUO	119
4.4	BENEFICIAMENTO DO RESÍDUO	121
4.5	DEFINIÇÃO DA FAIXA GRANULOMÉTRICA PARA O AGREGADO MIÚDO RECICLADO	122
4.6	DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO	125
4.7	SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	127
4.7.1	Cimento	127
4.7.2	Agregados	128
4.7.2.1	Propriedades dos agregados	129
4.7.2.1.1	Composição granulométrica	129
4.7.2.1.2	Massa específica e massa unitária	133
4.7.2.1.3	Absorção de água dos agregados	135
4.7.2.1.4	Índice de forma	141
4.7.3	Aditivo	142
4.8	DOSAGEM EXPERIMENTAL	142
4.8.1	Ajuste do teor ideal de argamassa	142
4.8.2	Traços auxiliares	143
4.8.3	Definição dos traços do concreto de referência e do concreto reciclado	144

4.9	PRODUÇÃO DO CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO	145
4.9.1	Mistura dos materiais.....	145
4.9.2	Moldagem, adensamento e cura dos corpos-de-prova.....	145
5	APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA O CONCRETO NO ESTADO FRESCO.....	147
5.1	MASSA ESPECÍFICA	148
5.1.1	Efeito isolado do teor de substituição do agregado graúdo reciclado (%AGR) e do agregado miúdo reciclado (%AMR) sobre a massa específica do concreto.....	148
5.1.2	Efeito isolado da relação a/c sobre a massa específica do concreto.....	149
5.1.3	Considerações gerais	150
5.2	TRABALHABILIDADE	151
5.2.1	Abatimento do tronco de cone.....	151
5.2.1.1	Efeito isolado da variável AGR sobre o abatimento do concreto.....	152
5.2.1.2	Efeito isolado da relação a/c sobre o abatimento do concreto	153
5.2.1.3	Efeito da interação a/cxAGR sobre o abatimento do concreto	154
5.2.1.4	Efeito da interação AGRxAMR sobre o abatimento do concreto.....	154
5.2.1.5	Efeito da interação a/cxAGRxAMR no abatimento do concreto	155
5.2.1.6	Considerações gerais.....	157
5.2.2	Perda de abatimento do concreto.....	161
5.2.3	Avaliação da trabalhabilidade e da perda de trabalhabilidade dos concretos reciclados através do abatimento do tronco de cone e do ensaio VeBe.....	164
5.2.3.1	Relação a/c e resistência à compressão	164
5.2.3.2	Ensaio de abatimento do tronco de cone e ensaio para medida do tempo VeBe	167
5.2.4	Considerações gerais	171
6	APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA O CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO.....	172
6.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	172
6.1.1	Efeito isolado da relação a/c sobre a resistência à compressão axial do concreto.....	173
6.1.2	Efeito isolado do teor de substituição do agregado graúdo reciclado (%AGR) e do agregado miúdo reciclado (%AMR) sobre a resistência à compressão axial do concreto.....	174
6.1.3	Efeito isolado da Idade sobre a resistência à compressão axial do concreto.....	175
6.1.4	Efeito da interação a/cxAGR sobre a resistência à compressão axial do concreto	176
6.1.5	Efeito da interação a/cxIdade sobre a resistência à compressão	178
6.1.6	Efeito da interação AMRxIdade sobre a resistência à compressão dos concretos	179
6.1.7	Efeito da interação a/cxAGRxIdade sobre a resistência à compressão do concreto.....	181
6.1.8	Considerações gerais	186
6.2	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	189
6.2.1	Efeito isolado de a/c sobre a resistência à tração.....	191
6.2.2	Efeito isolado de AMR sobre a resistência à tração.....	192
6.2.3	Efeito da interação a/cxAMR sobre a resistência à tração	194
6.2.4	Efeito da interação entre a/cxAGR sobre a resistência à tração.....	195
6.2.5	Relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão axial do concreto.....	197

6.2.6	Considerações gerais	199
6.3	MÓDULO DE DEFORMAÇÃO	201
6.3.1	Efeito isolado da relação a/c sobre o módulo de deformação do concreto	203
6.3.2	Efeito isolado do teor de substituição de AGR sobre o módulo de deformação do concreto	203
6.3.3	Efeito da interação AGRxAMR sobre o módulo de deformação do concreto	204
6.3.4	Relação entre o módulo de deformação e a resistência à compressão do concreto.....	206
6.3.5	Considerações gerais	206
6.4	ANÁLISE DA MICROESTRUTURA DO CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO	207
6.4.1	Análise em MEV através de elétrons secundários	208
6.4.2	Análise em MEV através de elétrons retroespalhados.....	211
7	AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DO MATERIAL CERÂMICO PRESENTE NOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO E SUA INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO RECICLADO	215
7.1	ATIVIDADE POZOLÂNICA E O AGREGADO MIÚDO RECICLADO	215
7.2	AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DO MATERIAL CERÂMICO PRESENTE NO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	219
7.2.1	Atividade pozolânica com a cal.....	220
7.2.2	Atividade pozolânica com o cimento.....	221
7.2.3	Considerações gerais	223
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	224
8.1	CONCLUSÕES	224
8.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	234
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	237
ANEXOS	250
ANEXO 1	RESULTADOS DOS ENSAIOS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	251
ANEXO 2	RESULTADOS DO ENSAIO DE GRANULOMETRIA A LASER DO CIMENTO PORTLAND COMUM E DO AGREGADO MIÚDO RECICLADO PASSANTE NA PENEIRA # 0,15 MM	257
ANEXO 3	PROPOSTA DE NORMA PARA O ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DE AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	263
ANEXO 4	PROPOSTA DE NORMA PARA O ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	266

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Hierarquia da disposição de resíduos de construção e demolição (PENG et al., 1997)	16
Figura 2	Distribuição da composição média de resíduos de construção coletadas em São Carlos (PINTO, 1986).....	22
Figura 3	Porcentagem média dos constituintes do resíduo de construção coletados na Usina de Ribeirão Preto em diferentes períodos (ZORDAN, 1997; LATTERZA, 1998)	22
Figura 4	Composição do resíduo de construção e demolição da cidade de Salvador/Ba (CARNEIRO et al., 2000).....	23
Figura 5	Composição média de resíduos provenientes de construção em Hong Kong	24
Figura 6	Composição média de resíduos de demolição em Hong Kong.....	24
Figura 7	Sistemas da produção de resíduos de construção e demolição da Primeira Geração de Plantas de Processamento. a) Sistema aberto b) Sistema fechado (BOESMAN, citado por HANSEN, 1992).....	35
Figura 8	Sistemas da produção de resíduos de construção e demolição da Segunda Geração de Plantas de Processamento (HANSEN, 1992).....	36
Figura 9	Resumo dos principais termos relativos à trabalhabilidade e dos ensaios empregados na sua caracterização (CECCATO, 1998)	88
Figura 10	Projeto de composição central para 3 fatores ou variáveis adotado para realização da pesquisa	109
Figura 11	a) Sistemas para medida de deformação em corpos-de-prova de concreto. b) Extensômetro elétrico e circuitos para posterior conexão ao aquisitor de dados.....	118
Figura 12	Seleção e estocagem do lote de resíduos no Aterro da Zona Sul de Porto Alegre	120
Figura 13	Detalhes da coleta da amostra de resíduo. a) Mistura e homogeneização do material no aterro. b) Coleta da amostra para posterior transporte	121
Figura 14	Deposição da amostra de resíduo no Campus centro da UFRGS.....	121
Figura 15	a) Britador de mandíbulas para produção de agregados com graduações maiores. b) Britador de mandíbulas para produção de agregados de graduações menores.....	122
Figura 16	Medida do índice de consistência de argamassas: a) argamassa de referência, relação a/c=0,50; b) argamassa reciclada, relação a/c=0,50	124
Figura 17	Distribuição da composição média dos resíduos de construção e demolição coletados no Aterro de Inertes da Zona Sul de Porto Alegre	127
Figura 18	Aspecto geral dos agregados reciclados: a) Agregado miúdo; b) Agregado graúdo	129
Figura 19	Curvas granulométricas dos agregados miúdos natural e reciclado e respectivos limites inferior e superior da areia média especificada pela NBR 7211 (1983)	131
Figura 20	Curvas granulométricas dos agregados graúdos natural e reciclado e respectivos limites inferior e superior da brita 1 especificada pela NBR 7211 (1983).....	131
Figura 21	Ensaio de absorção do agregado reciclado: a) Recipiente utilizado para execução do ensaio de absorção; b) Amostra de agregado submersa e balança hidrostática utilizada para efetuar as medidas durante a realização do ensaio.....	137

Figura 22	Curva de absorção do agregado miúdo reciclado.....	139
Figura 23	Curva de absorção do agregado graúdo reciclado	139
Figura 24	Curva de perda de água para o agregado graúdo reciclado	140
Figura 25	Diagrama de dosagem dos concretos	143
Figura 26	Efeito isolado do %AGR e do %AMR sobre a massa específica do concreto fresco.....	149
Figura 27	Efeito isolado da relação a/c sobre a massa específica do concreto fresco	150
Figura 28	Efeito combinado das variáveis a/c, AGR e AMR sobre a massa específica do concreto e percentuais de massa específica em relação ao concreto de referência.....	150
Figura 29	Efeito isolado do % AGR sobre o abatimento do concreto	152
Figura 30	Efeito isolado da relação a/c sobre o abatimento do concreto.....	153
Figura 31	Abatimento em função do efeito da interação a/cxAGR.....	154
Figura 32	Abatimento em função do efeito da interação AGRxAMR: a) Gráfico do abatimento em função do % AGR; b) Gráfico do abatimento em função do % AMR	155
Figura 33	Abatimento do concreto em função do efeito da interação a/cxAGRxAMR: a) a/c = 0,40; b) a/c = 0,45; c) a/c = 0,60; d) a/c = 0,75; e) a/c = 0,80	157
Figura 34	Gráficos de abatimento em função da relação a/c e dos teores de AMR e AGR.....	159
Figura 35	Percentuais de abatimento em relação à leitura inicial de cada traço	162
Figura 36	Índice de perda de abatimento dos concretos em relação à leitura inicial: a) a/c = 0,40; b) a/c = 0,60; c) a/c = 0,80	169
Figura 37	Índice de ganho no tempo VeBe dos concretos em relação à leitura final: a) a/c = 0,40; b) a/c = 0,60; c) a/c = 0,80	171
Figura 38	Resistência à compressão axial em função do efeito isolado da relação a/c.....	173
Figura 39	Resistência à compressão em função do efeito isolado do teor de substituição do agregado	174
Figura 40	Resistência à compressão em função do efeito isolado da idade.....	175
Figura 41	Resistência à compressão em função do efeito da interação a/cxAGR: a) Gráfico de $f_c(\%AGR)$; b) Gráfico $f_c(a/c)$	176
Figura 42	Resistência à compressão do concreto em função do efeito da interação a/cxIdade.....	178
Figura 43	Resistência à compressão do concreto em função do efeito da interação AMRxidade.....	179
Figura 44	Resistência à compressão do concreto em função do efeito da interação a/cxAGRxidade: a) a/c = 0,40; b) a/c = 0,45; c) a/c = 0,60; d) a/c = 0,75; e) a/c = 0,80.....	182
Figura 45	Efeito da interação a/cxAGRxidade sobre a resistência à compressão dos concretos.....	183
Figura 46	Curvas de resistência à compressão em função da relação a/c	189
Figura 47	Resistência à tração na flexão ($ft'F$) e por compressão diametral ($ft'D$) em função do efeito isolado da relação a/c	192
Figura 48	Resistência à tração na flexão ($ft'F$) e por compressão diametral ($ft'D$) em função do efeito isolado de AMR.....	193
Figura 49	Resistência à tração por compressão diametral: a) $ft'D$ em função do efeito de AMR; b) $ft'D$ em função do efeito de a/c.....	194

Figura 50	Resistência à tração por compressão diametral: a) f_t^D em função do efeito de AGR; b) f_t^D em função do efeito de a/c.....	196
Figura 51	Resistência à tração na flexão: a) f_t^F em função do efeito de AGR; b) f_t^F em função do efeito de a/c	196
Figura 52	Curvas de resistência à tração em função de a/c. a) Resistência à tração na flexão; b) Resistência à tração por compressão diametral	200
Figura 53	Módulo de deformação em função da relação a/c	203
Figura 54	Módulo de deformação em função de AGR.....	204
Figura 55	Módulo de deformação em função do efeito da interação AGRxAMR.....	205
Figura 56	Curvas de módulo de deformação em função da relação a/c	207
Figura 57	Vista geral da interface pasta/agregado dos concretos ampliadas 200x. a) Agregado de argamassa; b) Agregado de concreto; c) Agregado de material cerâmico; d) Concreto de referência.....	209
Figura 58	Imagens com magnificação de 8000x das imagens da Figura 57. a) Agregado de argamassa; b) Agregado de concreto; c) Agregado de material cerâmico; d) Concreto de referência.....	210
Figura 59	Imagens com magnificação de 20000x da Figura 57. a) Agregado de concreto; b) Agregado de material cerâmico; c) Concreto de referência	211
Figura 60	Imagens com magnificação de 33000x da Figura 57. a) Agregado de concreto; b) Concreto de referência	211
Figura 61	Vista geral das amostras de concreto, aumento de 65x. a) Agregado de argamassa; b) Agregado de concreto; c) Agregado de material cerâmico; d) Concreto de referência.....	212
Figura 62	Aumento 400x das imagens da 0. a) Agregado de argamassa; b) Agregado de concreto; c) Agregado de material cerâmico; d) Concreto de referência.....	213
Figura 63	Aumento de 1600x das imagens da 0. a) Agregado de argamassa; b) Agregado de concreto; c) Agregado de material cerâmico; d) Concreto de referência	214
Figura 64	Curva da composição granulométrica do cimento Portland CP I S 32.....	258
Figura 65	Curva da composição granulométrica do material cerâmico passante na peneira # 0,15 mm – Amostra 01.....	260
Figura 66	Curva da composição granulométrica do material cerâmico passante na peneira # 0,15 mm – Amostra 02.....	262

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Dados sobre a geração de resíduos de construção em algumas cidades brasileiras.....	19
Tabela 2	Percentuais de perdas na construção em algumas cidades brasileiras e países estrangeiros..	21
Tabela 3	Componentes do resíduo de construção e suas fontes geradoras	23
Tabela 4	Custos de gerenciamento de resíduos de construção em alguns municípios.....	44
Tabela 5	Custos usuais quando não há gerenciamento nem reciclagem dos resíduos gerados.....	45
Tabela 6	Custos estimados para reciclagem interna em canteiros de obras.....	46
Tabela 7	Tipos de concretos de agregado reciclado e valores máximos de resistência à compressão ...	47
Tabela 8	Sugestões de uso para concretos de agregados reciclados.....	47
Tabela 9	Especificações para o agregado graúdo reciclado para produção de concreto.....	48
Tabela 10	Sugestões de uso para os tipos de concreto reciclado definidos pelo RILEM TC 121-DRG	49
Tabela 11	Fatores de avaliação das propriedades do concreto com agregado reciclado	49
Tabela 12	Relação entre parâmetros de concreto com agregado reciclado e convencional.....	51
Tabela 13	Campos de aplicação e restrições dos concretos com agregados reciclados	55
Tabela 14	Teor máximo % de agregados reciclados em concreto em relação: (a) volume total de agregados; (b) ao volume do grupo de agregados	56
Tabela 15	Exigências adicionais para os agregados reciclados de concreto	57
Tabela 16	Concentração máxima de substâncias deletérias nos agregados reciclados, determinadas por decantação	58
Tabela 17	Tipos de agregados reciclados para uso em concreto e sua composição.....	59
Tabela 18	Requisitos para o agregado reciclado usado na produção de concreto.....	60
Tabela 19	Massa específica de agregados de concreto de acordo com a faixa granulométrica estudada	69
Tabela 20	Massa específica de agregados reciclados em função do componente e da faixa granulométrica utilizada	69
Tabela 21	Massa unitária de agregados reciclados de composição mista	70
Tabela 22	Taxas de absorção de agregados reciclados em função do tipo de componente e da granulometria.....	75
Tabela 23	Taxas de absorção de agregados reciclados de concreto em função da sua granulometria.....	75
Tabela 24	Trabalhabilidade das misturas de concreto medidas pelo abatimento do tronco de cone	83
Tabela 25	Índice de permeabilidade kT de concretos reciclados	100
Tabela 26	Variáveis definidas pelo projeto estatístico	110
Tabela 27	Esquema de variáveis analisadas no programa experimental e quantidade de corpos-de-prova a serem ensaiados.....	112
Tabela 28	Traços escolhidos para o ensaio de perda de abatimento.....	114
Tabela 29	Quantidade de amostras para ensaios de microestrutura.....	119

Tabela 30	Traços e quantidades de materiais utilizados na definição da faixa granulométrica do agregado miúdo reciclado.....	124
Tabela 31	Resultados obtidos com as argamassas para escolha da melhor faixa granulométrica de agregado miúdo reciclado a ser usada	125
Tabela 32	Constituintes percentuais do resíduo de construção e demolição da amostra coletada no Aterro de Inertes da Zona Sul de Porto Alegre	126
Tabela 33	Propriedades químicas, físicas e mecânicas do Cimento Portland CP I S – classe 32	128
Tabela 34	Composição granulométrica do agregado miúdo natural e reciclado	130
Tabela 35	Composição granulométrica do agregado graúdo natural e reciclado	130
Tabela 36	Resultados de massa específica e massa unitária dos agregados.....	135
Tabela 37	Taxa de absorção média dos agregados reciclados	138
Tabela 38	Resultados do ensaio de índice de forma dos agregados natural e reciclado	141
Tabela 39	Traços em massa utilizados na produção do concreto de referência e consumo de cimento/m ³	144
Tabela 40	Traços em massa utilizados na produção dos concretos com agregado reciclado	144
Tabela 41	Resumo da quantidade de corpos-de-prova moldados para cada tipo de ensaio por traço de concreto	146
Tabela 42	Níveis codificados de cada uma das variáveis independentes utilizadas	148
Tabela 43	Resultados do ensaio de determinação do índice de consistência pelo abatimento do tronco de cone	151
Tabela 44	Efeito combinado das variáveis a/c, AGR e AMR sobre o abatimento dos concretos	158
Tabela 45	Resultados do ensaio de perda de abatimento do concreto	162
Tabela 46	Resultados do abatimento, do tempo VeBe e relações a/c antes e depois do acréscimo de água às misturas de concreto reciclado.....	164
Tabela 47	Consumo de cimento e resistência à compressão axial dos concretos produzidos.....	166
Tabela 48	Resultados de abatimento das misturas de concreto e suas respectivas relações unitárias de perda de abatimento	168
Tabela 49	Resultados de tempo de vibração VeBe das misturas de concreto e suas respectivas relações unitárias de ganho de tempo de vibração.....	170
Tabela 50	Percentual de hidratação do concreto em relação a resistência à 28 dias	179
Tabela 51	Percentual de hidratação do concreto em relação a resistência à 28 dias, na análise da interação AMR x Idade	180
Tabela 52	Comparação geral das resistências à compressão dos concretos com diferentes teores de substituição do agregado natural pelo reciclado e evolução do grau de hidratação	187
Tabela 53	Modelos ajustados para estimativa das resistências à tração dos concretos reciclados	190
Tabela 54	Resumo dos fatores significativos sobre a resistência à compressão aos 28 dias, à tração por compressão diametral e tração na flexão, em ordem de importância.....	191
Tabela 55	Relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão dos concretos – ft/fc28 (%)	198
Tabela 56	Relação entre a resistência à tração do concreto reciclado em relação ao de referência	201

Tabela 57	Modelos ajustados para estimativa de módulo de deformação dos concretos	202
Tabela 58	Relação entre o módulo de deformação do concreto reciclado e o concreto de referência.....	207
Tabela 59	Resultados do ensaio de pozolanicidade pelo método de Chapelle modificado de agregados reciclados de resíduos de C&D.....	217
Tabela 60	Resultados do ensaio de pozolanicidade pelo método de Chapelle modificado de agregados reciclados de resíduos de material cerâmico	218
Tabela 61	Teor de Ca(OH)_2 nas argamassas (avaliação semi-quantitativa)	218
Tabela 62	Massa específica e quantidade de materiais utilizados na determinação da atividade pozolânica com a cal	220
Tabela 63	Resultados do ensaio de atividade pozolânica do material cerâmico com a cal.....	221
Tabela 64	Massa específica e quantidade de materiais utilizados na determinação da atividade pozolânica com o cimento Portland	222
Tabela 65	Resultados do ensaio de atividade pozolânica do material cerâmico com cimento Portland...	222
Tabela 66	Resultados da massa específica dos concretos com agregados reciclados.....	252
Tabela 67	Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial – 3 e 7 dias.....	253
Tabela 68	Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial – 28 e 91 dias.....	254
Tabela 69	Resultados dos ensaios de resistência à tração	255
Tabela 70	Resultados dos ensaios de módulo de deformação	256
Tabela 71	Composição granulométrica do cimento Portland CP I S 32	257
Tabela 72	Composição granulométrica do material cerâmico passante na peneira # 0,15 mm – Amostra 01	259
Tabela 73	Composição granulométrica do material cerâmico passante na peneira # 0,15 mm – Amostra 02	261
Tabela 74	Intervalos para leituras do ensaio de absorção do agregado reciclado	270

RESUMO

A preocupação com o meio ambiente e a escassez de recursos naturais têm levado à busca por alternativas de crescimento mais sustentáveis, por parte de todos os segmentos da sociedade. Dentro desta corrida pelo bem estar ambiental, a reciclagem de resíduos tem se mostrado uma boa alternativa na redução do impacto causado pelo consumo desordenado de matéria-prima e pela redução das áreas de disposição, em virtude do grande volume de resíduos descartados a cada ano em todo mundo. Neste contexto se inserem os resíduos da construção civil. Transformá-los em fonte alternativa de matéria-prima dentro do próprio setor constitui um desafio para o meio técnico-científico. Neste sentido, tem se tentado incorporar os resíduos de construção e demolição na produção de concretos convencionais, o que aumentaria seu potencial de utilização. Assim, este trabalho foi desenvolvido com objetivo de estudar a influência da utilização de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para produção de concretos. O estudo apresenta resultados da investigação das características granulométricas e físicas dos agregados miúdo e graúdo reciclados obtidos a partir do beneficiamento de resíduos de construção e demolição, coletados no Aterro de Inertes da Zona Sul de Porto Alegre. Para produção dos concretos foram consideradas cinco relações a/c (0,40; 0,45; 0,60; 0,75 e 0,80) e cinco níveis de substituição tanto do agregado miúdo reciclado (AMR), quanto do agregado graúdo reciclado (AGR), (0%, 11,5%, 50%, 88,5%, 100%), sendo que os níveis das variáveis e as combinações a serem executadas foram definidas através de um projeto estatístico. A influência do agregado reciclado foi avaliada sobre propriedades do concreto no estado fresco (massa específica e trabalhabilidade) e propriedades do concreto no estado endurecido (resistência à compressão, resistência à tração na flexão e tração por compressão diametral, e módulo de deformação). A partir dos resultados foram obtidos modelos matemáticos para estimar cada uma das propriedades avaliadas, e também, foram estabelecidas as relações entre resistência à tração e módulo de deformação em função da resistência à compressão dos concretos. Os resultados mostraram a viabilidade na utilização do agregado miúdo e graúdo reciclado para produção do concreto.

ABSTRACT

The worry about environment and natural resources shortage has led to seek after a sustainable alternative. The recycling process appears as a good way to minimize this natural resources use and the shortage of proper disposal sites caused by the large amount of waste discarded around the world. The building rubble is in this context. However, the technical-scientific sector is trying to use it as an alternative source of raw materials. The main idea is to incorporate recycled aggregate in conventional concrete to improve its potential use. So, this research focuses on the study of the influence of recycled aggregates from construction and demolition waste on concrete production. This work presents the results of grading characteristics and physical properties of the recycled fine and coarse aggregates obtained from construction and demolition waste. This residue was collected at an inert landfill from Porto Alegre (a big city at the South of Brazil). Five water/cement ratio - 0,40; 0,45; 0,60; 0,75 e 0,80 - and five substitution proportion from fine and coarse recycled aggregate - 0%, 11,5%, 50%, 88,5%, 100% - were considered to produce concrete mixtures. The levels of the variables and the combinations between them were defined by a statistical project. The recycled aggregate influence was analyzed in fresh concrete properties (specific gravity and workability), and in hardened concrete properties (compressive strength, flexural and split tensile strength and modulus of elasticity). Some mathematical models were obtained to estimate the properties evaluated. Also, the relationship between tensile strength and modulus of elasticity in function of compressive strength were achieved at the end of the analysis. Finally, it was found that recycled aggregate has different influence on concrete properties, at different levels.

1 INTRODUÇÃO

O consumo de recursos naturais e de energia têm crescido proporcionalmente ao crescimento e desenvolvimento da população mundial. Com base neste fato, houve significativas mudanças de postura em relação ao meio ambiente nas duas últimas décadas. Primeiro, houve uma grande preocupação com os desastres e catástrofes ambientais. Atualmente, a preocupação ambiental diz respeito, entre outras coisas, ao excessivo ou ineficiente consumo de recursos naturais.

Na tentativa de redução do impacto causado ao ambiente pelas atividades humanas todos os segmentos da sociedade têm buscado repensar suas estratégias de produção. De acordo com DONAIRE (1996), a sobrevivência das empresas e a oportunidade de bons negócios está cada vez mais atrelada às atitudes e medidas tomadas para redução, ou não poluição do meio ambiente. O descrédito institucional que pode ser fruto de posturas não sustentáveis têm sido um importante promotor de mudanças nos conceitos e processos de produção em todos os setores.

Segundo SJÖSTRÖM (2000), a construção civil, que representa um dos setores de maior vulto na sociedade, chegando a contribuir com cerca de 25 % do PIB (no Brasil, este valor corresponde a 14,5%, segundo FIESP, citado por JOHN (2000)), que na Comunidade Européia chega a envolver 30 milhões de operários, sendo o maior setor econômico (SJÖSTRÖM, 2000), é considerado um dos maiores agentes de degradação do meio ambiente. A quantidade de energia e recursos naturais consumidos e o volume de resíduos gerados pelo setor são bastante significativos, indo desde a obtenção de matérias primas, passando pela montagem do produto até sua utilização e demolição.

Várias são as fontes de geração de resíduos na construção civil. Por exemplo, a falta de qualidade dos bens e serviços, no setor da construção, pode dar origem às perdas de materiais, que saem das obras em forma de entulho e contribuem sobremaneira no volume de resíduos gerados. Por outro lado, existem ainda as perdas que não saem da edificação, que podem levar ao mau funcionamento das mesmas e acabam por acarretar o aparecimento de manifestações patológicas. Deste modo, há uma redução da vida útil das estruturas, que necessitarão de manutenção mais frequente, vindo também a propiciar maior consumo de matéria prima e geração de resíduos.

O nível de desenvolvimento sociocultural e econômico dos centros urbanos é outro fator importante quando se fala em geração de resíduos de construção. De acordo com CRUZ, citado por VAZ FILHO e CORDEIRO (2000), na maioria das cidades houve uma urbanização descontrolada, com rápido crescimento da população em áreas restritas. Desde o início do século 20, houve um

crescimento da população urbana de 15 % para 50 %. E isso se reflete no aumento da necessidade do consumo e produção de bens por parte dos centros urbanos. No Brasil, por exemplo, o déficit habitacional é um dos principais propulsores para construção de novas habitações, e assim, aumenta a extração de recursos e a geração de resíduos (CARNEIRO et al., 2000). O crescimento desordenado, além do surgimento de novas concepções arquitetônicas e novos materiais, faz com que frequentemente as construções passem por adaptações e modificações, gerando, deste modo, mais resíduos. O crescimento econômico ocasiona, também, o crescimento do setor de construção, o que acarreta um aumento na demanda de matéria prima e energia, que por ingerência dos processos produtivos pode aumentar também a geração de resíduos.

Adicionalmente, num passado ainda não muito distante, muitas estruturas de concreto foram concebidas sem o conhecimento necessário sobre a sua durabilidade. Isto levou, e leva, ainda hoje, à redução da vida útil das estruturas, causando sério aumento no volume dos resíduos gerados (LEVY e HELENE, 2000). Com o objetivo de aumentar a vida útil destas estruturas são necessárias algumas modificações, por simples necessidade de manutenção ou por questões arquitetônicas, ocasionando a geração de resíduos. Nas reformas e demolições, a falta da cultura de reutilização e reciclagem é a principal causa da geração dos resíduos (ZORDAN, 2000).

É interessante salientar, que apesar das estruturas serem projetadas para durar, em média, de 50 a 100 anos, sua vida de serviço pode ser considerada como imprevisível. O desempenho de cada material que compõe as edificações, sua maior ou menor facilidade de troca e reparos, são as principais causas disso (KIBERT et al., 2000). Os autores apontam, também, que existe uma relação de dependência entre os componentes com ciclo de vida menor e os componentes com ciclo de vida maior. Há a tendência dos últimos controlarem os primeiros. Porém, esse controle possui um limite, e quando este limite é alcançado os componentes com ciclo de vida menor levam a mudanças nos outros fazendo com que o edifício entre em obsolência total, o que leva à geração de resíduos.

Finalmente, os desastres naturais, como terremotos e avalanches, entre outros, os desastres causados pelo homem, como guerras e bombardeios, ou ainda, as falhas estruturais, culminam com a geração de resíduos de construção e demolição (BANTHIA e CHAN, 2000).

Como se vê, não faltam razões para o crescimento do volume de resíduos de construção e demolição. Entretanto, não é só a geração de resíduos que preocupa o setor. Atualmente, encontrar bons agregados naturais próximo a áreas urbanas está cada vez mais difícil. Além disso, as distâncias entre as fontes e os locais de novas construções ficam cada vez maiores (HANSEN, 1992). Problemas com o gerenciamento dos resíduos gerados, o escasseamento de áreas de disposição, e a limpeza

urbana, entre outros, são pontos que também devem ser considerados na análise do impacto ambiental causado por um determinado setor.

Todos estes fatores levam à busca de alternativas para minimizar o impacto gerado pela indústria da construção. A limitação das perdas de materiais se apresenta como a primeira alternativa para sanar o problema da geração de resíduos de construção. Tal solução aparece como boa alternativa para uma utilização mais racional de recursos, redução nos custos dos empreendimentos e redução nos custos de gerenciamento dos resíduos que são ocasionados pelas edificações, seja na fase de construção ou utilização.

Vencer a barreira do baixo patamar tecnológico das edificações, através de um gerenciamento mais eficiente para a construção civil, resultará em produtos finais de maior qualidade. Porém, o fato de existir um desenvolvimento crescente nos centros urbanos, que leva as estruturas à obsolescência, e o fato delas possuírem uma vida útil limitada, com necessidade de manutenções e reparos, leva indubitavelmente a uma contínua geração de resíduos. Deste modo, a disposição deste material e o aumento da demanda por matéria prima para execução de novas obras continua a ser um problema que deve ser resolvido.

A reciclagem é, sem dúvida, a melhor alternativa para reduzir o impacto que o ambiente pode sofrer com o consumo de matéria prima e a geração desordenada de resíduos. Nos últimos anos a reciclagem de resíduos tem sido incentivada em todo o mundo, seja por questões políticas, econômicas ou ecológicas. A reciclagem de resíduos de construção irá minimizar também os problemas com o gerenciamento dos resíduos sólidos dos municípios. Haverá um crescimento da vida útil dos aterros, diminuição dos pontos de descarte clandestinos e redução dos custos de gerenciamento de resíduos. Adicionalmente, haverá um melhor bem estar social e ambiental.

De acordo com JOHN(1996), o mercado da construção civil se apresenta como uma das melhores alternativas para consumir materiais reciclados, pois a atividade de construção é realizada em qualquer região, o que já reduz custos como o de transporte. Além disso, o autor ainda salienta que os materiais necessários para produção da grande maioria dos componentes de uma edificação não precisam de grande sofisticação técnica. O raio de alcance que o resíduo beneficiado pode ter é um ponto importante no conjunto da análise da possibilidade de sua reutilização.

Entretanto, para que um novo produto seja aceito no mercado, em qualquer indústria, é necessário conhecer muito bem o seu comportamento físico, químico e tecnológico. No caso dos resíduos é preciso avaliar, ainda, a possibilidade de impactos que possam ser causados, tais como

contaminações químicas da água ou solo, geração de poluição quando do seu beneficiamento, entre outros (PERA, 1996).

Atualmente muitos tipos de resíduos já estão sendo reciclados, porém sua aplicação ainda é restrita (QUEBAUD et al.,1997). Certos resíduos hoje já são considerados subprodutos¹ de outras indústrias e utilizados como insumos para a construção civil, como é o caso da escória de alto forno, ou da sílica ativa utilizada como adição para produção de concretos, entre outros. Sua utilização entretanto demorou um longo tempo até ser consolidada, o que só ocorreu após a realização de muitos estudos, em várias partes do mundo. O resíduo de construção e demolição merece igualmente um estudo sistemático para o seu total reaproveitamento.

Algumas utilizações dos resíduos de construção já são bem difundidas, como a utilização em base e sub-base de pavimentos, produção de concretos magros sem fins estruturais, produção de blocos de concreto, utilização em projetos de drenagem, entre outros. Todavia, muitos autores concordam que o mercado dos resíduos de construção deve crescer e, em paralelo a isso, que a sua utilização no concreto é sem dúvida uma das melhores alternativas para que tal propósito seja alcançado (BANTHIA e CHAN, 2000; DHIR et al. 1999; COLLINS, 1998b; HENDRIKS E PIETERSEN, 1998; MAULTZSCH e MELLMANN, 1998; VAN DER WEGEN e HAVERKORT, 1998; VYNCKE e ROUSSEAU, 1993; SIMONS e HENDERIECKX, 1993; HANSEN, 1992).

Incorporar resíduos a este material é interessante, uma vez que o concreto é produzido em larga escala (cerca de 6 bilhões de toneladas/ano, segundo DUMET e PINHEIRO (2000)), tem fácil aplicação, é flexível (se adequando bem a várias situações), possui alto potencial para encapsulamento de substâncias nocivas, é durável (se for bem confeccionado), e é razoavelmente resistente à agentes químicos e físicos. BANTHIA e CHAN (2000) afirmam que a incorporação ao concreto é uma das maneiras mais eficientes de gerenciar resíduos de construção e demolição. Do ponto de vista ecológico, o concreto é hoje um dos materiais com menor consumo energético para sua produção, além, é claro, de ser reciclável (PENTALLA, 1997).

Alguns estudos já foram realizados para utilização de resíduos de construção e demolição na produção de concreto, principalmente no exterior (HANSEN, 1992; QUEBAUD, 1996; SCHULZ e HENDRICKS, 1992; RANVIDRARAJAH, et al. 1987; BARRA, 1996; entre outros). Algumas organizações internacionais de pesquisa já possuem, inclusive, normas para utilização deste resíduo na construção, como é o caso do Japão e a Holanda. Países como a Alemanha (um dos precursores

1 Quando um resíduo adquire valor comercial, ele é considerado um subproduto (CINCOTTO, 1988)

do uso de resíduos de demolição), Estados Unidos, Dinamarca, França, Bélgica e Inglaterra já fazem uso deste tipo de resíduo e têm muitos estudos sobre a utilização do material e o seu comportamento. A Holanda, Dinamarca e Bélgica já reciclam hoje mais de 80 % dos seus resíduos de construção e demolição, enquanto em países como a Grécia, Irlanda, Portugal e Espanha esse percentual não chega a 5 % (DORSTHORST e HENDRIKS, 2000). No Brasil o uso deste tipo de resíduo ainda é bastante restrito, e os estudos para utilização do material está bem no início, mas este panorama tende a mudar dentro em breve.

Estudos já realizados indicam que a substituição de até 30 % dos agregados graúdos naturais por agregado reciclado de resíduo de construção não altera significativamente as propriedades dos concretos produzidos, sendo esta, então, a forma mais simples e econômica de utilizar estes agregados (KIKUCHI et al.; KASHINO e TAKAHASHI; e YAMAMOTO, citados por LEVY, 1997).

As diferenças entre as propriedades dos concretos reciclados e convencionais dependem, entre outras variáveis, do teor de agregado natural substituído, das características dos agregados reciclados utilizados, da quantidade de contaminantes presente no agregado e da quantidade de finos incorporada (BANTHIA e CHAN, 2000).

O agregado reciclado possui origem heterogênea, e isso se deve ao grande número de diferentes materiais utilizados na construção civil. Logo, faz-se necessário um controle sistemático envolvendo a sua composição e variação de suas características (QUEBAUD, et al. 1997; ZORDAN, 1997; GALLIAS, 1998). Por isso os concretos com agregados reciclados podem apresentar um comportamento bastante distinto (LEVY, 1997).

Ainda na análise da utilização do resíduo de construção e demolição, PERA (1996) e SAGOE-CRENTSIL et al. (1998) relatam que um uso econômico para os agregados reciclados deve incluir a substituição da areia natural pelos finos reciclados, pois a quantidade deste material que é gerada é de aproximadamente 40 a 50 % do total de material reciclado beneficiado.

Na tentativa de contribuir com o aumento no conhecimento sobre as características dos agregados reciclados e sobre o comportamento dos concretos quando incorporam estes materiais, este trabalho foi desenvolvido utilizando-se resíduos de construção e demolição como agregado miúdo e graúdo para produção de concretos convencionais. Como no Brasil a cultura da reciclagem deste tipo de resíduo ainda é muito incipiente, não existe o cuidado em separar os diversos tipos de constituintes do resíduo. Assim, para o desenvolvimento deste estudo optou-se por utilizar o resíduo como ele sai

das fontes geradoras, completamente misturado, e avaliar sua influência em algumas propriedades do concreto.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a possibilidade de utilização de resíduos gerados pela construção civil como substitutivo, total ou parcial, do agregado natural para produção de concretos convencionais.

Os objetivos específicos são:

- avaliar algumas propriedades físicas dos agregados produzidos a partir do resíduo de construção e demolição, comparando os resultados obtidos com as especificações da Norma Brasileira para agregados naturais (por exemplo: granulometria, massa específica, taxa de absorção, entre outras);
- avaliar diferentes proporções de substituição do agregado natural pelo reciclado para produção de concretos reciclados;
- avaliar a influência do tipo e teor de substituição dos agregados naturais por reciclados nas propriedades do concreto no estado fresco (massa específica e trabalhabilidade);
- avaliar a influência do tipo e teor de substituição dos agregados naturais por reciclados nas propriedades do concreto no estado endurecido (resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão e módulo de deformação do concreto);
- avaliar o desenvolvimento da resistência à compressão com a idade dos concretos produzidos.

1.2 ESTRUTURA DA APRESENTAÇÃO DA PESQUISA

A apresentação deste trabalho esta dividida em oito capítulos. Uma breve introdução, com abordagem de questões relativas à justificativa e importância da pesquisa, bem como seus objetivos, estão apresentados no Capítulo 1.

O segundo capítulo apresenta o estado-da-arte sobre resíduos de construção e demolição no tocante a assuntos mais genéricos como a quantidade, composição, métodos e equipamentos de beneficiamento disponíveis para este tipo de resíduo, uma avaliação dos tipos de impurezas que

podem estar presentes na sua composição, alguns aspectos econômicos relativos ao resíduo e, por fim, algumas propostas de normalização existentes para o uso do material.

No terceiro capítulo apresenta-se a revisão bibliográfica de algumas propriedades dos agregados reciclados e de algumas propriedades do concreto com agregados reciclados no estado fresco e endurecido.

O quarto capítulo descreve o programa experimental da pesquisa. Neste capítulo apresenta-se o projeto estatístico do experimento, os métodos adotados para a realização dos ensaios nos concretos reciclados, a apresentação do método e resultados da caracterização dos materiais utilizados e sua discussão quando necessário, e o método de dosagem escolhido.

No quinto capítulo encontra-se a apresentação, análise e discussão dos resultados dos ensaios das propriedades do concreto no estado fresco – massa específica, trabalhabilidade

O sexto capítulo apresenta a análise e discussão dos resultados dos ensaios das propriedades do concreto no estado endurecido – resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e tração na flexão e módulo de deformação. Apresenta-se por fim os resultados da investigação da microestrutura.

No sétimo capítulo foi abordada a influência do material cerâmico nas propriedades mecânicas do concreto. Foi avaliada a atividade pozolânica do material cerâmico finamente moído.

No oitavo capítulo são feitas as conclusões finais sobre o trabalho e apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

2.1 TERMINOLOGIA

Para tratar dos resíduos de construção e demolição é interessante listar alguns dos termos comumente utilizados na bibliografia, com o objetivo de facilitar o entendimento do assunto.

HANSEN (1992) apresenta uma terminologia no Terceiro Relatório do Estado da Arte sobre Resíduos de Construção que está parcialmente baseada na Proposta de Norma Japonesa – “Agregado reciclado e concreto de agregado reciclado” que foi preparada pelo Building Contractors Society of Japan (BCSJ), em 1977. Tal terminologia foi considerada por LEVY(1997) como a mais completa terminologia mundial sobre o assunto. Alguns itens desta terminologia estão listados abaixo:

Resíduo de concreto: entulho de concreto de estruturas demolidas, ou ainda, sobras de concretos pré-misturados endurecidos, rejeitados por centrais de concreto ou aqueles produzidos na própria obra.

Concreto convencional: concreto produzido com agregados graúdo e miúdo naturais.

Concreto original: concreto proveniente de estruturas de concreto armado, protendidas ou simples, que podem servir de matéria prima para produção dos agregados reciclados. Pode ser chamado também de concreto velho, concreto demolido ou concreto convencional.

Concreto de agregado reciclado: concreto produzido com agregado reciclado, sendo os agregados reciclados substituídos total ou parcialmente. Também é conhecido como concreto novo.

Argamassa original: mistura de cimento, água e agregado miúdo endurecido do concreto original. Parte da argamassa pode estar aderida a fragmentos das partículas de agregado natural nos agregados reciclados. Também pode ser conhecida como argamassa antiga ou argamassa convencional.

Agregado original: agregados utilizados para a produção de concreto original ou convencional. Os agregados originais podem ser naturais ou manufaturados.

A norma ainda sugere que seja adotada uma terminologia, que adaptada para o português², corresponderia:

Amn: agregado miúdo natural

Agn: agregado graúdo natural

Amnb: agregado miúdo natural britado

Agnb: agregado graúdo natural britado

Agregado de concreto reciclado: agregados produzidos a partir da britagem de concretos originais, podendo ser miúdo ou graúdo.

LIMA (1999), na proposta do seu trabalho, complementou esta terminologia com os itens listados a seguir:

Argamassa convencional: argamassa produzida com areia natural como agregado;

Argamassa de agregado reciclado: argamassa produzida com agregado miúdo reciclado, ou combinações de agregados reciclados e outros agregados;

Resíduo de alvenaria: resíduos sólidos não contaminados, provenientes da construção, reforma, reparos ou demolição de alvenaria e estruturas. Como resíduos são listados: blocos, concreto e outros materiais de alvenaria, rocha, argamassa, telhas e outros componentes cerâmicos ou de concreto.

LATTERZA (1998) por sua vez incluiu em seu trabalho alguns itens dos quais é interessante citar:

Deposição de resíduos sólidos: atividade intermediária, anterior à destinação final dos resíduos sólidos, quase sempre realizada de forma aleatória e ilegal;

Disposição de resíduos sólidos: Atividade intermediária ou final, com manejo e arranjo corretos dos resíduos.

² Terminologia original: Ns –natural sand; Ng – natural gravel; Ncs – natural crushed sand; Ncc- natural crushed coarse aggregate, respectivamente

2.2 HISTÓRICO

Quem imagina que a reciclagem e o estudo de resíduos de construção e demolição começou apenas com o início da adoção de conceitos, técnicas e posturas mais sustentáveis por parte de todos os setores se engana. Em um estudo realizado por SCHULZ e HENDRICKS (1992), foram encontrados registros da utilização de alvenaria britada para produção de concreto desde a época dos romanos. Igualmente nesta época era usada uma mistura de argilas, cinzas vulcânicas, cacos cerâmicos e pasta aglomerante de cal, que servia como uma camada para pavimentos, sobre a qual efetuava-se o revestimento final do pavimento (BRITO FILHO, 1999). Os fenícios, 700 anos antes desta era, misturavam cal e ladrilhos moídos como material de construção com propriedades aglomerantes (MARUSIN, citado por ORTIZ, 1998). DEVENNY e KHALAF (1999) relatam que a primeira utilização de tijolos com cimento Portland para produção de concreto ocorreu em 1860 na Alemanha.

Desde 1928 alguns estudos sistemáticos foram realizados para avaliar o efeito do consumo de cimento, consumo de água e granulometria dos agregados de tijolos britados (DEVENNY e KHALAF, 1999; SCHULZ e HENDRICKS, 1992; WEDLER e HUMMEL, citados por LEVY e HELENE, 2000). Todavia, a primeira utilização significativa de resíduos de construção e demolição data da época do fim da Segunda Grande Guerra. Naquele período, milhares de escombros ficaram espalhados pelas cidades. A necessidade de matéria prima para reconstrução dos centros urbanos e a falta de local de destino do vultoso volume de resíduos fizeram com que estes fossem reaproveitados.

Com o fim da Segunda Guerra a quantidade de entulho nas cidades alemãs era de aproximadamente 400 a 600 milhões de metros cúbicos. As estações de reciclagem produziram cerca de 11,5 milhões de metros cúbicos de agregado reciclado de alvenaria e 175000 unidades foram construídas (HELLER, citado por SCHULZ e HENDRICKS, 1992). Também as cidades da Inglaterra fizeram uso dos escombros deixados pela guerra, porém em menor escala que a Alemanha. A partir de então vários trabalhos e pesquisas vêm sendo desenvolvidos para aumentar o potencial de reutilização do resíduo de construção. Com base neste fato LEVY e HELENE (2000) afirmam que 1946 marca o início do desenvolvimento da reciclagem de resíduos de construção e demolição na construção.

Em 1977, no Japão, foram propostas as primeiras normas para utilização de agregado reciclado de concreto. Depois de 1982 as normas ASTM C 32-82 e C 125-79 incluíram o agregado graúdo reciclado de concreto nas especificações de agregado para concreto (HANSEN, 1992). A partir da década de 80, normas e recomendações também entraram em vigor nos Países Baixos, na Dinamarca, na Rússia e na Alemanha, entre outros. E mais estudos estão sendo desenvolvidos em

outros como França, Espanha, Bélgica, Noruega, Arábia Saudita, China, entre outros (QUEBAUD, 1996, BALLISTA e MACHADO Jr., 2000).

Em 1989 foi publicado o Plano Holandês de Política Nacional do Meio Ambiente, no qual foram formuladas intenções e diretrizes para fixar o conceito de sustentabilidade em todas as indústrias holandesas, inclusive a da construção. Em 1992, tudo isso resultou no Plano de Implementação dos Resíduos de Construção e Demolição que pretendia reaproveitar 90 % destes resíduos até o ano 2000. Com isso, a possibilidade de reciclagem de resíduos de construção na Holanda cresceu muito nas duas últimas décadas (PIETERSEN et al., 1998). Somente em 1996 este país reciclou um milhão de toneladas de resíduo de concreto e utilizou 0,07 milhões para produção de novos concretos (LOO, 1998).

No Japão, dois terços do resíduo de concreto demolido já é utilizado para pavimentação de rodovias. Todavia, já existe um plano para que seja estimulado o uso deste resíduo para produção de novos concretos (VÁSQUEZ e BARRA, 2000). Muitos países estão seguindo neste caminho, utilizar cada vez mais os resíduos de construção, e tentar incorporá-lo em usos cada vez mais nobres. Para isso, tem sido implantado em vários deles planos como o que está sendo desenvolvido na Holanda, ou seja, com metas e datas definidas.

No Brasil, o primeiro estudo sistemático para a utilização de resíduos de construção e demolição foi concluído em 1986, pelo arquiteto Tarcísio de Paula Pinto. Sua pesquisa consistiu em estudar o uso do reciclado para produção de argamassas (PINTO, 1986).

A reciclagem dos resíduos de construção teve início efetivo no país em 1991, em Belo Horizonte, e hoje já existem algumas estações de tratamento e reciclagem deste material espalhadas em alguns estados do Brasil. Alguns estudos tem sido desenvolvidos em universidades nacionais no sentido de obter um melhor entendimento sobre o comportamento deste material (ZORDAN, 1997; LEVY, 1997; LATTERZA, 1998; BAZUCO, 1999; LIMA, 1999; entre outros).

2.3 DEFINIÇÃO, ORIGEM E CLASSIFICAÇÃO DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

De forma mais simplificada, este material pode ser definido como um resíduo proveniente de construções, reparos, reformas, e demolições de estruturas e estradas.

TCHOBANOGLIOUS, THEISEN e ELIASSEN, citados por ZORDAN (1997), definem o *resíduo de construção* como material proveniente de atividades da construção civil, devido à construção de

edificações, reformas e reparos de residências individuais, edificações comerciais e outras estruturas. Definem, também, *resíduos de demolição* como todo material proveniente da destruição de construções e outras estruturas.

O *agregado reciclado* pode ser definido como um material granular, resultante de um processo industrial envolvendo o processamento de materiais inorgânicos, previamente e exclusivamente utilizados na construção, e aplicados novamente na construção (KOPPEN citado por PIETERSEN et al., 1998).

Os resíduos, sejam eles quais forem, devem ser classificados, do ponto de vista do risco ambiental, para que possam sofrer o correto destino e manuseio. No Brasil existe uma norma que trata da classificação dos resíduos sólidos, a NBR 10004 (1987) – “Resíduos sólidos – Classificação”. De acordo com esta norma os resíduos de construção e demolição podem ser classificados em resíduos da classe III – inertes. Isto se deve ao fato deste resíduo possuir componentes minerais não poluentes e ser praticamente inerte quimicamente (LEVY, 1997; TORRING, 1998, VAZ FILHO e CORDEIRO, 2000). Entretanto, alguns estudos reconhecem que este fato pode não ser uma verdade tão absoluta. Os resíduos de construção e demolição consistem em materiais pesados e de grande volume, que quando depositados indiscriminadamente são verdadeiros focos para depósitos de outros tipos de resíduo, que podem gerar contaminações devido à lixiviação ou solubilização de certas substâncias nocivas. Ou ainda, os próprios resíduos de construção e demolição podem conter materiais de pintura, ou substâncias de tratamento de superfícies, entre outras, que podem percolar pelo solo, contaminando-o (FEDERLE, citado por PENG et al., 1997; TORRING, 1998). Além destes materiais, os resíduos de construção e demolição podem conter amianto ou metais pesados, que mesmo em pequenas quantidades, se misturados ao resíduo, pode contaminá-lo de forma significativa (DORSTHORST e HENDRIKS, 2000). Por estes motivos ZORDAN (2000) enfatiza que o resíduo de construção, a depender da sua origem e materiais constituintes, pode estar inserido em qualquer das classes apresentadas pela NBR 10004 (1987), ou seja, perigoso, não inerte ou inerte.

Deste modo, é prudente que sejam realizados testes de lixiviação e solubilização nos resíduos de construção e demolição com a finalidade de garantir que estes não sejam prejudiciais ao meio ambiente.

Um outro aspecto importante no manuseio dos resíduos de construção e demolição é a sua origem. A classificação dos resíduos também pode ser determinada com base neste parâmetro. Porém, esta classificação é um pouco mais detalhada, para definir bem o tipo de utilização e manuseio que

será dado ao resíduo. Dentro da cadeia produtiva da construção, o resíduo pode ter várias origens, que de acordo com LEVY (1997) podem ser:

- catástrofes naturais ou artificiais (terremotos, bombardeios, incêndios ou desabamentos);
- demolição de estruturas ou pavimentos rodoviários de concretos ou de obras que atingiram a vida útil para as quais foram projetadas, tendo se tornado obsoletas;
- deficiências inerentes aos processos e sistemas construtivos empregados na atualidade.

A classificação pode ser feita, também, com base no teor de impurezas existentes nas partidas de resíduos que chegam nas usinas, como acontece nas recicladoras implantadas no país. Ou, ainda, com base no tipo de componente predominante no resíduo (LIMA, 1999).

Em seu trabalho, LIMA (1999) propôs uma classificação para o resíduo de construção e demolição na qual foram considerados os seguintes fatores: os tipos diferentes de resíduo disponíveis para a reciclagem; as especificações para os agregados reciclados em seus usos atuais e potenciais; sistemas de classificação já disponíveis no Brasil e exterior; condições de operação das centrais de reciclagem; experiências estrangeiras onde a reciclagem já está implantada a mais tempo; necessidade de consumir quantidades significativas de resíduos. O autor elaborou uma proposta com seis classes de resíduos de construção e demolição, listadas a seguir:

- **Classe 1:** Resíduo de concreto sem impurezas – material composto de concreto estrutural, simples ou armado, com teores limitados de alvenaria, argamassa e impurezas;
- **Classe 2:** Resíduo de alvenaria sem impurezas – material composto de argamassas, alvenaria e concreto, com presença de outros inertes como areias, pedras britadas, entre outros, com teores limitados de impurezas;
- **Classe 3:** Resíduo de alvenaria sem materiais cerâmicos e sem impurezas – material composto de argamassa, concreto e alvenaria com baixo teor de materiais cerâmicos, podendo conter outros materiais inertes como areia e pedra britada, entre outros, com teores limitados de impurezas;
- **Classe 4:** Resíduo de alvenaria com presença de terra e vegetação – material composto basicamente pelos mesmos materiais do resíduo classe 2, porém admite a presença de

determinada porcentagem em volume de terra ou terra misturada à vegetação. Admite maior teor de impurezas;

- **Classe 5:** Resíduo composto por terra e vegetação – material composto basicamente por terra e vegetação, com teores acima do admitido no resíduo de classe 4. Admite presença de argamassa, alvenarias e concretos, e outros materiais inertes, além de maior teor de impurezas que os anteriores;
- **Classe 6:** Resíduo com predominância de material asfáltico – material composto basicamente de material asfáltico, limitando-se a presença de outras impurezas como argamassas, alvenarias, terra, vegetação, gesso, vidros e outros.

Como pode ser observado na classificação apresentada pelo autor, em metade delas se admite maior presença de impurezas. Isso se deve à cultura, ainda incipiente, da reciclagem dos próprios resíduo dentro da indústria da construção. Acredita-se que à medida que o conceito de reciclagem se fortalecer dentro do setor, talvez se possa partir para uma classificação mais restritiva. Essa classificação mais restritiva pode dar origem a materiais mais homogêneos e de maior qualidade, e possibilitar a ampliação dos tipos de utilização que podem ser dados ao material reciclado.

2.4 IMPACTO AMBIENTAL CAUSADO PELOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

As atividades econômicas, a indústria e o sistema de transportes não são os únicos vetores responsáveis pelas mudanças climáticas, pelo aumento no buraco da camada de ozônio, pelas chuvas ácidas, pelos desmatamentos e pela perda da biodiversidade. O ambiente construído é também grande responsável por estes problemas. Além de consumir recursos na sua fase de construção, os edifícios, durante seu uso, produzem impactos sobre o ambiente circundante, pois são fontes importantes de consumo de energia e água (ALAVEDRA et al., 1997).

A indústria da construção é uma das mais antigas em todo o mundo e se utiliza de técnicas e materiais que não mudaram muito ao longo do tempo. O concreto, por exemplo, é produzido hoje com a mesma receita básica de anos atrás: água, cimento e agregado, podendo variar apenas com o uso de um ou outro aditivo, ou adição, que podem levar a alguns efeitos diferenciados. A preocupação com o meio ambiente têm levado todas as indústrias a começar a repensar métodos e técnicas.

Assim, a utilização de novos materiais, mais benéficos ao meio ambiente, têm sido tentada. A incorporação de materiais reciclados ao concreto pode ser considerada como uma boa ferramenta para

a conservação de energia e de recursos naturais, e para aumentar a vida útil das áreas de disposição de resíduos (GOLDSTEIN, 1995).

A construção “sustentável” deve atentar para o conceito de “cadeia de gerenciamento integrada” que pode ser considerada como o fechamento do ciclo de vida de um produto, ou material, de forma que somente uma pequena quantidade de matéria-prima seja descartada e, ao mesmo tempo, se maximize a sua reutilização e reciclagem (PIETERSEN et al., 1998). Entretanto, diversos estudos abordam a dificuldade em encerrar satisfatoriamente o ciclo de vida dos componentes dentro da construção civil. KIBERT et al. (2000) afirmam que isso se deve principalmente ao fato das edificações, bem como materiais componentes não serem projetados para serem posteriormente desmontados. Além disso, alguns dos materiais utilizados na construção, como madeiras laminadas, perfis plásticos extrudados, entre outros, apresentam dificuldade de reciclagem.

Para avaliar o nível de impacto causado ao meio ambiente com a disposição de resíduos de construção e demolição, pode-se lançar mão da avaliação da hierarquia da disposição de resíduos apresentada na Figura 1. Dentro do modelo hierárquico apresentado, a **redução** da geração de resíduos se mostra como a alternativa mais eficaz para diminuição do impacto ambiental. Esta seria também a melhor alternativa do ponto de vista econômico. A simples movimentação de materiais de uma aplicação para outra, ou seja, a **reutilização**, também se apresenta como bom recurso na diminuição do impacto, pois esta decisão utiliza o mínimo de processamento e energia. Depois, vem a **reciclagem** dos resíduos, ou seja, a transformação destes em novos produtos. No plano inferior da hierarquia encontram-se: a **compostagem**, que consiste basicamente na transformação da parte orgânica em húmus para o tratamento do solo; a **incineração**, que pode extrair energia dos materiais sem gerar substâncias tóxicas, quando é cuidadosamente operacionalizada; e por fim o **aterramento** (PENG et al., 1997). No caso do concreto, seu uso como agregado reciclado oferece o máximo nível de reutilização e constitui a forma mais fácil de atingir o fechamento do ciclo de vida deste material (BARRA e VAZQUEZ, 1997). Antes de fixar o estudo no concreto, é considerado oportuno ressaltar alguns índices do impacto causado pelas atividades do setor de construção, quando o assunto é o consumo de recursos e os danos causados ao meio ambiente.

Para se ter idéia da dimensão dos problemas causados ao meio ambiente com as atividades da construção foram levantados alguns dados bastante interessantes. O setor é responsável, por exemplo, pelo consumo de 20 a 50 % dos recursos naturais extraídos (ALAVEDRA et al., 1997, SJÖSTRÖM, 1997?). O consumo de agregados naturais varia de 1 a 8 toneladas/habitante.ano. Além dos recursos extraídos, deve-se mencionar a geração de poluição, como emissão de poeira e gás

carbônico, principalmente durante a produção do cimento (JOHN,1998a, PENTALLA, 1997). Segundo GOLDSTEIN (1995), anualmente é produzido no mundo 1 tonelada/habitante de concreto, mas apesar deste ser um produto que consome menor quantidade de energia quando comparado ao aço, ou ao plástico, sua produção se utiliza de cimento que é atualmente considerado como um dos processos de manufatura com maior consumo de energia. Ainda segundo este autor, são necessários entre 11 e 15 % de cimento numa mistura típica de concreto. De acordo com SJÖSTRÖM (2000), o setor da construção na Comunidade Européia consome aproximadamente 40 % do total de energia e é responsável por 30 % da emissão de CO₂ na atmosfera.

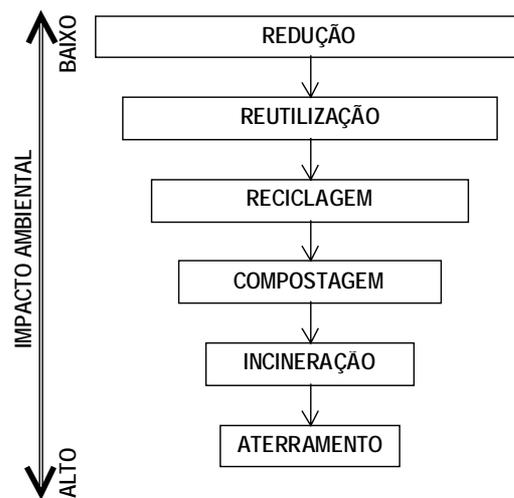


Figura 1 Hierarquia da disposição de resíduos de construção e demolição (PENG et al., 1997)

De acordo com o ENBRI, citado por JOHN (1996), 4,5 % do consumo total de energia é gasto na construção civil e 84 % deste, na fase de produção de materiais. JOHN (2000) estima que o setor de construção civil brasileiro consome cerca de 210 milhões de toneladas/ano de agregados naturais somente para produção de concretos e argamassas.

Outro ponto que deve ser levantado quando se fala em impacto ambiental causado pela construção civil, é a geração de resíduos sólidos, que pode ser até duas vezes maior que o volume de lixo urbano gerado (JOHN,1998a).

Os valores de geração de resíduos apontados na bibliografia são muito assustadores e por si só já constituem motivo suficiente para que sejam tomadas medidas serias e rápidas para conter o avanço do problema. A seguir estão listados alguns índices internacionais encontrados na bibliografia.

- Acredita-se que mundialmente são gerados entre 2 e 3 bilhões de toneladas de resíduos de construção e demolição por ano (TORRING, 1998; LAURITZEN, 1998).

- A Comunidade Européia gera anualmente um total de 480 milhões de toneladas de resíduos inertes, deste total, 180 milhões correspondem a resíduos de construção e demolição com potencial de reaproveitamento. Isso equivale a cerca de 0,5 toneladas/habitante.ano somente de resíduos de construção e demolição. Atualmente, cerca de 50 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição estão sendo reaproveitados, valor que corresponde a cerca de 28 % do total gerado, o restante têm sido incinerado e depositado em aterros (DORSTHORST e HENDRIKS, 2000).
- Nos Estados Unidos são gerados de 20 a 30 kg/m²construído de resíduos, nos mais variados tipos de atividades existentes ligadas à construção. Este país produz cerca de 31,5 milhões de toneladas de resíduos de construção por ano, o que equivale a quase 25 % de todo resíduo sólido produzido (PENG et al., 1997).
- Na Alemanha, em 1991, os valores chegaram a 32,6 milhões de toneladas (BOSSINK e BROUWERS, 1996). Somente na parte leste da Alemanha, numa região com cerca de 2,5 milhões de habitantes, são gerados cerca de 3 milhões de toneladas de resíduos de construção (MÜELLER e WINKLER, 1998).
- Na Holanda foram gerados quase 15 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição em 1996, isso equivale a aproximadamente 1 tonelada/habitante.ano (PIETERSEN et al., 1998; LOO, 1998; VAN DER WEGEN e HAVERKORT, 1998; HENDRIKS et al., 1998).
- Na França são gerados cerca de 25 milhões de toneladas de material de demolição por ano (QUEBAUD et al., 1997) o que equivale a 50 % de todo resíduo sólido gerado anualmente no país (QUEBAUD e BUYLE-BODIN, 1999).
- No Japão foram descartados 86 milhões de toneladas de resíduos de construção, em 1992 (UCHIKAWA e HANEHARA, citados por BAZUCO, 1999). Somente os resíduos de concreto cresceram de 25 milhões de toneladas, em 1992, para 71 milhões de toneladas, em 1995. Espera-se para o ano 2001 um volume de 110 milhões de toneladas de resíduos de concreto (BANTHIA E CHAN, 2000). A cidade de Hong Kong gerava, em 1991, 22000 toneladas diárias de resíduos de construção (POON, 1997).
- Na Finlândia são gerados mais de 0,11 toneladas/habitante.ano de resíduos de construção e demolição e todo esse resíduo é simplesmente descartado em aterros (PENTALLA, 1997).

- Na Suécia são gerados 1,5 milhões de toneladas/ano de resíduos de demolição, constituídos basicamente de concreto e blocos cerâmicos (KARLSSON, 1998).
- A Itália gerou, em 1997, 15 milhões de toneladas/ano de resíduos de demolição (D'AMICO e GARGANO, 1998).
- Em 1997, na Dinamarca foram gerados cerca de 2,6 milhões de toneladas/ano de resíduos de construção. Estima-se que para o ano 2000 esse valor tenha subido para 2,8 milhões de toneladas, de acordo com o DANISH ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, citado por GLAVIND e HAUGAARD, 1998.

Países desenvolvidos e em desenvolvimento, que ampliam sempre o seu ambiente construído, tendem a consumir uma elevada quantidade de material e, por consequência, gerar uma quantidade grande de resíduos (JOHN, 1996).

Outra grande fonte geradora de resíduos têm sido os desastres naturais e as guerras. Por exemplo, em 1995, em Beirute, no Líbano, a quantidade de resíduos espalhada pela cidade somava cerca de 20 milhões de toneladas. Na Bósnia também houve um grande volume de resíduos deixados pelo pós-guerra. Na Flórida, 100 mil residências foram destruídas, em 1992, pelo furacão Andrew (LAURITZEN, 1998).

No Brasil, os índices não são menos chocantes. De acordo com PINTO (1996), os resíduos de construção e demolição correspondem a 2/3 em massa do total de resíduos coletados em cidades de médio e grande porte do país. Nestas cidades, o valor da geração de resíduos de construção oscila entre 0,4 a 0,7 toneladas/habitante.ano (LIMA e SILVA, 1998). De acordo com estudos apontados por PINTO (2000), cada metro quadrado construído gera cerca de 150 kg de resíduos. Algumas cidades têm seus índices de geração de resíduos conhecidos, e estes valores estão apresentados na Tabela 1.

A geração de resíduos de construção e demolição já possui números assustadores e a tendência mundial é que estes valores aumentem ainda mais. Encontrar uma utilização para estes resíduos é mais que uma necessidade, é uma obrigação.

Com base nesta premissa, PINTO (2000) enfatiza que o gerenciamento dos resíduos de construção e demolição no próprio local de sua geração representa uma importante ferramenta para que a indústria da construção assuma sua responsabilidade com o resíduo gerado no ambiente urbano. Esta atitude fará com que o resíduo seja confinado em grande parte dentro do seu local de origem, o

que evita sua remoção para locais distantes, evitando despesas e problemas para os órgãos públicos responsáveis.

Tabela 1 Dados sobre a geração de resíduos de construção em algumas cidades brasileiras

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

Fontes: (1) CONSTRUÇÃO(1996); (2) COSTA (1998); (3) VIEIRA et al. (1998); (4) LIMA e TAMAI (1998); (5) PINTO (2000); (6) CARNEIRO et al. (2000)

2.5 COMPOSIÇÃO DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO

Quando se estuda a composição média dos resíduos de construção, devem ser considerados fatores como: a tipologia construtiva utilizada; as técnicas construtivas existentes; os materiais disponíveis em cada local. Dentro deste contexto, ainda merecem interesse os índices de perdas de materiais mais significativos. Todos estes fatores estarão atrelados à composição do resíduo de construção e demolição.

2.5.1 Panorama das perdas de materiais na construção civil

Os altos índices de desperdício implicam em redução da disponibilidade futura de materiais e energia, criam demandas desnecessárias ao sistema de transporte e geram transtornos nos panoramas urbanos, principalmente dos grandes centros.

As perdas são geradas, na maioria dos casos, por ingerência nos processos construtivos, principalmente devido à falta de coordenação desde a fase inicial de implementação da obra até a fase final quando da manutenção. Uma falta de padronização dos elementos construtivos, falta de especificações técnicas, baixa qualidade e pouco detalhamento dos projetos, falta de gestão na aquisição, transporte, estocagem e manuseio dos materiais podem levar a erros, que acabam se

traduzindo em perdas e que, por consequência, afetam inclusive o meio ambiente (SOIBELMAN, 1993; FORMOSO et al.,1993; FORMOSO et al., 1998; GRIGOLI, 2000).

Algumas pesquisas apontam que o índice de perdas de materiais medidos são bem maiores que os geralmente utilizados nas composições de custo dos empreendimentos do setor da construção (SOIBELMAN, 1993; FORMOSO et al.,1993; FORMOSO et al., 1998).

Estudos concluem que muitas das perdas existentes podem ser previstas, reduzidas e até evitadas através da simples definição de uma política de administração de materiais, tanto para o seu gerenciamento, quanto para aplicação de um controle sistemático de utilização. Tal iniciativa pode melhorar o manuseio e estocagem de materiais e possibilitar a identificação e o controle das perdas durante o processo produtivo (SOIBELMAN, 1993; FORMOSO et al.,1993; FORMOSO et al., 1998).

Segundo FORMOSO et al.(1993), os altos custos finais das edificações possuem como uma de suas causas o alto índice de perdas de materiais, cujo ônus recai sempre sobre o consumidor. Neste mesmo estudo os autores encontraram um índice médio de acréscimo do custo total dos empreendimentos analisados de 7,89 %. De acordo com PINTO (1990), durante a década de 80 os materiais participaram com percentuais entre 50 e 70 % do custo final das edificações. Deste modo é possível concluir que a redução das perdas traz benefícios econômicos, sociais e ambientais.

É interessante ressaltar que a distribuição de perdas de materiais computadas na construção civil está intimamente ligada à geração de resíduos. Por conseguinte, a composição deste resíduo também é um reflexo dos insumos que têm os índices de desperdício mais elevados no setor.

Na Tabela 2 estão indicados os índices de perdas de materiais mais usuais, medidos nos últimos anos em alguns países, inclusive os índices mais recentes medidos no Brasil.

Analisando-se os resultados da Tabela 2, pode-se notar que o índice de perdas de materiais é bastante diferente quando se compara países diferentes e até mesmo cidades e épocas distintas dentro do mesmo país. De acordo com CARNEIRO et al. (2000), a composição e a quantidade de resíduo de construção e demolição gerada depende muito dos tipos de matéria-prima disponíveis, das técnicas e metodologias utilizadas no processo de construção, do estágio de desenvolvimento local da construção civil, como, por exemplo, a qualificação da mão de obra envolvida, ou as técnicas construtivas utilizadas.

Tabela 2 Percentuais de perdas na construção em algumas cidades brasileiras e países estrangeiros

Materiais Estudados	Projeto FINEP – BR (1998) ⁽¹⁾	Projeto FINEP – RS (1998) ⁽¹⁾	Soibelman RS-BR (1993) ⁽²⁾	Pinto SP-BR (1989) ⁽³⁾	Skoyles UK ⁽⁴⁾	Hong Kong ⁽⁴⁾	Usual em orçamentos
Areia	44	28	45,76	39,02		-	15
Argamassa	116	-	91,25	101,9	5	15	15
Cimento	56	77	84,13	33,11		-	15
Concreto usinado	9	9,7	13,18	1,34	2	11	5
Aço	10	13	19,07	26,19	5	-	20
Blocos e tijolos	13	25	Bloco:27,6 Tijolo:26,9	12,73	8 12	11	10
Tubos	15	46	-	-	-	-	-
Placas Cerâmicas	14	11	-	-	-	-	-
Revestim ^{to} Têxtil	14	14	-	-	-	-	-

Fontes: (1)FORMOSO et al., 1998; (2) SOIBELMAN, 1993; (3)PINTO, 1995; (4)BOSSINK e BROWERS, 1996

2.5.2 Composição do resíduo

Segundo LEVY(1997), os resíduos de construção têm uma composição que depende muito da fonte que o originou e do momento em que foi colhida a amostra. Como o setor de construção desenvolve várias atividades dentro do canteiro de obras, o resíduo gerado também pode ser composto por uma grande gama de materiais. Além disso, uma edificação é composta por uma grande variedade de diferentes componentes, e quando ocorre a sua demolição esta característica fica evidenciada na composição do resíduo resultante. Tudo isso confere ao material a ser reciclado uma alta heterogeneidade, e sua separação total seria praticamente impossível. ZORDAN (2000) enfatiza que o resíduo de construção e demolição talvez seja o mais heterogêneo de todos os resíduos industriais e, ainda, que a sua composição química está relacionada com a composição dos materiais que o compõe.

De acordo com PINTO(1986), que analisou a composição do resíduo de construção proveniente de canteiros de obras da cidade de São Carlos/SP, para a qual foram coletadas 33 amostras de diferentes pontos, cerca de 64 % da composição do resíduo é de argamassas, 30 % de componentes cerâmicos e o restante de outros materiais. A composição do resíduo estudado por este pesquisador está apresentada na Figura 2.

ZORDAN(1997), em sua pesquisa, analisou quatro amostras coletadas no período de 26/09/96 a 30/10/96, na usina de reciclagem de Ribeirão Preto/SP. A composição de resíduo desta usina também foi analisada por LATTERZA (1998), que coletou duas amostras, a primeira em novembro de 1996 e a segunda em abril de 97. Os resultados destas duas pesquisas podem ser vistos na Figura

3. Observa-se pelo gráfico da Figura 3 que a composição do resíduo variou um pouco de uma pesquisa para outra. Apesar das variações não serem muito grandes, isso confirma a heterogeneidade do resíduo mesmo em amostras coletadas no mesmo local.

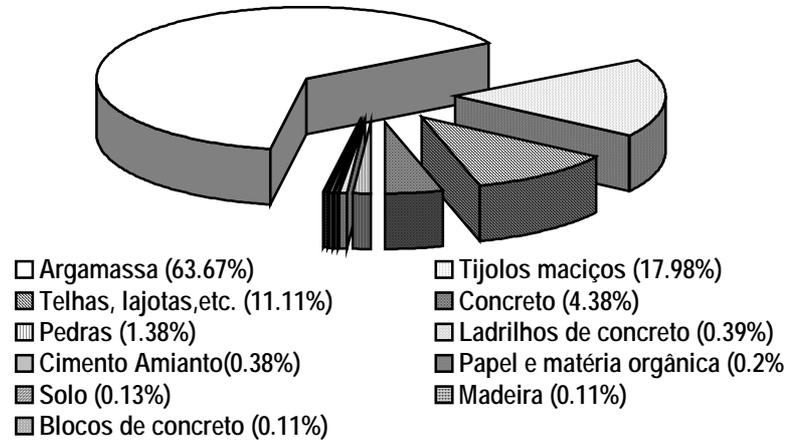


Figura 2 Distribuição da composição média de resíduos de construção coletadas em São Carlos (PINTO, 1986)

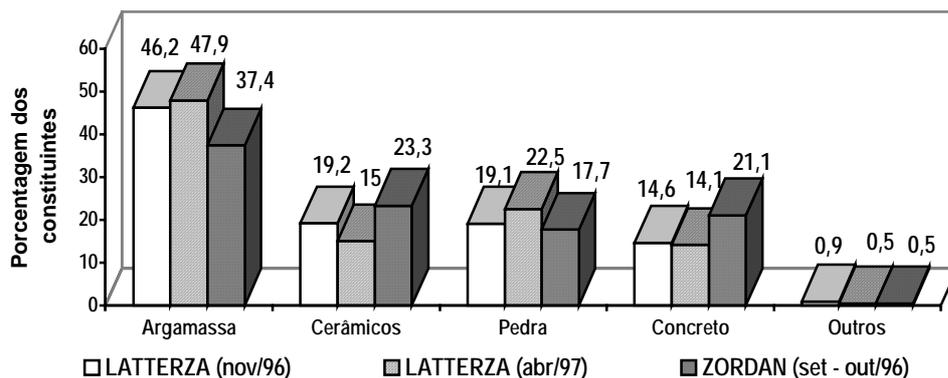


Figura 3 Percentagem média dos constituintes do resíduo de construção coletados na Usina de Ribeirão Preto em diferentes períodos (ZORDAN, 1997; LATTERZA, 1998)

CARNEIRO et al. (2000) determinaram a composição do resíduo de construção e demolição da cidade de Salvador/Ba, cujo resultado pode ser observado no gráfico da Figura 4. Como se pode verificar, o concreto e argamassa constituem a maior porção do resíduo avaliado (53 %) e junto com os materiais cerâmicos e as rochas naturais perfazem cerca de 72 % de toda amostra, o que significa dizer que 72 % do resíduo pode dar origem a agregados com alto potencial de reciclabilidade.

LEVY(1997) encontrou alguns índices de composição de resíduos em Hong Kong, e relacionou-os com a fonte geradora: trabalhos rodoviários, escavações, sobras de demolição, obras diversas e sobras de limpeza. Tais resultados podem ser visualizados na Tabela 3.

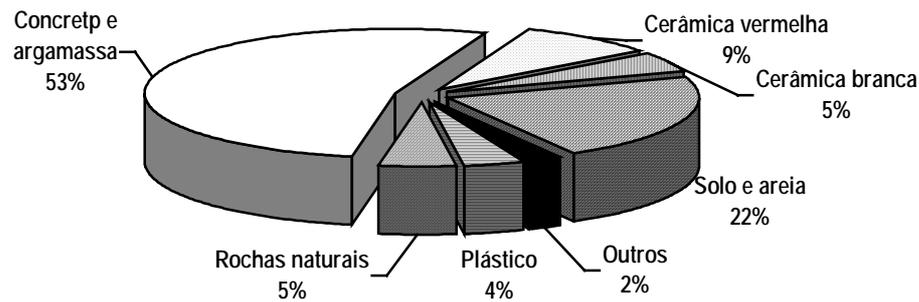


Figura 4 Composição do resíduo de construção e demolição da cidade de Salvador/Ba (CARNEIRO et al., 2000)

Tabela 3 Componentes do resíduo de construção e suas fontes geradoras

Componentes presentes	Fontes que dão origem ao entulho de construção				
	Trabalhos rodoviários (%)	Escavações (%)	Sobras de demolição (%)	Obras Diversas (%)	Sobras de limpeza (%)
Asfalto	23,47	0	1,61	0	0,13
Concreto Simples	46,38	3,16	20	8,03	9,26
Concreto armado	1,61	2,96	33,1	8,31	8,25
Poeira, solo e lama	16,75	48,91	11,91	16,09	30,54
Pedra britada	7,07	31,1	6,82	7,76	9,73
Cascalho	-	1,43	4,6	15,25	14,13
Madeira	0,1	1,07	7,14	18,22	10,53
Bambu	0	0,03	0,30	0,05	0,29
Blocos de concreto	0	0	1,16	1,12	0,9
Tijolos maciços	0	0,31	6,33	11,94	5
Vidros	0	0	0,20	0,35	0,56
Papel e matéria orgânica	0	0,29	1,3	2,62	3,05
Tubos plásticos	0	0	0,6	0,35	1,13
Areia	4,62	9,58	1,43	3,24	1,69
Árvores	0	0,7	0	0,01	0,12
Conduintes	0	0	0,04	0,01	0,03
Retalho de tecidos	0	0	0,07	0,13	0,23
Metais	0	0,47	3,4	6,08	4,36

Fonte: POLYTTECHNIC, citado por LEVY (1997)

Se uma composição dos resíduos provenientes de construção e demolição for montada utilizando-se apenas os componentes mais significativos, dois gráficos, como os mostrados na Figura 5 e na Figura 6, respectivamente, poderão ser obtidos.

Como pode ser observado através dos gráficos das figuras, a quantidade de concreto nos resíduos de demolição é muito maior, pois trata-se da demolição das estruturas, enquanto nos resíduos de construção esse percentual é muito menor, pois é proveniente apenas de sobras existentes, ou da

eventual demolição de alguns pontos de passagem de condutores, entre outros. Diferente da madeira, que está muito mais presente na fase de construção, devido à utilização de fôrmas para execução das estruturas de concreto, por exemplo. Mas como foi mencionado anteriormente, tais índices estão muito atrelados ao tipo de construção, técnicas e insumos construtivos utilizados no setor. Esta característica pode ser bem evidenciada quando se compara os gráficos da Figura 5 e Figura 6 com os gráficos da Figura 2 e Figura 3. Nota-se que no Brasil existe um maior índice de utilização de materiais cerâmicos e argamassa, que não é evidenciado nos índices levantados em Hong Kong.

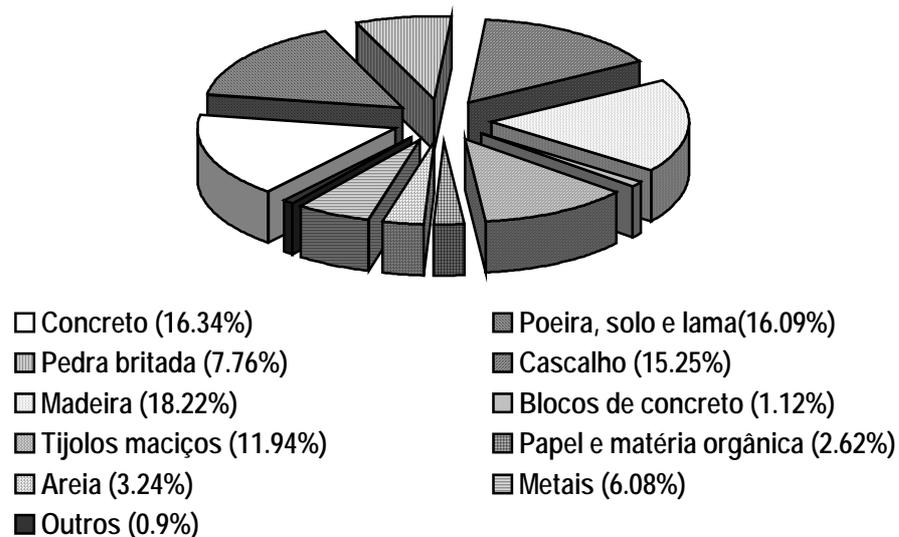


Figura 5 Composição média de resíduos provenientes de construção em Hong Kong

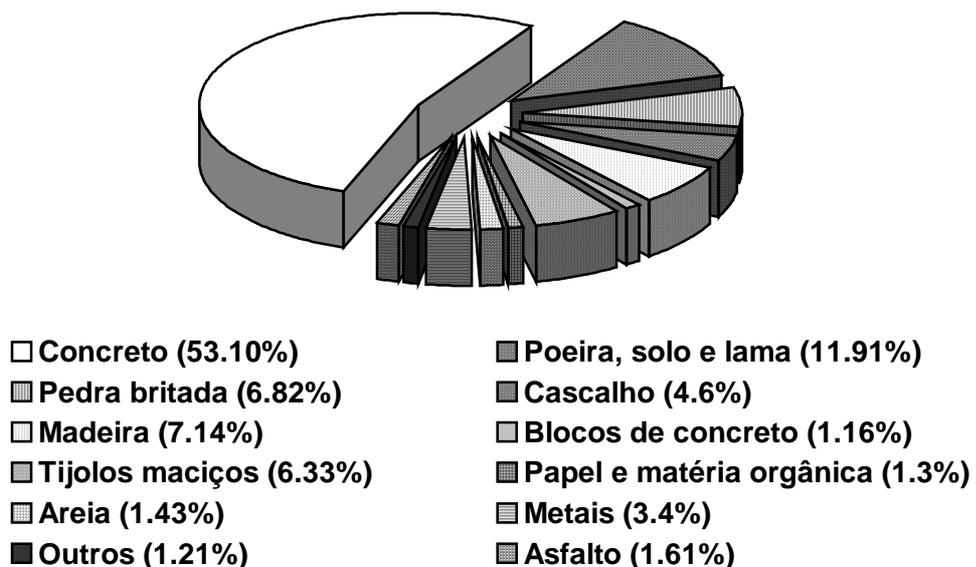


Figura 6 Composição média de resíduos de demolição em Hong Kong

No Brasil o número de demolições ainda é muito pequeno, e assim a predominância é por resíduos de construção. Este fato está indicado na reduzida quantidade de concreto e alvenaria observada nas composições do resíduo. É possível observar que os insumos com maior índice de perdas apresentados na Tabela 2 correspondem aos materiais com maior percentual na composição dos resíduos apresentados na Figura 2 e na Figura 3, o que denota uma íntima relação da composição dos resíduos com as perdas de materiais.

Outro aspecto interessante observado nos gráficos da Figura 5 e da Figura 6, é o percentual de materiais inertes com potencial de reaproveitamento para produção de agregados, cerca de 40 % e 70 % para os resíduos de construção e demolição, respectivamente. Estes índices demonstram que material com alto valor econômico está indo para o lixo todos os dias, em todas as partes do mundo.

2.5.3 Impurezas na composição do resíduo de construção e demolição

Quando se menciona a composição do resíduo de construção, deve ser dada atenção à existência de impurezas ou contaminantes. Este tipo de material pode provocar efeitos negativos, tanto nas propriedades mecânicas do concreto reciclado, quanto na sua durabilidade.

Todos os materiais minerais não inertes, ou quaisquer outros que prejudicam a qualidade de concretos e argamassas produzidos com agregados que os contenham, podem ser considerados como impurezas ou contaminantes (LIMA, 1999).

Materiais como solos argilosos, plásticos, resíduos de pavimentos betuminosos, madeira, gesso, refratários, vidros, metais, ou substâncias como: cloretos, álcalis e areias industriais quimicamente contaminadas, são consideradas impurezas e podem levar a consequências desastrosas quando incorporadas aos agregados reciclados para produção de novos materiais (HANSEN, 1992).

Estudos foram desenvolvidos no sentido de avaliar o efeito que alguns dos tipos de impurezas, que podem ser encontradas nos resíduos de construção e demolição, exercem sobre as propriedades do concreto, principalmente sobre as propriedades mecânicas. A seguir serão discutidas, um pouco mais detalhadamente, algumas destas impurezas.

a) Matéria orgânica ou solos argilosos

Concretos produzidos com agregados reciclados contaminados com solos argilosos ou matéria orgânica, podem sofrer uma redução das resistências mecânicas, ou instabilidade quando expostos a ciclos de gelo/degelo, ou umidecimento/secagem (HANSEN, 1992; LEVY, 1997).

Esse é um tipo de contaminação que pode estar presente, indistintamente, tanto no agregado reciclado, quanto no agregado natural. Os limites de teor destes materiais existentes nas normas para agregados naturais podem ser aplicados também aos agregados reciclados (HANSEN, 1992; LEVY, 1997). Por exemplo, segundo a NBR 7211 (1983), que especifica agregados para concreto, o material a ser utilizado não deve apresentar solução mais escura que a solução padrão, quando for submetido ao ensaio colorimétrico prescrito pela NBR 7221 (1987).

A presença de solos argilosos no resíduo é de difícil remoção. Entretanto, pode ser conseguida com o uso de *sprinklers* acima das correias transportadoras e peneiras, ou então, com o uso de peneiramentos sucessivos (HANSEN, 1992). De acordo com QUEBAUD (1996), esta prática só é possível devido à pequena densidade apresentada pelo material. A autora chama atenção ainda para a presença mais acentuada deste tipo de impureza na parte mais fina do material reciclado. O ideal seria, portanto, proceder ao descarte desta fração.

b) Pavimentos betuminosos

A utilização de agregado reciclado com presença de material betuminoso reduz seriamente a resistência do concreto produzido (QUEBAUD, 1996; BCSJ, citado por HANSEN, 1992). Alguns estudos apontam para uma redução de 30 % da resistência à compressão de concretos, quando houve adição de 30 % em volume de asfalto no agregado reciclado do concreto (BCSJ, citado por LEVY, 1997; FERGUS, citado por HANSEN, 1992). Além disso, o uso de agregado reciclado com presença de material asfáltico pode contribuir para uma grande quantidade de incorporação de ar ao concreto (FERGUS, citado por HANSEN, 1992; RAY, citado por HANSEN, 1992).

No Brasil, a preocupação com a incorporação deste tipo de material ao resíduo de construção e demolição praticamente inexistente. Fato que pode ser comprovado com as composições do resíduo apresentadas no item 2.5.2. De qualquer forma, nos locais onde há a demolição de pavimentos asfálticos, seria interessante proceder a remoção e reciclagem seletiva dos seus diferentes constituintes.

c) Gesso

Este é um material extremamente danoso ao concreto e muito susceptível na composição de resíduos de construção e demolição. O efeito do gesso, conhecido pela formação de etringita secundária, que é altamente expansiva, provoca fortes tensões internas que podem fissurar o concreto.

Este é um importante fator limitante do uso de agregados reciclados para produção de concretos (GALLIAS, 1998; QUEBAUD, 1996; HANSEN, 1992, BANTHIA e CHAN, 2000).

O gesso deve ser cuidadosamente eliminado da composição do resíduo antes do seu beneficiamento. Ao ser britado, este material, por ser muito friável, transforma-se em pequenas partículas que ficam completamente misturadas aos agregados produzidos, principalmente na fração do agregado miúdo. A eliminação da fração miúda com sucessivos peneiramentos poderia diminuir a quantidade de gesso porventura existente nos agregados reciclados produzidos. Todavia, ensaios de qualidade dos agregados devem mesmo assim ser realizados para garantir que não haja nenhum problema decorrente do uso deste material na produção de concretos.

d) Vidro

A presença de vidro na composição de agregados reciclados para produção de concretos pode acarretar a existência de reação álcali-silica em meios aquosos, ainda que cimentos com baixo teor de álcalis sejam utilizados. Com o tempo podem ocorrer expansões, seguidas de fissurações e diminuição da resistência do concreto (QUEBAUD, 1996; HANSEN, 1992).

QUEBAUD (1996) aponta que, para que hajam as reações deletérias são necessárias três condições:

- existência de agregados reativos;
- elevadas concentrações de álcalis nas soluções intersticiais;
- umidade superior à 80 a 85 %.

e) Metais

Pequenas quantidades de aço ou pedaços de arame podem causar manchas ou pequenos danos à superfície dos concretos, principalmente em presença de cloretos (QUEBAUD, 1996; LEVY, 1997). Outros metais como peças de zinco e alumínio podem causar desprendimento de hidrogênio no concreto fresco, ou fissurações devido a expansões do concreto endurecido (HANSEN, 1992).

A remoção da maior parte dos metais presentes nos resíduos de construção e demolição ocorre antes do seu beneficiamento, seja manual ou mecanicamente. Além disso, HANSEN (1992)

ressalta a característica dúctil dos metais, que possibilita a sua não fragmentação e posterior remoção no decorrer do processo de beneficiamento.

f) Cloretos

Concretos produzidos com agregados reciclados com presença de cloretos podem provocar graves problemas de corrosão de armaduras (QUEBAUD, 1996; HANSEN, 1992).

QUEBAUD (1996) ressalta que os agregados reciclados podem ser contaminados por cloretos de duas formas:

- através da penetração dos íons cloreto nas estruturas, principalmente em áreas marinhas, pontes, ou pavimentos submetidos a sais de degelo;
- através do uso de agregados retirados de zonas marinhas, ou de aditivos aceleradores de pega a base de cloretos nas misturas do concreto.

A adoção de cuidados no recebimento do resíduo, com a investigação de sua origem, pode auxiliar no controle da presença de cloretos nos concretos produzidos com agregados reciclados. Além disso, existe a possibilidade da adoção da verificação permanente da qualidade do agregado produzido nas centrais de reciclagem.

Além das impurezas apontadas anteriormente, é necessário o cuidado com o uso de agregado reciclado de material que sofreu reações com álcalis ou sulfatos, ou quaisquer outros agentes deletérios, físicos ou químicos, que possam influenciar nas propriedades dos concretos produzidos. É necessário evitar, ainda, materiais contaminados com substâncias tóxicas, mal-cheirosas ou radioativas, ou então, que contenham óleo ou substâncias químicas solúveis que possam prejudicar a pega, o endurecimento, ou o desenvolvimento das resistências dos concretos reciclados (HANSEN, 1992).

Neste contexto, a origem do resíduo é muito importante pois irá determinar os tipos de impurezas ou contaminantes que podem fazer parte da composição do resíduo. Isso permite avaliar se o material pode ou não ser utilizado para produção de agregado reciclado para concreto, ou se deveria ter um uso menos nobre.

Segundo SCHULZ e HENDRICKS(1992), a possibilidade da existência de impurezas implica no registro da origem, quantidade e composição superficial do material reciclado, quando o mesmo chega às usinas. Os autores consideram importante um sistemático controle visual do resíduo no controle da produção. A escassez dos locais de disposição e o aumento das taxas de disposição podem eventualmente levar a uma pré-seleção do resíduo já na fonte geradora, o que facilitaria o controle do seu uso.

A retirada de substâncias nocivas dos resíduos de construção e demolição deve ser efetuada quando sua presença é detectada. Entretanto, esse não é um processo fácil, muito menos econômico. Tudo depende do tipo de processo de beneficiamento dos resíduos de construção usado nas usinas. Mas é certo que a retirada manual de toda e qualquer impureza existente torna o processo desvantajoso do ponto de vista econômico.

VAN DER WEGEN e HAVERKORT (1998) avaliaram o efeito da realização de uma lavagem sobre a fração de agregados miúdos produzidos na Holanda e constataram que a adoção de tal processo pode reduzir muito a quantidade partículas finas no agregado, além de reduzir a presença de cloretos e sulfatos nas amostras.

A necessidade de estudos mais cuidadosos e aprofundados a respeito do comportamento de agregados reciclados que possuam algum tipo de impureza deve ser considerada. O objetivo destes estudos deve ser explicitar os teores máximos permitidos de impurezas ou contaminantes, quando um ou mais tipos são detectados nos agregados e quais propriedades são influenciadas pela presença de quais tipos de contaminantes, entre outras questões.

2.6 BENEFICIAMENTO DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO

Depois da redução da quantidade de resíduos gerados, como é observado na Figura 1 do item 2.4., a reutilização dos materiais refugados sem a necessidade de qualquer tipo de beneficiamento é o que pode ser considerado como a situação ideal. Como a solução ideal nem sempre é possível, e tendo em vista a necessidade de resolução do problema da enorme quantidade de resíduos gerados, da demanda crescente de matéria-prima, dos problemas no gerenciamento de resíduos e do alto impacto ambiental, entre outros, resta a reciclagem. Na adoção desta prática os materiais necessitam passar por algum tipo de beneficiamento para que possam ser utilizados e este é o ponto que será tratado neste item.

O beneficiamento dos resíduos de construção e demolição envolvem desde a sua coleta e transporte, passando por separação, britagem e peneiramento, até a sua estocagem para posterior utilização. Alguns estudos concluíram que o beneficiamento do resíduo de construção e demolição não difere muito do tratamento dado à produção de agregados naturais, e muitos dos equipamentos utilizados para esses se adequam perfeitamente aos primeiros.

2.6.1 Usinas de reciclagem

Para a inserção de um programa de reciclagem de resíduos, a implantação da unidade recicladora é muito importante. Nesta fase, deve ser levada em consideração, entre outras coisas, a capacidade operacional do equipamento a ser escolhido para operar na usina, dentre uma infinidade de tipos disponíveis no mercado. De acordo com BRITO FILHO (1999), é fundamental o conhecimento de três pré-requisitos básicos:

- volume de geração de resíduo de construção e demolição possível de ser reciclado;
- o tipo de material e a aplicação que se pretende para o mesmo;
- local de instalação da unidade recicladora.

Cabe ressaltar que o terceiro pré-requisito será tratado em maior profundidade neste item.

O local de instalação de uma usina de reciclagem de resíduos de construção e demolição é de fundamental importância para o sucesso do programa de reciclagem. O ideal é que as usinas estejam o mais próximo possível das fontes geradoras e dos locais de uso, ou seja, inseridas no contexto urbano (LIMA, 1999). Deve-se levar em conta, igualmente, se a usina passa por um pólo de atração de caminhões e se o resíduo recebido necessitará de muitos descartes de partidas contaminadas, o que torna o processo inviável operacional e economicamente (BRITO FILHO, 1999). O autor afirma que é interessante que as unidades recicladoras não se situem em áreas predominantemente residenciais, nem em áreas centrais, para não sobrecarregar o tráfego circunvizinho. Assim, o ideal é que estas unidades sejam instaladas mais próximas a aterros, onde toda infra-estrutura necessária já existe. Deste modo, existiriam facilidades em termos de transporte, diminuindo custos, além de contribuir para que os coletores de resíduos atuassem de forma benéfica para o bom funcionamento do programa de reciclagem, pois não iriam percorrer grandes distâncias para descartar o resíduo.

Uma outra alternativa interessante é a distribuição de pontos de coleta deste resíduo, estrategicamente espalhados pela cidade, o que dará suporte ao sistema, facilitando a eliminação de grandes distâncias de transporte e de pontos de descarte clandestinos.

Entretanto, uma vez implantada, a usina de reciclagem deve dispor de alguns itens que eliminem, ou minimizem a possível ocorrência de impacto ambiental causada pela emissão de poeira e ruídos. Deste modo, existem algumas medidas importantes que podem ser tomadas quando da instalação das usinas de reciclagem, inclusive tais medidas foram verificadas, e com sucesso, na implantação das recicladoras de Belo Horizonte/MG, Ribeirão Preto/SP e São José dos Campos/SP (LIMA, 1999). Foi adotada a plantação de cerca viva no entorno da usina, que ajuda a conter a poeira e o ruído e melhorar a imagem do local; foi realizado o cobrimento do piso da usina com material reciclado, que quando compactado ajuda a diminuir o pó com o tráfego dos caminhões; foi dado um revestimento ao britador com manta anti-acústica e aos locais de impacto com manta de borracha para reduzir o ruído; foi feita a redução das alturas de descarga dos materiais nos pontos de transferência; foram instalados aspersores nos pontos de entrada e saída de materiais para redução da emissão de pó. Além disso, vale a pena mencionar a adoção de projetos de urbanização e paisagismo conferindo à unidade recicladora um aspecto mais agradável e sadio (BRITO FILHO, 1999).

LIMA (1999) afirma que as medidas citadas anteriormente foram monitoradas na usina de Belo Horizonte e os resultados obtidos foram satisfatórios. Com isso, para implantação das outras duas usinas foram usados os relatórios de monitoramento da usina de Belo Horizonte, para eliminar a necessidade do estudo de impacto ambiental e para obtenção da licença de funcionamento.

Em muitos países da Europa, nos Estados Unidos e no Japão as usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição já são uma realidade e o processo, em muitos deles, já está muito avançado. Na maioria dos casos, o processamento destes resíduos é realizado pela iniciativa privada com o incentivo das administrações públicas, inclusive, em alguns casos, já há a adoção de uma política de certificação dos processos e produtos. Na Holanda, por exemplo, os produtores de agregados reciclados, tanto de concreto, quanto de resíduos de construção e demolição misturados, vendem seu produto com certificado de qualidade e suas usinas de reciclagem passam por constantes auditorias dos institutos de certificação para garantir isso (PIETERSEN et al., 1998). Os autores ainda relatam que a melhor maneira de se obter agregados reciclados de qualidade é se trabalhar com um esquema de aceitação rigoroso dos resíduos nas usinas de reciclagem.

No Brasil, de acordo com JOHN (1999), não há ainda um grande mercado para os reciclados e ele aponta como causa, a ausência de uma política ambiental que inclua mecanismos para o

desenvolvimento deste mercado como, por exemplo, o uso do poder de compra do estado e a implantação de sistemas de certificação dos produtos e processos, entre outros.

Atualmente, no Brasil, existem usinas de reciclagem de resíduos de construção instaladas em Belo Horizonte/MG; São Paulo; São José dos Campos/SP; Ribeirão Preto/SP; Piracicaba/SP, Londrina/PR e Muriaé/RJ. Outras cidades encontram-se em fase de estudo para implantação da reciclagem dos resíduos de construção como é o caso de: Brasília/DF; Campo Grande/MS; Cuiabá/MT, Jundiaí/SP; Ribeirão Pires/SP; Santo André/SP; Salvador/BA; São Bernardo do Campo/SP e São José do Rio Preto/SP (LIMA, 1999).

Todas as usinas instaladas e em fase de instalação no país são iniciativas do poder público, o que demonstra o alcance ainda incipiente da visão de reciclagem e do desenvolvimento sustentável, nacionalmente, especialmente no setor privado.

Além das preocupações com o local da implantação da usina de reciclagem, é importante salientar o tipos de plantas de beneficiamento existentes. Na realidade, são conhecidos dois tipos de plantas para reciclagem de resíduos de construção e demolição, as unidades fixas e as unidades móveis.

a) Plantas fixas para o beneficiamento de resíduos de construção e demolição

As plantas fixas para beneficiamento de resíduos de construção e demolição constituem a grande maioria dos tipos existentes. De acordo com CAIRNS et al. (1998), as principais vantagens deste tipo de planta de reciclagem são:

- possibilidade de obtenção de produtos reciclados mais diversificados e de melhor qualidade que os produzidos pelas plantas móveis;
- possibilidade de utilização de equipamentos maiores e mais potentes que possibilitam melhor processo de britagem, retirada de impurezas e peneiramento que os equipamentos utilizados em plantas móveis.

Talvez a grande desvantagem deste tipo de planta resida na necessidade de altos investimentos e de disponibilização de grande área, cerca de 50000 m², para instalação da planta de processamento (CAIRNS et al., 1998).

b) Plantas móveis para beneficiamento de resíduos de construção e demolição

A utilização de resíduos de construção e demolição já está bastante difundida dentro da pavimentação de rodovias, principalmente no exterior. De acordo com BANTHIA e CHAN (2000), quando se deseja reciclar um pavimento, isso ocorre, na maioria das vezes, no mesmo local onde se quer construir o novo. Para diminuir gastos com extração e transporte de materiais realiza-se a reciclagem dos resíduos produzidos e utiliza-se este material no mesmo local de origem para construção do novo pavimento. Desta maneira, é mais interessante que o beneficiamento do material a ser utilizado ocorra o mais próximo possível da fonte consumidora. Neste sentido, surgiram, em muitos lugares, empresas de mineração interessadas em participar deste mercado, dando origem as plantas móveis de beneficiamento de resíduos de construção e demolição. Segundo MÜELLER e WINKLER (1998), apesar das plantas estacionárias produzirem agregados de melhor qualidade, as plantas móveis são bem mais flexíveis.

Estas plantas proporcionam versatilidade e flexibilidade tanto às empresas que comercializam os agregados reciclados, quanto aos envolvidos na sua utilização. Estão disponíveis em vários tamanhos e tipos de sistemas de operação. A maioria dispõe de sistemas de britagem primário e secundário, com separadores magnéticos para as barras de aço presentes nos concretos estruturais, e sistema de peneiramento acoplado. Britam peças com dimensões que vão desde 60x60x60 cm até 90x140x100 cm, aproximadamente. Necessitam de reduzida mão de obra e pouco tempo para montagem e desmontagem das plantas. Em casos mais complexos pode-se necessitar de 9 dias para montagem, mas para os mais simples 4 horas são suficientes. Para estes últimos casos é necessária apenas 1 hora e meia para desmontagem (TURLEY, 1998a; TURLEY, 1998b; DRAKE, 2000).

De acordo com CAIRNS et al. (1998), as principais vantagens deste tipo de planta são:

- Custos menores que os das plantas fixas, mais que 5 %;
- Menor tempo de instalação;
- Redução dos custos de transporte do material de demolição para a planta de reciclagem.

2.6.2 Tipos de processos de beneficiamento do resíduo de construção

O processamento dos resíduos de construção e demolição não diferem muito daqueles usados para os agregados naturais (HANSEN, 1992; QUEBAUD, 1996; PIETERSEN et al., 1998). Segundo PIETERSEN et al. (1998), a separação do resíduo deve ocorrer o mais cedo possível dentro da cadeia de reciclagem de materiais, de preferência durante o processo de demolição.

Os procedimentos e equipamentos utilizados no beneficiamento do resíduo de construção e demolição afetam as principais características do agregado reciclado como: classificação e composição; teor de impurezas; granulometria; forma e resistência (LIMA, 1999).

De acordo com HANSEN (1992), existem vários tipos de processos de beneficiamento para britagem e peneiramento de resíduos de construção e demolição. O tipo de processo escolhido para operar as usinas recicladoras será determinante nos custos do processo de reciclagem e na qualidade do produto final conseguido.

A seguir estão descritos alguns dos processos de beneficiamento utilizados em usinas de beneficiamento no exterior.

a) Primeira geração de plantas de processamento de resíduos

Nestas plantas não são utilizados dispositivos de remoção de impurezas, com exceção de imãs magnéticos para retirada de barras de aço, ou quaisquer outros elementos metálicos. O sistema pode ser aberto, como mostrado na Figura 7a, ou fechado, como indicado na Figura 7b.

Em ambos sistemas os resíduos devem estar livres de impurezas como madeiras, plásticos, papéis, vidros, terra, entre outros, pois não existe a possibilidade de sua retirada no decorrer do processo. O sistema aberto apresenta uma granulometria do produto final menos contínua e com menor definição do diâmetro máximo, pois depois da britagem secundária o material é diretamente misturado aos produtos finais de diâmetro entre 0 e 40 mm, diferentemente do que acontece no sistema fechado onde o material volta a ser peneirado e britado (QUEBAUD, 1996). Porém, a autora menciona que o sistema aberto possui maior capacidade que o sistema fechado, e assim é mais vantajoso economicamente.

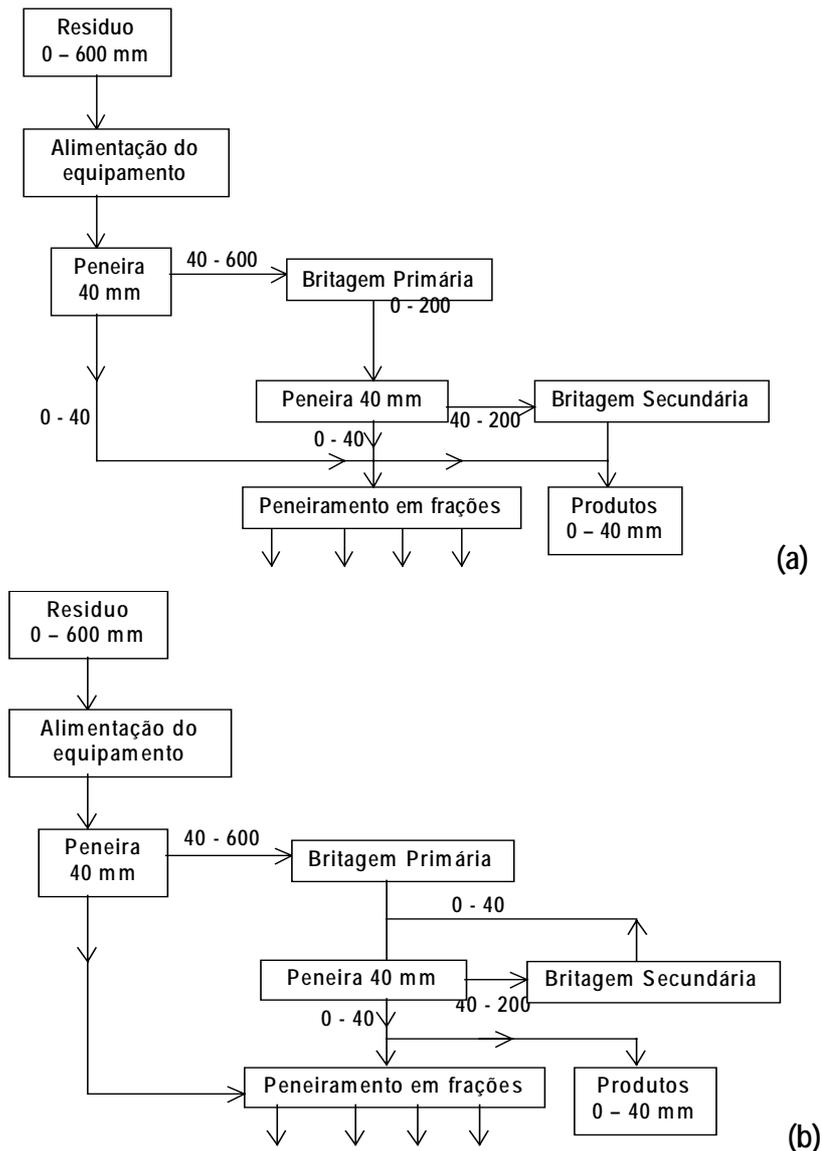


Figura 7 Sistemas da produção de resíduos de construção e demolição da Primeira Geração de Plantas de Processamento. a) Sistema aberto b) Sistema fechado (BOESMAN, citado por HANSEN, 1992).

b) Segunda geração de plantas de processamento de resíduos

Todas as plantas da segunda geração são similares no projeto básico. Nestas plantas as impurezas de maior dimensão, tais como madeiras, metais, plásticos e papéis, são retiradas manual ou mecanicamente antes da britagem. Depois de britados, os resíduos são limpos por classificação seca ou úmida. As peças grandes, vindas de demolição, são reduzidas a dimensões de 40 a 70 cm e então passam pela britagem primária. O produto da britagem é peneirado e o material geralmente menor que 10 mm é descartado para que se elimine a possibilidade de uso de impurezas de tamanho reduzido, como gesso ou terra. Em seguida, procede-se à britagem secundária para algumas das faixas granulométricas existentes e posteriormente executa-se o peneiramento (HANSEN, 1992). O esquema básico das plantas de segunda geração pode ser visualizado na Figura 8.

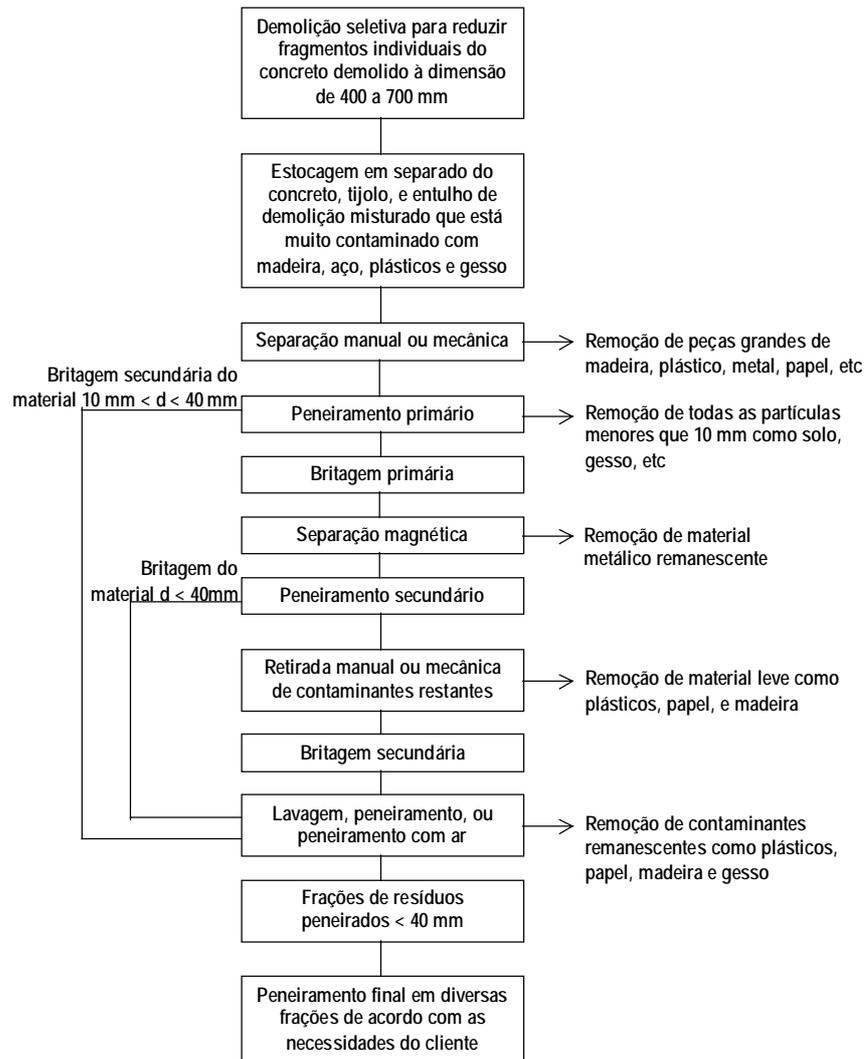


Figura 8 Sistemas da produção de resíduos de construção e demolição da Segunda Geração de Plantas de Processamento (HANSEN, 1992).

De acordo com JUNGMANN e QUINDT (1998), o processo de separação do resíduo via úmida tem maiores benefícios que o processo de separação via seca, devido à menor quantidade de pó gerada, melhor separação e classificação, e o agregado obtido fica praticamente livre de impurezas orgânicas.

Quando os agregados produzidos são provenientes de resíduos de construção misturados, pode acontecer que ainda restem menos de 1 % de impurezas na composição dos agregados obtidos. Este fato, segundo HANSEN (1992), pode não afetar o uso do produto em rodovias, ou outros serviços nos quais esta característica pode não influenciar muito. Porém, não há certeza que esse teor não tenha nenhuma consequência danosa quando o agregado é usado em concreto. O autor afirma, entretanto, que se o resíduo a ser britado for constituído de mais de 95% de concreto antigo, o agregado produzido estará suficientemente limpo para ser usado no concreto.

c) Terceira geração de plantas de processamento de resíduos

De acordo com HANSEN (1992), neste tipo de planta todo material reciclado deve ser fornecido, processado e vendido sem a necessidade de transporte de grandes quantidades de material residual, nem do ponto de geração do resíduo, nem do ponto de processamento. Conforme o autor, esta é uma situação econômica e ambientalmente ideal. A primeira planta deste tipo foi implantada na Holanda.

2.6.3 Equipamentos para beneficiamento do resíduo de construção e demolição

Na adoção de sistemas utilizados para o beneficiamento dos resíduos de construção e demolição deve ser levada em consideração a capacidade requerida dos equipamentos adotados, em relação à quantidade de material a ser beneficiada e ao tipo de material a ser obtido, como foi mencionado no item 2.6.1.

Geralmente, os equipamentos de reciclagem se compõem de: silo de recepção tipo calha vibratória; triturador; transportadores de correia; extrator de metais ferrosos; conjunto peneirador, entre outros (BRITO FILHO, 1999).

Os tipos de britadores utilizados merecem atenção especial, pois estes equipamentos são determinantes da maior parte das propriedades dos agregados obtidos. Além disso, merece destaque o desempenho do britador do ponto de vista econômico. A seguir estão listados alguns dos tipos existentes e mais usados.

a) Britador de impacto

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

- robustez – processa tanto peças de concreto armado, quanto vigas de madeira (LIMA, 1999);
- alta redução das dimensões das peças britadas. Às vezes dispensa a rebitagem, pois gera uma quantidade de finos razoável (LIMA, 1999; MÜELLER e WINKLER, 1998; QUEBAUD, 1996);

- gera grãos de forma cúbica, com boas características mecânicas (LIMA, 1999; QUEBAUD, 1996; MAULTZSCH e MELLMANN, 1998);
- baixa emissão de ruído (LIMA, 1999);
- possui menor sensibilidade aos materiais que não podem ser moídos, como barras de aço (QUEBAUD, 1996; HANSEN, 1992);
- fornece agregados com distribuição granulométrica mais adequada para obras de pavimentação (HANSEN, 1992).

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

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

b) Britador de mandíbula

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

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

O equipamento apresenta as seguintes desvantagens:

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

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

c) Moinhos de martelo

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

d) Cones de britagem

Apenas material previamente britado deve ser utilizado neste equipamento, que chegando à câmara de britagem é esmagado contra as paredes de um cone (LEVY, 1997). HANSEN (1992) aponta

que este equipamento é muito usado para britagem secundária, processando apenas materiais com diâmetro máximo de 200 mm.

Segundo BRITO FILHO (1999), estes equipamentos produzem grãos cúbicos, todavia, reduzem bastante a fração de agregados de maiores dimensões, dando origem a uma quantidade excessiva de finos.

2.6.4 Moinho e argamassadeira

Este é um equipamento móvel e de pequeno porte, que está à disposição do setor de construção há mais de 100 anos. O moinho e argamassadeira foi muito utilizado na reconstrução das cidades do período pós-Guerra, sendo uma máquina bastante simples e resistente (CONSTRUÇÃO, 1996). Segundo LIMA (1999), este equipamento começou a ser usado no Brasil em 1980, com o início da reciclagem de resíduos de construção em escala mais significativa.

Este moinho é dotado de uma caçamba de piso horizontal, duas pás raspadeiras e misturadoras, dois rolos moedores/misturadores e um motor elétrico. Uma das marcas disponíveis deste equipamento é o Moinho Argamassadeira ANVI 500 que tem capacidade de 2 m³/hora e mói o resíduo de construção à medida que prepara argamassa para execução de alvenaria, revestimentos e enchimentos de piso. Isso resulta em maior praticidade e ganhos com materiais e mão de obra. Segundo CONSTRUÇÃO (1996), outra opção é o Amassador Alfaque, que tem basicamente as mesmas características do anterior, porém não serve como argamassadeira, apenas tritura o material a ser reciclado.

2.6.5 Separação dos resíduos de construção e demolição

Além dos processos de separação manual das impurezas, da retirada de componentes metálicos com o auxílio de eletroímãs e dos processos de retirada de impurezas por via seca ou úmida citados no item 2.6.2, já estão disponíveis no mercado internacional equipamentos capazes de realizar a separação dos diferentes componentes do resíduo de construção e demolição utilizando técnicas de separação com auxílio de fluxos de água, como ocorre em certos trabalhos de mineração (JUNGMANN E QUINDT, 1998, KOHLER e KURKOWSKI, 1998).

O sistema conhecido como **alljig**[®] utiliza o benefício das diferentes densidades apresentadas pelos diversos materiais para fazer a sua separação através da injeção controlada de fluxos de água a depender do tipo de separação que se deseja realizar. No caso dos resíduos de construção e

demolição, pode separar-se a parte útil do resíduo das impurezas, ou os diferentes componentes presentes no resíduo, ou seja, o concreto da argamassa, ou a argamassa do material cerâmico, o concreto do material cerâmico, ou das pedras naturais, entre outros (JUNGMANN E QUINDT, 1998).

O sistema **alljig**® funciona através de fluxos de agitação de água que passam por camadas do material, rearranjando as partículas de acordo com sua densidade. O movimento ótimo da água, necessário para separação do material em camadas, de acordo com sua densidade, depende do tipo de componente presente na amostra de resíduo, bem como da sua dimensão. Desta forma, existem diferentes diagramas de fluxo de agitação de água. Neste equipamento existe um sistema de descarga da camada de material pesado, que é acionado geralmente com o auxílio de uma bóia controlada por sinais eletrônicos. Cada camada dos diferentes materiais mais pesados, vai sendo descarregada sequencialmente (JUNGMANN E QUINDT, 1998).

JUNGMANN E QUINDT (1998) apresentam como desvantagem do sistema o grande volume de água que está em constante circulação no processo, e o manuseio e secagem da lama resultante do processo.

Além do sistema de separação dos resíduos de construção e demolição por meio da densidade das partículas, existe um outro sistema de separação, citado por LOO (1998), utilizado para frações miúdas de agregados de concreto, visando separar as partículas de cimento da fração inerte.

O sistema separa radioativamente os grãos de cimento da areia e brita, havendo uma redução de 60 a 70 % de volume. Este processo é conhecido como KEMA-DECO. A separação dos grãos de cimento é realizada em 3 estágios dos quais o primeiro consiste em britar e peneirar o resíduo até que se obtenha partículas com diâmetro menor que 40 mm. Depois o material passa por um forno durante 4 horas a uma temperatura entre 650 e 700 °C. Por último o material (concreto reciclado) é resfriado, desaglomerado e moído sendo, então, peneirado e separado por frações em diferentes diâmetros. O material resultante possui cerca de 40 % de partículas menores que 1 mm, das quais a fração menor que 150 µm é rica em cimento (LOO, 1998). Este sistema de separação apresenta alta emissão de CO₂, alto consumo de energia, porém baixa geração de resíduos, ou seja, ele representa uma boa alternativa para utilização da fração muito fina do resíduo de concreto que geralmente é descartada. Neste sentido a utilização do resíduo de concreto seria completa.

2.7 ASPECTOS ECONÔMICOS E PRÁTICOS DO ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

A utilização de um novo material ou serviço em qualquer indústria deve envolver, além do estudo das suas características técnicas, estudos dos aspectos práticos, econômicos e políticos ligados a este produto.

A viabilidade financeira de um novo produto deve ser avaliada levando em consideração o valor de mercado do produto, os custos do processo de reciclagem, mais o custo de disposição do resíduo em aterro (JOHN, 1998b). De acordo com NAHB, citado por PENG et al. (1997), os passos para determinar a viabilidade econômica da reciclagem de resíduos de construção e demolição são:

- identificar os materiais recicláveis;
- determinar o custo/benefício da reciclagem;
- desenvolver planos de gerenciamento de resíduos e incluí-los nos documentos de contrato;
- implementar o plano de gerenciamento de resíduos e treinar os contratantes e funcionários;
- monitorar e incentivar a participação de contratantes e funcionários.

PENG et al. (1997) relatam, ainda, que o sucesso da reciclagem de resíduos depende das técnicas utilizadas, da eficiência de equipamentos apropriados e das equipes de trabalho para o desenvolvimento das operações necessárias à reciclagem.

Outro aspecto inerente à reciclagem é a difícil aceitação do mercado para a utilização dos produtos. Então, pode haver necessidade de incentivos políticos e fiscais para o encorajamento desta atitude, como, por exemplo, aumento de taxas de disposição de resíduos, ou aumento de taxas de extração de recursos naturais, ou, ainda, incentivos fiscais para utilização de materiais reciclados (SIMPSON, 1999). Todavia, o autor faz a consideração sobre alguns dilemas que podem se formar em relação à indústria da construção e a utilização de agregados reciclados:

- a falta de especificações em relação ao material pode gerar resistência ao uso;
- sem especificações, os fornecedores não podem realizar o beneficiamento do produto;

- a falta de especificações reduz a demanda sobre o produto, o que não incentiva o desenvolvimento do fornecimento;
- se houver a demanda, como não há beneficiamento, o material não pode ser utilizado.

Como pode ser visto, existe um ciclo da não utilização do material reciclado que deve ser resolvido. SIMPSON (1999) considera que a solução deste problema passa pela cooperação entre clientes, técnicos, indústria do concreto, indústria de fornecimento de agregados e a indústria de demolição, para viabilizar o uso do material reciclado.

Na análise econômica da implantação de programas de reciclagem de resíduos de construção e demolição devem ser levados em consideração custos com: instalação de usinas de beneficiamento, instalação de pontos intermediários de disposição de resíduos; gerenciamento dos resíduos, entre outros.

Os custos com a instalação de usinas de beneficiamento de resíduos de construção podem ser muito altos. O investimento deve ser de longo prazo, pois como salientam PENG et al. (1997) no período de adaptação do sistema pode haver baixa produtividade, assim como o mercado para os produtos reciclados pode estar apenas em desenvolvimento.

Quando se pensa na adoção de usinas de reciclagem pelo setor público, o caminho para a amortização do investimento pode ser mais curto, pois na gestão dos resíduos de construção e demolição haverá a eliminação dos custos com limpeza urbana destes resíduos e com a aquisição de agregados convencionais (PINTO, 1997). BRITO FILHO (1999) ressalta que o custo com a montagem da unidade recicladora se amortiza entre 1 e 2 anos.

A cidade de Belo Horizonte, que conta com um programa de reciclagem de resíduos de construção a mais tempo, encaminha atualmente 110 toneladas/dia de resíduos à usina, e deste volume apenas 5% vai para o aterro por não possuir características recicláveis (CONSTRUÇÃO, 1996).

Segundo LIMA (1999), em levantamentos realizados pela I&T em Belo Horizonte/MG e nas cidades de São José dos Campos, Ribeirão Preto, São José do Rio Preto, Jundiaí e Santo André, todas no estado de São Paulo, os custos com remoção e aterramento dos resíduos estão cada vez mais altos devido ao escasseamento dos locais de disposição e pelo aumento das distâncias a serem percorridas.

No Novo México, a taxa para disposição de resíduos em aterros é de US\$ 8/ton, enquanto que em Nova Jersey esta taxa chega aos US\$ 75/ton. Estas taxas tendem a aumentar ainda mais, e cada vez mais rápido nos Estados Unidos (STEUTEVILLE, citado por PENG, et al., 1997). Isto faz com que a opção pela reciclagem seja cada vez mais aparente.

A Tabela 4 apresenta os custos do gerenciamento de resíduos de construção em alguns municípios brasileiros.

Tabela 4 Custos de gerenciamento de resíduos de construção em alguns municípios

Município	Fonte	Custo-
Belo Horizonte/SP	SLU – 1993	US\$ 7,92/t
São José dos Campos/SP	I&T – 1995	US\$ 10,66/t
Ribeirão Preto/SP	I&T – 1995	R\$ 5,37/t
São José do Rio Preto/SP	I&T – 1997	R\$ 11,38/t

Fonte: LIMA (1999)

A reciclagem de resíduos apresenta-se como fonte de economia para obtenção de materiais para a construção. LIMA (1999) afirma que gerenciar resíduos, ou seja, removê-los e aterrá-los, é mais dispendioso que reciclá-los. O autor compara os dados apresentados na Tabela 4 com o custo do agregado reciclado em bica corrida, que pode ser menor que R\$ 4,00/ton (dado fornecido SLU – BH).

No Canadá, por exemplo, o custo do agregado reciclado é de \$8/ton, enquanto para o agregado natural é cerca de \$15/ton (BANTHIA e CHAN, 2000). No Noroeste dos Estado Unidos o preço do agregado natural varia de US\$ 5/ton a US\$ 10/ton, enquanto o agregado reciclado está em torno de US\$ 5/ton (O'BRIEN, 1998). Segundo o autor, nestes valores não estão computados os custos com transporte, equipamentos, ou disposição em aterros.

Segundo MACHADO Jr. e LATTERZA (1997), o custo por metro cúbico de agregado reciclado é aproximadamente 20 % do custo do agregado natural. Dados levantados por BRITO FILHO (1999), na usina de reciclagem de São Paulo, indicam o custo dos agregados reciclados entre R\$ 5,20 a R\$ 7,80 por metro cúbico (R\$ 4,00 a R\$ 6,00 por tonelada), contra valores da ordem de R\$ 20,00 por metro cúbico de agregado natural comercializado na região, ou seja, uma economia de cerca de 67 %, em média.

Se forem computados os valores gastos no gerenciamento dos resíduos, a menor velocidade de esgotamento dos aterros sanitários ou de inertes, os menores gastos com transporte, entre outros, a economia conseguida com a reciclagem é ainda maior. Além disso, pode haver um barateamento dos insumos básicos de construção (areia e brita).

Diferente do que afirmam os pesquisadores brasileiros sobre o custo de produção do agregado reciclado, VAN ACKER (1998) aponta que na Europa os gastos com britagem e beneficiamento do agregado reciclado são semelhantes aos gastos dos mesmos serviços com agregados naturais. Contudo, o autor ressalta que a vantagem do uso do material reciclado está atrelada à redução dos custos com gerenciamento e disposição dos resíduos.

Um outro aspecto importante ligado ao valor econômico dos resíduos de construção e demolição seria inferir ao resíduo gerado um certo “valor agregado” advindo da sua separação e processamento dentro do próprio canteiro de obras. Segundo PINTO (2000), o resíduo gerado durante o processo de construção não pode ser ignorado e o gerenciamento da construção deve fazer a previsão, ainda na fase de implantação do canteiro, de um local apropriado para a criação de caixas para separação e processamento deste resíduo. O autor define como devem ser separadas as caixas, o que deve ser colocado em cada uma delas, e qual o tipo de processamento necessário para cada um dos tipos de separação propostos.

O gerenciamento dos resíduos, de acordo com PINTO (2000), apresenta três tipos de vantagens. Vantagens para o **ambiente de trabalho**, que estará melhor distribuído e mais organizado, o que induz um novo comportamento nos operários. Vantagens de âmbito **institucional**, visto que a organização e reciclagem dos resíduos são excelentes promotores de venda de produtos. Por fim, vantagens **econômicas**, propriamente, uma vez que reciclar é sempre mais barato que descartar. Esse comparativo pode ser feito observando os valores apresentados na Tabela 5 e na Tabela 6.

Tabela 5 Custos usuais quando não há gerenciamento nem reciclagem dos resíduos gerados

Custos (R\$/m ³)	Cidades brasileiras			
	São Paulo	Belo Horizonte	Salvador	Goiânia
Custo da fração mineral perdida do resíduo de construção e demolição (1) (2)	66,87	63,40	72,33	71,40
Custo da remoção de resíduos em containers	16,00	12,00	12,00	9,00
Custo total	82,87	75,40	84,33	80,40

(1) Composição estimada de 65% de argamassa, 29% de cerâmica, 6% de concreto e outros

(2) Somente o material descartado é considerado

Fonte: PINTO (2000)

Observa-se que, nos resultados da Tabela 6, o custo de remoção do resíduo foi substituído pelo custo de reciclagem, e ainda houve a adição do valor do resíduo reciclado. O autor coloca que a reciclagem interna é auto-sustentável, economicamente, em todas as regiões do país. E, além das vantagens econômicas apontadas anteriormente, há ainda vantagens que advêm dos menores custos

com a extração de agregados naturais, remoção de resíduos e horas de trabalho. Por fim, a amortização dos investimentos pode ocorrer em um único empreendimento, como já foi discutido.

Tabela 6 Custos estimados para reciclagem interna em canteiros de obras

Custos (R\$/m ³)	Cidades brasileiras			
	São Paulo	Belo Horizonte	Salvador	Goiânia
Custo da fração mineral perdida do resíduo de construção e demolição (1) (2)	66,87	63,40	72,33	71,40
Limites dos custos da reciclagem interna (3)	1,64 a 6,69	1,45 a 6,06	1,33 a 5,65	1,42 a 5,94
Valor médio do resíduo reciclado (4). (Crédito)	-25,47	-18,10	-26,48	-25,50
Custo Total	43,04 a 48,09	46,75 a 51,36	47,18 a 51,50	47,32 a 51,48
Redução de custos	48 a 42 %	38 a 30 %	44 a 39 %	41 a 35 %

(1) Composição estimada de 65% de argamassa, 29% de cerâmica, 6% de concreto e outros

(2) Somente o material descartado é considerado

(3) Baixos custos para britadores de mandíbula e altos custos para moinhos de argamassas

(4) Considerando proporções variadas entre agregados graúdos e miúdos devido ao equipamento adotado

Fonte: PINTO (2000)

2.8 NORMAS, PROPOSTAS E ESPECIFICAÇÕES PARA AGREGADOS RECICLADOS

Em muitos países onde os agregados reciclados já estão inseridos no contexto da construção civil, foram desenvolvidas propostas de especificação do material, garantindo seu uso de forma mais correta. Algumas destas propostas ou diretrizes para normalização do material encontram-se listadas a seguir, e seu estudo colabora para facilitar esta inserção em locais onde os agregados reciclados não são ainda utilizados.

a) “Proposição de norma para o uso de agregado reciclado e concreto com agregado reciclado” – Japão

Esta é uma das mais antigas especificações para uso de agregado reciclado em concretos e foi proposta pelo BCSJ, em 1977 (BCSJ, citado por HANSEN, 1992). Segundo o autor, esta proposta prevê a utilização apenas de concreto para produção de agregado reciclado. O concreto reciclado produzido deve ser classificado de acordo com a dimensão e composição do agregado utilizado. E a resistência de projeto deve ser especificada abaixo do limite de resistência especificado para cada tipo de concreto reciclado, como apresentado na Tabela 7.

Na Tabela 8 estão apresentados alguns usos típicos para os concretos reciclados definidos pela proposta, listados na Tabela 7.

Tabela 7 Tipos de concretos de agregado reciclado e valores máximos de resistência à compressão

Tipo de concreto de agregado reciclado	Tipo de agregado		Valores máximos admissíveis de resistência à compressão (Mpa)	
	Graúdo	Miúdo	Resistência de projeto	Resistência de dosagem
I	Reciclado ⁽¹⁾	Convencional	18	30 ⁽²⁾
II	Reciclado ⁽¹⁾	Mistura de convencional e reciclado	15	27 ⁽²⁾
III	Reciclado ⁽¹⁾	Reciclado	12	24 ⁽²⁾

NOTA: (1) Incluindo mistura com agregados de massa específica usual

(2) Podem ser usados valores maiores, desde que o consumo de cimento não se torne excessivo

Fonte: BCSJ, citado por HANSEN (1992)

Além disso, na proposta estão especificados limites de algumas das propriedades físicas dos agregados e alguns parâmetros de dosagem. Segundo HANSEN (1992), a proposta japonesa é a única que apresenta um método para determinação de impurezas em agregados reciclados.

Tabela 8 Sugestões de uso para concretos de agregados reciclados

Tipo de concreto	Objetivos principais de uso
I	Fundações de prédios em geral, fundações de edifícios de apartamentos, edificações residenciais unifamiliares, edificações familiares de um pavimento, fundações pesadas, etc.
II	Fundações para construções de bloco de concreto pré-fabricado, construções leves não residenciais, fundações de máquinas, etc.
III	Fundações de edifícios de madeira, portões, cercas, fundações de máquinas simples, lajes em declive, etc.

Fonte: BCSJ, citado por HANSEN (1992)

A falta de espaço e a demanda por matéria-prima talvez tenham sido os principais motivos para que o Japão se antecipasse em elaborar um projeto de Norma. Entretanto, este projeto pode ser considerado como muito conservador atualmente, dado o avanço conseguido nos últimos anos sobre o conhecimento das propriedades dos concretos com agregados reciclados.

b) Especificação para concreto com agregados reciclados – Diretriz proposta pelo Comitê Técnico 121 – DRG do RILEM (The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures)

O comitê técnico de pesquisa RILEM 121 – DRG, que trata da orientação para demolição e reutilização de concreto e alvenaria, preparou uma especificação para concretos com agregados reciclados que foi primeiramente apresentada no 3º Simpósio Internacional Sobre Demolição e Reutilização de Concreto e Alvenaria, em 1993. O documento apresentado considera apenas o uso da

fração graúda do agregado reciclado produzido, e basicamente define três categorias de agregados reciclados para classificação e utilização em concretos (HENRICHSEN, 1993):

TIPO I: agregados reciclados basicamente de alvenaria;

TIPO II: agregados reciclados basicamente de concreto;

TIPO III: mistura de agregados naturais e reciclados.

Em seus estudos, LIMA (1999), BAZUCO (1999) e LEVY (1997) relatam que, de acordo com o RILEM, os agregados do TIPO III devem obedecer também às seguintes exigências:

- Conteúdo mínimo de agregados naturais deve ser de 80 % em massa;
- Conteúdo máximo de agregados TIPO I deve ser de 10 % em massa.

O documento produzido pelo comitê RILEM 121-DRG apresenta as especificações exibidas na Tabela 9.

Tabela 9 Especificações para o agregado graúdo reciclado para produção de concreto

Especificações	Tipo de agregado			Método de Ensaio
	TIPO I CARG	TIPO II CARG	TIPO III CARG	
Massa específica mínima do material seco (kg/m ³)	1500	2000	2400	ISO 6738 e 7033
Absorção máxima de água (%)	20	10	3	
Quantidade máxima de material SSS < 2200 kg/m ³ (%) ^(a)	-	10	10	ASTM C 123
Quantidade máxima de material SSS < 1800 kg/m ³ (%)	10	1	1	
Quantidade máxima de material SSS < 1000 kg/m ³ (%)	1	0,5	0,5	
Quantidade máxima de impurezas (vidro, betume, plásticos) (%)	5	1	1	Visual
Quantidade máxima de metais (%)	1	1	1	Visual
Quantidade máxima de matéria orgânica (%)	1	0,5	0,5	NEM 5933
Quantidade máxima de finos < 0.063 mm (%)	3	2	2	PrEN 933-1
Quantidade máxima de areia < 4 mm (%) ^(b)	5	5	5	
Quantidade máxima de sulfatos (%) ^(c)	1	1	1	BS 812, parte 118

a - Saturada superfície seca

b - Se for excedido o limite da fração areia, esta parte do agregado deverá ser considerada como parte da areia total a ser utilizada

c - Quantidade de sulfato deverá ser calculada como SO₃

CARG - Concreto de Agregado Graúdo Reciclado

SSS - Saturado Superfície Seca

As percentagens da tabela referem-se a massa/massa

Fonte: RILEM, citado por LEVY (1997)

A Tabela 10, apresentada no estudo realizado por LEVY (1997), exhibe algumas possibilidades de utilização para os concretos produzidos com cada tipo de agregado. Estas possibilidades estão

baseadas nas condições de exposição do concreto, desde que alguns ensaios sejam realizados com o material, servindo como critério de aceitação do mesmo.

Tabela 10 Sugestões de uso para os tipos de concreto reciclado definidos pelo RILEM TC 121-DRG

Agregados reciclados	CARG TIPO I	CARG TIPO II	CARG TIPO III
Máxima resistência admitida	C16/20 ^a	C50/60	Não há limites
Verificação adicional solicitada quando utilizado em condições de exposição da classe 2 ^a , 4a	- Ensaio de expansão ARS - Utilização nas condições de exposição da classe 4a não é permitida	- Ensaio de expansão ARS ^c	- Ensaio de expansão ARS
Verificação adicional solicitada quando utilizado em condições de exposição da classe 2b, 4b ^b	- Utilização nas condições de exposição da classe 2a e 4a não é permitida	- Ensaio de expansão ARS - Ensaio de estabilidade dimensional nas condições de gelo e degelo	- Ensaio de expansão ARS - Ensaio de estabilidade dimensional nas condições de gelo e degelo
Verificação adicional solicitada quando utilizado em condições de exposição da classe 3	- Utilização nas condições de exposição da classe 3 não é permitida	- Ensaio de remoção de sais	- Ensaio de remoção de sais

a - Poderá ser produzido um concreto de classe C30/37, desde que a massa específica do agregado na condição saturada superfície seca exceda 2,00 kg/dm³.

b - Em conformidade com o código EN V206.

c - Ensaio de expansão para avaliar a reatividade álcali-silica

Fonte: RILEM, citado por LEVY (1997)

O documento apresentado pelo RILEM TC 121-DRG determina, também, critérios para o cálculo de projetos de estruturas de concreto com agregados reciclados, baseados nas exigências para concretos convencionais. São apresentados fatores de multiplicação fundamentados nos valores aplicados para os concretos com agregados naturais, para estimar as propriedades dos concretos reciclados, quando valores experimentais não estiverem disponíveis. Os fatores de correção estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 Fatores de avaliação das propriedades do concreto com agregado reciclado

Propriedades	TIPO I	TIPO II	TIPO III
Resistência à tração	1	1	1
Módulo de elasticidade	0,65	0,80	1
Coefficiente de fluência	1	1	1
Retração	2	1,5	1

Fonte: RILEM, citado por LIMA (1999)

Com relação ao agregado miúdo, o texto recomenda que se dê atenção apenas à fração compreendida entre 2 e 4 mm de diâmetro, além de apresentar algumas desvantagens da aplicação da fração mais fina em concretos (LIMA, 1999).

c) Recomendações do CUR (Commissie vor Uitvoering van Research – Comissão de desenvolvimento e pesquisa) para uso de agregado reciclado em concreto - Holanda

Na Holanda, foi proposta uma norma para produção de concreto simples, armado ou protendido, desenvolvida pelo CUR e aplicada quando mais de 20 % da massa de agregado graúdo ou miúdo natural é substituída por agregado reciclado. Se o percentual de substituição for menor que este valor, o concreto pode ser considerado como convencional (HANSEN, 1992).

Caso o concreto a ser produzido seja utilizado em elementos estruturais, nos quais as dimensões sejam calculadas pela deflexão máxima permissível, e possua na sua composição mais de 20 % em massa de agregados reciclados, a altura ou espessura das peças devem ser aumentadas em 10 % para garantir sua rigidez. Esta resolução está baseada no menor módulo de deformação e maior fluência do concreto reciclado (CUR, citado por LIMA, 1999).

Neste país existe também uma recomendação de norma - Resíduo de Alvenaria para Concreto - apresentada pelo subcomitê B29 da Associação de Normalização Holandesa, Comitê 13 de Materiais para Agregados. Esta recomendação diz respeito apenas a agregados constituídos de pelo menos 65 %, em massa, de alvenaria britada e que têm como materiais secundários: o máximo de 20 %, em massa, de concreto leve, materiais cerâmicos e pedras naturais; o máximo de 10 % de concreto aerado; o máximo de 25 % de argamassa (CUR/VB, citado por SCHULZ e HENDRICKS, 1992).

LIMA (1999) menciona as principais propriedades dos agregados reciclados apontadas pelo documento: menor densidade, que induz à necessidade de correções no traço do concreto para manter as proporções dos materiais; alta absorção de água, que leva à necessidade de sua compensação e que pode gerar expansão no umedecimento e retração na secagem; menores resistências mecânicas dos concretos reciclados, com reduções que variam entre 10 e 35 %; aumento na retração com valores que variam de 30 a 65 %; aumento da fluência; diminuição do módulo de deformação do concreto reciclado; entre outros. Na Tabela 12 apresenta-se os parâmetros de comparação entre concretos reciclados e convencionais.

Diferente do que afirmam vários outros pesquisadores, o documento do CUR propõe o uso de agregado reciclado com dimensões menores que 4 mm combinados com agregados convencionais, sem prejuízos às misturas de concreto (CUR, citado por LIMA, 1999). De acordo com LOO (1998), desde junho de 1997, a norma holandesa de agregados para concreto foi adaptada de forma a incluir os agregados reciclados desde que estes tivessem uma massa específica $\geq 2,00 \text{ kg/dm}^3$.

Tabela 12 Relação entre parâmetros de concreto com agregado reciclado e convencional

Parâmetro	Reciclado de concreto		Reciclado de alvenaria
	B 17,5 e B 22,5	B 27,5 e B 45	B 17,5 e B 22,5
Coef. de expansão térmica 10 ⁻⁶ /°C	13,6	13,1	14,9
Resistência à tração	1,0	1,0	1,0
Módulo de elasticidade	0,95	1,55	1,25
Retração	1,35	1,55	1,25
Relaxação	1,45	1,25	1,15

Fonte: CUR, citado por LIMA (1999)

A Holanda encontra-se num estágio mais avançado no uso de agregados reciclados de construção e demolição. Atualmente, cerca de 95 % de todo resíduo gerado anualmente neste país é reciclado. Desde o ano 2000 é proibido depositar resíduo com potencial de reutilização nos aterros do país, incentivando a reciclagem (DORSTHORST e HENDRIKS, 2000).

Além disso, a Holanda já dispõe de certificados de qualidade para os agregados reciclados produzidos em algumas empresas do país. Segundo HENDRIKS et al. (1998), a alguns anos foi desenvolvido um sistema de qualidade pela Organização de Produtores de Agregados Reciclados (BRBS), hoje conhecido como Certificado de Qualidade Korrelmix®. Este documento é obtido quando são preenchidas certas exigências para as plantas de beneficiamento dos agregados, para o processo de produção, para a verificação de qualidade e para o produto final.

d) Especificações para uso de agregados reciclados em obras rodoviárias - Estados Unidos

Neste país os estudos têm sido direcionados para a normalização e controle da aceitação de agregados reciclados de concreto para aplicação principalmente em obras rodoviárias. Grupos da ASTM (American Society for Testing Materials), do US Army Corps of Engineers e de alguns Departamentos Estaduais de Rodovias dos Estados Unidos estão trabalhando no sentido de eliminar as barreiras existentes no país para o uso de agregados reciclados de concreto na produção de novos concretos (LEVY, 1997).

A norma ASTM C 33-82, na definição de agregado graúdo, inclui o material obtido da britagem de concreto de cimento hidráulico e a ASTM 125-79, na definição de agregado miúdo manufaturado, inclui igualmente o material obtido com a britagem de concreto de cimento hidráulico (HANSEN, 1992).

No Estado de Iowa, o Departamento de Transportes lançou um documento que especifica condições de demolição, britagem, equipamentos a serem utilizados, proporcinamento entre agregados graúdos e miúdos, critérios de trabalhabilidade e acabamento, e parâmetros de durabilidade dos

concretos reciclados expostos a ciclos de gelo/degelo para o uso do material reciclado em rodovias (HUISMAN e BRISTON, citados por LEVY, 1997).

e) “Utilização de subprodutos industriais e sobras de materiais de construção e de engenharia civil” - Norma Britânica 6543 (1985) – Reino Unido

O uso de resíduos de demolição ou construção, em obras prediais ou rodoviárias, foi contemplado pela nova Norma Britânica 6543 (1985) – Guide to the use of industrial by-products and waste material in building and civil engineering (título original). Entretanto, apesar da falta de dados de cunho tecnológico, a norma considera adequado apenas o uso de agregado de concreto reciclado para uma ampla faixa de utilização do material em base e sub-base de pavimentos rodoviários (HANSEN, 1992). O autor considera que ainda está longe de ser aprovado o uso corrente de agregados reciclados para produção de novos concretos capazes de alcançar determinadas resistências à compressão. As Especificações Rodoviárias Britânicas, de 1991, permitem o uso do agregado reciclado de concreto para pavimentação se os mesmos atenderem às exigências de qualidade e granulometria da norma BS 882 (1992) (COLLINS, 1998b). Segundo DESAI (1998), a BS 6543 (1985) não é muito conhecida, e muito menos usada na indústria da construção britânica.

De acordo com COLLINS (1998b), já está em andamento um novo projeto para contemplar o uso do agregado reciclado em concreto pré-misturado. Este projeto está sendo desenvolvido com a colaboração de empresas de demolição, reciclagem, e concreto, e, ainda, de autoridades locais. O objetivo do projeto é disponibilizar procedimentos de controle de qualidade que permitam o uso dos agregados reciclados em aplicações mais nobres.

f) Texto adicional a norma regular de concretos - Dinamarca

Este país publicou, em 1990, uma recomendação permitindo o uso de agregado reciclado de concreto, para qual foi feita, em 1995, uma emenda publicada pela Associação Dinamarquesa de Concreto (GLAVING e HAUGAARD, 1998). De acordo com os autores, esta recomendação tem as seguintes características:

- Concreto reciclado deve ser usado em estruturas submetidas a ambientes passivos e moderados, em termos de agressividade do meio. Os ambientes considerados passivos cobrem as estruturas localizadas internamente, em clima seco e fundações completamente enterradas. Os ambientes moderados dizem respeito àqueles em que as estruturas estarão parcialmente enterradas, paredes externas e fachadas, vigas e pilares externos revestidos, sacadas e parapeitos, entre outros. As

estruturas podem ser afetadas pelo gelo, mas em hipótese alguma podem estar em contato com íons cloreto.

- Define agregado reciclado como todo material processado e fracionado a partir de demolições, construções, reparos e reformas, constituídos de cerca de 95 % de concreto, alvenaria, e revestimentos cerâmicos.
- Os agregados reciclados são divididos em dois grupos de acordo com a sua massa específica e a fonte de origem. Além disso, recomenda o tipo de uso para cada um dos tipos de agregados:
 - GP1: representa os agregados com massa específica maior que $2,2 \text{ kg/dm}^3$, cuja origem é de estruturas de concreto sem contaminações, as vezes com pequenas parcelas de alvenaria. Este material é indicado para o uso em concreto armado, ou não, utilizados em ambientes passivos e moderados e cujas resistências à compressão podem ser $\leq 40 \text{ MPa}$;
 - GP2: representa os agregados com massa específica maior que $1,8 \text{ kg/dm}^3$, cuja origem vem de resíduo limpo de construção, como a mistura de concreto e alvenaria. Este material é indicado para o uso em concreto armado, ou não, utilizados em ambientes passivos e que as resistências à compressão são $\leq 20 \text{ MPa}$.
- No máximo 20 % do agregado miúdo natural pode ser substituído pelo reciclado.

Quando se usa concretos dos grupos GP1 e GP2 em estruturas de concreto, o seu cálculo deve levar em consideração 80 e 50 % do módulo de elasticidade, respectivamente, em relação a concretos produzidos com agregados convencionais. Ambos os materiais devem obedecer as normas Dinamarquesas para concretos e agregados no que se refere à quantidade de impurezas livres (LEVY, 1997).

GLAVIND e HAUGAARD (1998) relatam que a próxima Norma Dinamarquesa para Concreto, DS 481 (Concreto – Materiais) deve incluir regras para o uso de agregados reciclados de concreto.

g) Bélgica

Na verdade este país não possui uma norma, ou sequer uma recomendação para o uso de reciclados em qualquer produto ou serviço. A aprovação do uso de agregados reciclados neste país têm sido dificultada devido a problemas técnicos que ocorreram em duas pontes que usaram concreto reciclado nas suas construções e que tiveram que ser demolidas (DE PAUW, citado por LEVY, 1997).

O autor relata que foi iniciado recentemente pelo BBRI (Belgian Building Research Institute) um projeto de pesquisa na tentativa de esclarecer as dúvidas sobre o assunto. A reação álcali-agregado é o maior problema apontado, pois desde que existam as condições favoráveis para o aparecimento das reações, a durabilidade e a vida útil das estruturas estariam comprometidas.

Em termos de normalização, existe apenas uma especificação geral para execução de obras particulares em Bruxelas, que alterou a forma de colocação das armaduras para facilitar os trabalhos de demolição e reciclagem do concreto.

h) “Produção e utilização de concretos de agregados reciclados” - DIN 4163 (1951)

“Materiais de construção reciclado para construção de estradas. Garantia de qualidade” - RAL – RG 501/1 (1985)

“Concreto com agregado reciclado” – Novo código alemão– Alemanha

O uso de agregado reciclado para produção de concreto não está previsto no Código Alemão DIN 1045 – “Concreto e concreto armado: projeto e execução”. Assim, para que sejam utilizados agregados reciclados em novos concretos é necessário que autoridades que supervisionam as construções e o Instituto Alemão de Tecnologia emitam permissões específicas (GRÜBL e RÜHL, 1998).

É intrigante quando se pensa que na época do pós-guerra milhões de metros cúbicos de resíduos de alvenaria foram processados neste país, e agora, não há permissão para sua utilização. Naquela época foi elaborada a Norma Alemã DIN 4163 (1951) que tratava da utilização de resíduos de alvenaria para produção de concretos. Com base nesta norma, os concretos deveriam alcançar densidades entre 1600 e 2100 kg/m³, resistências máximas de 30 MPa, e módulo de deformação de 15 GPa (LEVY, 1997).

Segundo LEVY (1997), a antiga Alemanha Oriental possuía uma Especificação Normativa, a RAL-RG 501-1 (1985), para utilização de resíduo de demolição reciclado em obras rodoviárias. Este documento estabelecia diretrizes para garantia de qualidade do material reciclado a ser utilizado, buscando uniformizar os procedimentos de produção do material, e garantindo que estes apresentassem propriedades condizente com as especificações nacionais.

De acordo com ROOS (1999), uma nova lei foi introduzida na Alemanha, em 1996, na qual foi especificado que qualquer pessoa que produz, vende ou consome bens é responsável por reciclar ou

dispor adequadamente o resíduo porventura gerado. Esta lei é conhecida como a lei que evita resíduos na produção industrial. O autor ressalta que a melhor maneira de fazer isso, no caso dos resíduos de construção, é utilizá-los como agregado para produção de novos concretos. Neste sentido, em 1998, foram lançadas novas recomendações para construção, como o novo Código Alemão “Concreto com agregado reciclado de concreto” (*Beton mit rezykliertem Zuschlag* – título original em alemão) publicado pelo Comitê Alemão do Concreto Armado (DafSt). Esta especificação possibilita apenas o uso de agregado graúdo e miúdo proveniente do processamento de concreto, porém a sua ampliação a outros tipos de materiais já está sendo analisada (KÖHLER e KURKOWSKI, 1998; GRÜBL e RÜHL, 1998).

Segundo GRÜBL e RÜHL (1998), este novo código é dividido em duas partes. A primeira, *Tecnologia do Concreto*, trata de particularidades referentes à produção e ao manuseio do concreto. A segunda, *Agregado reciclado de concreto em forma de pedra britada e areia britada*, trata de exigências que devem ser atendidas pelos agregados reciclados, adicionalmente às exigências da DIN 4226 (Agregado para concreto: Itens, correções e exigências), para agregados naturais.

Na parte 1 deste código foram feitas considerações a respeito do tipo de uso dos concretos reciclados, teores de agregados para as misturas e respectivos campos de aplicação, bem como recomendações a respeito da produção dos concretos, entre outros. A seguir estão apresentados alguns dos itens discutidos por GRÜBL e RÜHL (1998).

A Tabela 13 apresenta os campos de aplicação dos concretos reciclados.

Tabela 13 Campos de aplicação e restrições dos concretos com agregados reciclados

Campos de aplicação	Restrições
Componentes internos	Nenhum
Componentes externos em geral	
Componentes impermeáveis à água	
Componentes resistentes ao ataque químico moderado	

Fonte: GRÜBL e RÜHL, 1998

A Tabela 14 apresenta os teores máximos de agregado reciclado presentes nas misturas, que dependem da classe de resistência do concreto e do tipo de aplicação que será dado às mesmas.

O código faz, ainda, alusão as propriedades do concreto reciclado, que devem ter relação direta com as propriedades do concreto convencional.

Tabela 14 Teor máximo % de agregados reciclados em concreto em relação: (a) volume total de agregados; (b) ao volume do grupo de agregados

Aplicações		Agregado graúdo e miúdo de concreto D > 2 mm		Agregado miúdo de concreto D ≤ 2 mm	
		(a)	(b)	(a)	(b)
Interiores	≤ B 25 ¹	35	50	7	20
	B 35 ¹	25	40	7	20
Concretos expostos ao meio ambiente Concretos impermeáveis Concreto resistente a ciclos de gelo/degelo Concretos de alta resistência Concretos resistentes à ataques químicos		20	30	0	

1) De acordo com a DIN 1045

Fonte: A partir de DafStB, citado por KOHLER e KURKOWSKI (1998) e GRÜBL e RÜHL (1998)

Com relação à produção dos concretos estabelece-se que a taxa de absorção dos agregados reciclados não deve ser esquecida. De acordo com as recomendações, compensar a taxa de absorção referente a 10 minutos de contato do material com a água é suficiente, uma vez que ao fim deste tempo cerca de 90 % do total de água absorvida em 24 horas já foi alcançado. Foi enfatizado, que em virtude desta alta taxa de absorção, a consistência do concreto pode variar desde a hora da mistura até o momento da sua utilização, e é expressamente proibido adicionar água para melhorar esta característica. Deste modo, o código prevê o uso de superplastificante para compensar as mudanças de consistência.

Todas as propriedades do concreto reciclado devem ser avaliadas antes da sua utilização. Além disso, para seu uso em estruturas de concreto, o agregado reciclado deve estar combinado com o agregado natural.

Sugere-se também que deve haver o monitoramento de cada partida de material utilizada. Com vistas à detecção de variações nas partidas de material, a massa unitária e a absorção de água devem ser determinadas regularmente.

Na parte 2 do código alemão, de acordo com GRÜBL e RÜHL (1998), são feitas considerações a respeito das propriedades que o agregado graúdo e miúdo de concreto devem apresentar. São feitas exigências relacionadas aos processos e tecnologias de obtenção do material, bem como das características dos mesmos, e são relacionadas regras para produção, embalagem, transporte, estocagem e identificação do material, entre outros.

Com relação à produção do material, o código prevê a utilização de britadores de mandíbula, seguido de britadores de rolos, a fim de obter partículas com melhor distribuição e forma, e indica que a

aplicação do processo de separação de partículas via úmida fornece os melhores resultados para retirada das impurezas. Além disso, a norma sugere que o material a ser britado deve ser previamente selecionado.

Além de atender às exigências para agregados naturais estabelecidas pela DIN 4226, os agregados reciclados devem atender a certas exigências específicas apresentadas na Tabela 15 e cumprir as exigências quanto aos teores de impurezas apresentados na Tabela 16.

Tabela 15 Exigências adicionais para os agregados reciclados de concreto

Tipo	Exigências	
Composição	Agregado graúdo britado, areia e agregado natural	≥ 95 M. - %
	Componentes minerais: concreto autoclavado, leve, tijolos cerâmicos, etc.	≤ 5 M. - %
	Componentes não minerais: plantas, madeira, papel, metal, vidro, plásticos, etc.	≤ 0,2 M. - %
Densidade seca	$\rho \geq 2,0 \pm 0,15 \text{ kg/dm}^3$	
Absorção de água	Agregado graúdo/ miúdo britado > 2 mm	A ≤ 10 M. - %
	Agregado miúdo britado ≤ 2 mm	A ≤ 15 M. - %
Aspectos ambientais	Tabela 16	

Fonte: GRÜBL e RÜHL (1998)

Os agregados reciclados devem ser classificados da mesma forma que os agregados naturais e podem ser fornecidos ou separados, ou misturados, sendo especificado, neste caso, o teor (%), em volume, de cada tipo de agregado das misturas. A embalagem, transporte e estocagem deve ser semelhante à dos agregados naturais e deve ser feita a identificação dos agregados na nota de entrega do material.

Em síntese, na Alemanha, apesar da permissão para o uso deste material e das recomendações previstas no código, o uso do agregado reciclado para estruturas expostas ainda é restrito. Para vencer esta barreira mais estudos e incentivos devem ser realizados.

Tabela 16 Concentração máxima de substâncias deletérias nos agregados reciclados, determinadas por decantação

Parâmetro	Limite	Procedimento
PH	13,5*	-
Condutividade elétrica	8000* $\mu\text{S}/\text{cm}$	-
Cloretos	150 mg/l	-
Sulfato	600 mg/l	-
Arsênio	50 $\mu\text{g}/\text{l}$	DIN 38406 – 22 DIN EN ISO 11969
Chumbo	5 $\mu\text{g}/\text{l}$	DIN 38406 - 16 DIN 38406 – 22
Cromo total	100 $\mu\text{g}/\text{l}$	DIN 38406 – 22 DIN EN 1233
Cobre	200 $\mu\text{g}/\text{l}$	DIN 38406 – 7 DIN 38406 - 16 DIN 38406 – 22
Níquel	100 $\mu\text{g}/\text{l}$	DIN 38406 – 11 DIN 38406 – 16 DIN 38406 – 22
Mercurio	2 $\mu\text{g}/\text{l}$	DIN EN 1483
Zinco	400 $\mu\text{g}/\text{l}$	DIN 38406 – 8 DIN 38406 - 16 DIN 38406 – 22

* Não é critério de exclusão

Fonte: GRÜBL e RÜHL (1998)

i) Proposta de especificação para o uso de agregado reciclado em concreto – Brasil

Em 1999, LIMA em seu trabalho de dissertação de mestrado, realizou a proposição de especificações para uso do agregado reciclado em concretos. Estas especificações foram apresentadas de forma resumida no CIB Symposium on Construction & Environment, realizado em São Paulo, no ano 2000 (LIMA, 2000). É importante salientar que o autor realizou a compilação e análise de alguns trabalhos realizados no país e no exterior, bem como a análise de especificações existentes para elaboração deste trabalho. A seguir está apresentada, em linhas gerais, a proposta realizada por LIMA.

O objetivo geral da sua proposta foi especificar um material para uso em concreto comum ou reforçado, sem fins estruturais e resistente à água, com a seguinte recomendação de uso:

- concreto comum usado em construções, especialmente em alvenaria, ou para fundações de pequenas edificações, ou para regularização de pisos, passeios ou similares, ou, ainda, para usos em concretos com baixas solicitações;

- concreto reforçado para usos comuns com baixa ou nenhuma solicitação estrutural;
- produção de blocos, tijolos ou outros pré-fabricados de concreto.

Na sua especificação, o autor permite o uso das duas frações de agregados reciclados, miúdo e graúdo, substituídos total ou parcialmente. Lima (2000) definiu 3 tipos de agregados (Tabela 17).

Tabela 17 Tipos de agregados reciclados para uso em concreto e sua composição

Tipos de agregados reciclados para concreto					
Tipo 1 – agregado de concreto reciclado		Tipo 2 – agregado de alvenaria com material cerâmico		Tipo 3 – agregado de alvenaria sem material cerâmico	
Materiais aceitáveis	Materiais limitados	Materiais aceitáveis	Materiais limitados	Materiais aceitáveis	Materiais limitados
C O M P O S I Ç Ã O Concreto convencional comum e reforçado (média e alta resistência); artefatos de concreto pré-fabricado; agregados convencionais	Concreto leve, poroso e de baixa resistência; concretos combinados com madeira, asfalto, óleo, etc; argamassa com cal; resíduos de alvenaria; gesso, plástico, madeira, papel ou outros	Argamassa; resíduo de alvenaria e materiais cerâmicos; artefatos de concreto; agregados convencionais	Resíduos de concreto e alvenaria combinados com madeira, asfalto, óleos, etc; concretos leves e porosos; gesso, plástico, madeira, papel ou outros	Argamassa; resíduo de alvenaria sem materiais cerâmicos; artefatos de concreto; agregados convencionais	Material cerâmico; resíduos de concreto e alvenaria combinados com madeira, asfalto, óleos, etc; concretos leves e porosos; gesso, plástico, madeira, papel ou outros

Fonte: LIMA (2000)

Foram definidos alguns requisitos mínimos, que devem ser apresentados pelos três tipos de agregado, para que possam ser utilizados na produção de concreto. Estes requisitos estão apresentados na Tabela 18.

Segundo LIMA (2000), o agregado reciclado para produção de concreto deve ser pré-umidificado antes de ser colocado em contato com o cimento por no mínimo 2 minutos. O controle de qualidade do concreto deve ser realizado através do consumo de cimento, enquanto o controle de produção do concreto deve ser feito através da medida do abatimento pelo cone de Abrams. De acordo com o autor, o abatimento das misturas de concreto reciclado deve ser semelhante à do concreto convencional, sendo utilizada a menor relação água/cimento possível.

A granulometria dos agregados miúdo e graúdo reciclado deve obedecer às especificações das Normas Brasileiras. Entretanto, o excesso de finos da fração miúda poderá, eventualmente, ser

descartado para que a qualidade do concreto não seja comprometida. Além disso, o autor salienta que deve ser determinado o melhor proporcionamento entre as frações miúda e graúda dos agregados, de forma a obter a mistura mais compacta possível.

Tabela 18 Requisitos para o agregado reciclado usado na produção de concreto

Parâmetro	Tipos		
	1	2	3
Composição			
Concreto ⁽¹⁾ (consumo mínimo % em massa)	85	-	-
Argamassa, pedra, areia, artefatos de concreto, concreto de baixa resistência (% em massa)	Máx. 10	Min. 50	Mín. 85
Material cerâmico (% em massa)	Máx. 5	Máx. 50	Máx. 5
Outros resíduos de alvenaria não cerâmica, concreto leve, concreto poroso, vidro, etc. (% em massa)	Máx. 5	Máx. 15	Máx. 15
Taxa de absorção			
Agregado graúdo (> 4,8 mm) - (% máximo em massa)	7	12	10
Agregado miúdo (< 4,8 mm) - (% máximo em massa)	12	17	15
Valores máximos de resistência à compressão dos concretos com agregados reciclados (MPa)			
Com agregado graúdo reciclado	16	12	14
Com agregado miúdo reciclado ⁽²⁾	12	10	12
Teor de impurezas			
Sulfato (Máximo - % em massa)	1	1	1
Cloretos ⁽³⁾ (Máximo - % em massa)	1	1	1
Materiais não minerais: plásticos, papel, madeira, metais, materiais leves sintéticos (Máximo - % em massa)	1	1	1
Solo e substâncias orgânicas (Máximo - % em massa)	5	5	5
Betume (Máximo - % em massa)	1	1	1
Partículas macias e friáveis (Máximo - % em massa)	0,1	0,1	0,1
Amianto (Máximo - % em massa)	1	1	1

(1) Concreto de baixa resistência (usado em fundações, passeios, regularização de piso) é caracterizado como resíduo de alvenaria

(2) Neste caso, o agregado graúdo pode ser reciclado ou convencional

(3) Concreto comum ou reforçado em locais sem umidade

Fonte: LIMA (2000)

LIMA (2000) aborda também aspectos relacionados com o dimensionamento de peças de concreto reciclado, que devem levar em consideração as propriedades mecânicas do material, geralmente mais baixas que do concreto convencional, além de problemas com retração e deformação lenta.

A difusão do uso de agregados reciclados na construção civil está em muito prejudicada pela inadequação das normas existentes, ou pela falta de normas específicas ao uso deste material (QUEBAUD et al., 1999). SUÁREZ e MALAVÉ (2000) relatam que as restrições com relação ao uso

dos agregados reciclados em concretos estruturais é ainda maior. A barreira do conhecimento tecnológico e a barreira psicológica devem ser transpostas para que o uso do agregado reciclado de construção e demolição se torne efetivo na produção de concretos, material que incorpora uma grande quantidade de agregados, e assim, cada estrutura possa tornar-se um pequeno aterro de inertes ajudando a minimizar os problemas ambientais e reduzindo custos.

3 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO PARA PRODUÇÃO DE CONCRETOS

3.1 USO DO MATERIAL RECICLADO COMO AGREGADO

A necessidade de obtenção de concretos mais duráveis e resistentes têm conduzido a estudos mais aprofundados das propriedades dos agregados. Deste modo, os agregados deixam de ter um papel apenas econômico na composição do concreto, podendo influenciar não só na trabalhabilidade, como também nas suas propriedades físicas, mecânicas e na durabilidade.

Dentre as características mais importantes a serem estudadas para utilização de agregados em concretos estão a granulometria, a absorção de água, a forma e a textura, a resistência à compressão, o módulo de elasticidade e os tipos de substâncias deletérias presentes nos materiais (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Quando se estuda a utilização de agregados para produção de concretos, todas estas características devem ser consideradas, principalmente quando se trata de novos materiais como é o caso do agregado reciclado. Afinal, a viabilidade técnica de sua utilização dependerá do total conhecimento do seu comportamento na estrutura do concreto.

Os agregados reciclados apresentam características peculiares que dependem muito dos materiais que chegam às centrais de processamento e do tipo de processo utilizado nas mesmas como, por exemplo, o tipo de britador, os dispositivos para extração de impurezas, entre outros (QUEBAUD e BUYLE-BODIN, 1999).

A maior heterogeneidade, menor resistência da matriz (concreto original) e maior porosidade são consideradas as principais diferenças entre o agregado reciclado de concreto e o agregado natural (BARRA, 1997). Estas características podem ser generalizadas para todos os tipos de agregados reciclados de construção e demolição disponíveis, pois todos os componentes do resíduo de construção, passíveis de reutilização, apresentam tais propriedades em menores ou maiores proporções.

HANSEN e NARUD (1983) realizaram estudos em concretos com agregados reciclados de concretos de altas, médias e baixas resistências e concluíram que quanto menor a resistência do

concreto original, mais afetadas eram as características físicas e mecânicas dos agregados reciclados produzidos, quando comparados aos agregados naturais.

Observa-se nas pesquisas desenvolvidas até aqui um grande esforço em utilizar os resíduos de construção e demolição separados para produção de novos materiais. Esta é considerada uma situação ideal, entretanto pouco prática (LAURITZEN, 1998), uma vez que reduz as possibilidades de reutilização da maioria dos resíduos gerados, principalmente em países com pouco desenvolvimento tecnológico e econômico. Separar concreto, argamassa, blocos cerâmicos, entre outros, durante o processo de demolição é uma prática difícil e cara. Uma vez misturados, separar os resíduos é praticamente impossível, a menos que se disponha de técnicas de separação como as descritas no item 2.6.5. Deste modo, deve-se pensar no uso de misturas de agregados reciclados. De acordo com LAURITZEN (1998), o uso de agregados reciclados misturados apresenta, em geral, melhores propriedades que o uso de componentes específicos do resíduo para pavimentação. Todavia, acredita-se que estudos sistemáticos destas misturas podem levar à utilização dos agregados reciclados misturados também para produção de concreto.

Somente uma caracterização sistemática dos agregados produzidos a partir de resíduos de construção e demolição permitirá melhor difusão do seu uso em concretos. Conhecer bem o comportamento do material reciclado dentro das misturas de concreto resultará em produtos de melhor qualidade e romperá possíveis barreiras para o completo reaproveitamento do resíduo.

3.1.1 Composição granulométrica

Os agregados reciclados, tanto miúdo quanto graúdo, tendem a uma composição granulométrica um pouco mais grossa que os agregados naturais, resultando em um módulo de finura um pouco maior. O tipo e a granulometria do resíduo, o britador e suas regulagens internas influenciam consideravelmente a granulometria final dos agregados reciclados produzidos (BAZUCO, 1999; LIMA, 1999, BANTHIA e CHAN, 2000).

A granulometria dos agregados exerce influência sobre a trabalhabilidade dos concretos no estado fresco, além de ser importante parâmetro para a dosagem das misturas (BARRA, 1996). De acordo com a autora, esta é uma característica que depende do processo de produção do agregado.

Nas usinas de reciclagem no Brasil, que utilizam britadores de impacto, até 60 %, em massa, do agregado produzido é material miúdo. Isso se deve ao tipo de resíduo usado, ao tipo de britador e ao uso de material que não foi previamente classificado para retirada da parcela miúda (LIMA, 1999).

De acordo com LATTERZA e MACHADO Jr. (1999), foram realizadas análises no material reciclado proveniente da usina de reciclagem de Ribeirão Preto/SP e constatou-se que cerca de 50 % do material beneficiado era passante na peneira de malha # 4,8 mm e que 70 % do material graúdo estava compreendido entre as frações de 19 a 4,8 mm. ZORDAN (1997) encontrou em seu estudo percentuais semelhantes para amostras coletadas na mesma usina, embora em período diferente. Esse alto percentual de material fino pode estar ligado à composição do resíduo usado nas duas pesquisas apresentadas na Figura 3, na qual visualiza-se uma grande quantidade de argamassa e materiais cerâmicos, que por sua vez podem apresentar baixa resistência e tendem a maior desagregação.

No Reino Unido é usado o método de dosagem de concreto do DOE (Department of Environment), que nos últimos anos sofreu algumas modificações a fim de abranger os agregados reciclados para produção de concretos. Uma de suas recomendações é que sejam utilizados agregados graúdos reciclados que tenham dimensão máxima entre 16 e 20 mm para que a durabilidade dos concretos produzidos com este agregado não seja prejudicada (TEYCHENNE et al., citado por HANSEN, 1992). Para concretos reciclados produzidos com agregados de concreto foi observado que o tamanho da partícula exerce uma certa influência na resistência à compressão, devido à quantidade de argamassa aderida às partículas. Quanto maior o grão, maior a possibilidade da existência desta argamassa, e assim, a existência de uma ligação mais frágil (TAVAKOLI e SOROUSHIAN, 1996b).

OGWUDA et al. (1998) fazendo a análise granulométrica de diversas amostras de agregados reciclados evidenciaram uma quantidade maior de partículas de concreto retidas na peneira de abertura # 0,074 mm. Segundo os autores, esta constatação sugere que a fração de material cerâmico e grãos de cimento possuiriam dimensões menores que 0,074 mm.

De acordo com MONTGOMERY (1998), partículas de resíduos de construção e demolição com diâmetros menores que 0,15 mm apresentam maior probabilidade de ter na sua composição partículas não hidratadas de cimento. Com base nesta afirmação, o autor salienta que a utilização destas partículas pode favorecer o incremento da quantidade de cimento presente no concreto produzido, o que pode ajudar a reduzir a aspereza das misturas, podendo, inclusive, favorecer a trabalhabilidade e o aumento de resistência. Todavia, não é possível visualizar, na prática, a britagem de argamassas de forma a obter grãos íntegros de cimento. Além disso, pode ser muito difícil ou impossível mensurar a quantidade destes grãos existente na fração fina.

COLLINS (1998) menciona que alguns pesquisadores acreditam que a fração miúda de resíduos de demolição pode apresentar um nível relativamente alto de contaminação por outros materiais e que seu uso como agregado pode prejudicar o desempenho dos concretos porventura produzidos.

LOO (1998) realizou um estudo com agregados reciclados de concreto separando-os em frações entre 1 e 0,15 mm e menores que 0,15 mm. Para ambas frações foram realizados ensaios de determinação do teor de cálcio e silício no qual os resultados apontaram que os valores de Ca e Si aumentavam para as partículas menores que 0,15 mm.

VAN DER WEGEN e HAVERKORT (1998) realizaram um estudo utilizando agregado miúdo reciclado de diferentes origens, avaliando a influência da realização de uma lavagem prévia dos grãos. A adoção do processo de lavagem dos agregados britados fez o teor de materiais finos ($< 0,063$ mm) reduzir de 10 %, nos agregados que não foram lavados, para 1,9 %, nos agregados lavados.

OGWUDA et al. (1998) realizaram um estudo da composição granulométrica de 60 amostras de agregados reciclados obtidos em 3 plantas de beneficiamento na Inglaterra e concluíram que o material apresentava-se bem graduado, com forma muito semelhante a de agregados naturais utilizados para sub-base de pavimentos rodoviários e, de forma geral, os resultados entre os materiais de diferentes origens tiveram pequena variação.

RASHWAN e ABOURIZK (1997) realizaram um estudo utilizando sobras de concreto de usinas concreteiras. Neste estudo foram avaliadas a influência do tempo de endurecimento do concreto de 1, 2, 3, 4 e 7 dias antes da britagem e do tempo de estocagem do material depois de britado também de 1, 2, 3, 4 e 7 dias. Eles concluíram que quanto maior o tempo de endurecimento do concreto, mais finos eram os agregados obtidos com a britagem do material e atribuíram este fato a menor deformabilidade apresentada pelos concretos mais resistentes, ou mais antigos. Entretanto, o tempo de estocagem não exerceu nenhuma influência significativa na granulometria dos agregados produzidos.

Devem ser tomados cuidados com a composição granulométrica dos agregados reciclados para possibilitar a produção de misturas de concreto trabalháveis, com grau de compacidade satisfatório e que permitam o melhor desempenho técnico e a redução do custo dos concretos produzidos.

3.1.2 Forma e textura das partículas

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

A textura dos agregados reciclados é geralmente mais rugosa e porosa do que a dos agregados naturais. Segundo HAMASSAKI et al.(1996), a superfície dos agregados naturais pode ser classificada como praticamente polida e a dos agregados reciclados como áspera a muito áspera. A argamassa aderida às partículas do material, ou o próprio material cerâmico, conferem ao agregado reciclado tal aspereza. A rebitagem do material poderia favorecer a redução da porosidade do mesmo, principalmente no caso do agregado reciclado de concreto, pois este procedimento ajudaria a diminuir a quantidade da argamassa aderida à superfície (MOREL et al., 1993). Todavia, o custo do beneficiamento aumentaria muito.

Além da rugosidade, os agregados reciclados de concreto, depois de britados, tendem a formas mais angulares, com taxas de superfície/volume maiores que os agregados naturais, que possuem superfícies mais lisas e arredondas. Este fato resulta numa maior fricção interna dos agregados reciclados, o que requer maior quantidade de argamassa para melhorar a trabalhabilidade do concreto produzido (RASHWAN e ABOURIZK, 1997). HANSEN(1992) concluiu, ainda, que os agregados finos reciclados são mais grossos e mais angulares que o desejado para a produção de uma boa mistura de concreto.

Por outro lado, PIETERSEN e FRAAY (1998) apontam o comportamento hidráulico e a textura mais rugosa dos agregados reciclados como causas para a boa aderência existente entre estes componentes e a pasta de cimento. A textura superficial, o tamanho da partícula e a forma do agregado também são apontados por SAGOE-CRENTSIL et al. (1998) como fatores que influenciam bastante a aderência entre o agregado e a matriz de concreto.

KIKUCHI et al. (1998) realizaram estudos com agregados graúdos reciclados obtidos a partir da britagem de concretos com diferentes níveis de resistência e evidenciaram que as partículas de agregados reciclados tendiam a ser mais arredondadas à medida que a resistência do concreto original diminuía.

Em seu estudo, BARRA (1996) evidenciou a forma mais angular e alongada dos agregados reciclados de blocos cerâmicos. Também, o agregado reciclado de concreto apresentou-se mais

angular que o agregado convencional usado no estudo, porém menos lamelar. O agregado reciclado de concreto apresentou forma mais irregular que o agregado natural.

É consenso que todas estas características dos agregados reciclados discutidas acima são consequência do material de origem e do tipo de britador escolhido para o beneficiamento do material. De acordo com BAZUCO(1999), o britador de mandíbulas acentua a forma angular e o britador giratório torna as partículas mais arredondadas.

LIMA (2000) salienta que devem ser tomados cuidados com a forma dos agregados reciclados para produção de concretos, principalmente com relação ao teor de partículas lamelares presentes nas amostras de agregado. Cuidados devem ocorrer para que não se use partidas de agregado com teor excessivo destas partículas e, também, que os grãos do agregado não sejam excessivamente grandes e longos.

Neste contexto, é interessante salientar que o agregado reciclado, quando incorporado ao concreto, torna a mistura muito mais coesa e conseqüentemente com menor trabalhabilidade quando comparado a um mesmo concreto com agregado natural. Existe aí uma desvantagem do uso de agregados reciclados, pois estes grãos necessitam de mais pasta de cimento para produzir misturas mais trabalháveis e, portanto, aumentam o custo do concreto.

Contudo, sua textura mais rugosa e sua maior angulosidade colaboram com a melhoria da aderência pasta/agregado. O material reciclado possui maior área específica, contribuindo com maior área de aderência entre a argamassa e o agregado. Além disso, o material promove maior absorção da pasta de cimento pelos poros superficiais do agregado, quando comparado ao material natural usualmente empregado. Este fato pode proporcionar maior precipitação dos cristais de hidratação nos poros do agregado, permitindo maior fechamento da zona de transição do concreto, tornando a matriz e o agregado um bloco único de material, o que pode melhorar o desempenho final do concreto.

3.1.3 Massa específica e massa unitária

É consenso que tanto a massa específica, quanto a massa unitária dos agregados reciclados geralmente apresentam valores um pouco menores que os apresentados pelos agregados naturais correntemente utilizados na produção de concretos.

BAZUCO (1999) observa que os valores de massa específica dos reciclados são de 5 a 10 % mais baixos que os valores apresentados pelos agregados naturais, podendo os números variar um pouco, de acordo com a origem e a granulometria do material.

Conforme levantamento bibliográfico realizado por HANSEN(1992), os valores de massa específica de agregados originários de concreto oscilam entre 2,12 kg/dm³ a 2,70 kg/dm³. O autor relata ainda os resultados do estudo da massa específica somente da argamassa antiga de concreto com diferentes relações a/c, cujos valores ficaram em torno de 2,00 kg/dm³. Concluiu, então, que a origem do concreto interfere pouco no valor da massa específica e que a mesma é geralmente mais baixa que a dos agregados naturais devido à argamassa antiga aderida às partículas do agregado reciclado de concreto.

A massa específica dos agregados de materiais cerâmicos estudados por CHARISIUS et al., citado por SCHULZ e HENDRICKS (1992), dependeu do tipo de material utilizado, tijolos maciços, ou blocos estruturais, blocos de 2º linha, entre outros, e da quantidade de argamassa utilizada no assentamento. O valor da massa específica esteve geralmente acima de 2,20 kg/dm³.

O agregado graúdo de concreto utilizado no trabalho desenvolvido por TOPÇU e GÜNÇAN (1995) apresentou massa específica igual a 2,45 kg/dm³ para partículas cuja dimensão variava de 8 a 31,5 mm.

No trabalho de caracterização do agregado miúdo e graúdo reciclado desenvolvido por CARNEIRO et al. (2000) a massa específica dos agregados foi da ordem de 2,59 kg/dm³ e 2,19 kg/dm³, respectivamente. Enquanto a massa unitária foi de 1,30 e 1,07 kg/dm³ para o agregado miúdo e graúdo, respectivamente.

MANSUR et al. (1999) caracterizaram agregados reciclados de blocos cerâmicos de alta resistência, largamente utilizados para produção de concreto na Índia, e o seu valor massa específica é de 2,55 kg/dm³.

DESSY et al. (1998), em seu estudo com agregados reciclados, encontraram valores de massa específica dos agregados que estão apresentados na Tabela 19. Os valores apresentados são menores que os normalmente encontrados para os agregados naturais de mesma dimensão, correntemente utilizados na produção de concretos. De acordo com os autores, a diminuição da massa específica para as frações mais finas ocorre devido a maior quantidade de argamassa original existente nesta fração. Assim, segundo eles, existe uma tendência de normalização internacional em limitar a

quantidade de pasta de cimento na composição do agregado reciclado através do limite de aceitação do material baseado na sua massa específica.

Tabela 19 Massa específica de agregados de concreto de acordo com a faixa granulométrica estudada

Frações	γ_s (kg/dm ³)	γ_{SSS} (kg/dm ³)
0 – 4 mm	2,214	2,394
4 – 7 mm	2,238	2,361
4 – 16 mm	2,335	2,453

γ_s – massa específica do material seco

γ_{SSS} – massa específica do material saturado superfície seca

Fonte: A partir de DESSY et al. (1998)

BARRA (1996) realizou um estudo com agregados reciclados de concreto e de material cerâmico cujos valores de massa específica estão apresentados na Tabela 20. Os resultados demonstram que quanto mais poroso o material, menor é a massa específica obtida.

Tabela 20 Massa específica de agregados reciclados em função do componente e da faixa granulométrica utilizada

Componente reciclado	Frações	γ_s (kg/dm ³)	γ_{SSS} (kg/dm ³)
Concreto	12 – 20 mm	2,270	2,427
	6 – 12 mm	2,238	2,406
Material cerâmico	12 – 20 mm	1,870	2,141
	6 – 12 mm	1,866	2,135

γ_s – massa específica do material seco

γ_{SSS} – massa específica do material saturado superfície seca

Fonte: A partir de BARRA (1996)

MACHADO Jr. et al. (1998) afirmam que o agregado graúdo reciclado pode ser considerado aproximadamente como um agregado leve. Entretanto, este é um ponto discordante quando se considera que o limite superior do valor de massa específica para que um agregado seja considerado leve é de 2,00 kg/dm³. Como os agregados reciclados, apesar de menos densos, ainda têm valores de massa específica maiores que 2,00 kg/dm³, seria um equívoco considerá-los como agregados leves. BANTHIA e CHAN (2000) consideram que em virtude da menor massa específica apresentada pelos agregados reciclados, em algumas situações eles podem ser usados como agregados semi-leves.

Em trabalho desenvolvido por TOPÇU e GÜNÇAN (1995), os agregados graúdos reciclados de concreto utilizados possuíam massa unitária de 1,16 kg/dm³. Enquanto a massa unitária dos agregados naturais varia entre 1,30 a 1,75 kg/dm³ (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

ZORDAN (1997), em seu estudo utilizando agregados reciclados de resíduos de construção, cuja composição encontra-se na Figura 3, encontrou valores de massa unitária que estão apresentados

na Tabela 21. ZORDAN et al. (1999) apresentam para as mesmas amostras de resíduos as massas específicas do agregado graúdo e miúdo que também podem ser vistas na Tabela 21.

Tabela 21 Massa unitária de agregados reciclados de composição mista

Faixa Granulométrica	D < 4,8 mm		4,8 < D < 38 mm	
	Amostra	γ (kg/dm ³) ⁽¹⁾	δ (kg/dm ³) ⁽²⁾	γ (kg/dm ³) ⁽¹⁾
A	2,54	1,40	2,01	1,09
B	2,50	1,37	1,94	1,00
C	2,42	1,43	2,01	1,12
D	2,54	1,41	2,09	1,16

D - Diâmetro do agregado

γ - Massa específica do agregado reciclado

δ - Massa unitária do agregado no estado solto

Fonte: (1) A partir de ZORDAN et al. (1999); (2) A partir de ZORDAN (1997)

LATTERZA (1998) realizou ensaios de massa específica e massa unitária no estado solto e no estado compactado de agregados graúdos reciclados com diâmetro máximo de 9,5 mm e encontrou os seguintes resultados: 1,10 kg/dm³ e 1,27 kg/dm³ para a massa unitária do agregado no estado solto e no estado compactado, respectivamente; e 2,45kg/dm³ para a massa específica do agregado graúdo reciclado.

Como foi mencionado no item 2.5.2, as amostras de resíduo dos estudos de ZORDAN (1997) e de LATTERZA (1998) foram coletadas na mesma usina, sendo observada uma pequena variação na composição do resíduo; agora pode-se observar também uma variação de cerca de 18 % na massa específica do agregado graúdo reciclado ensaiado em cada estudo. É importante lembrar que o trabalho apresentado por ZORDAN et al. (1999) utiliza material reciclado proveniente da mesma composição do estudo de ZORDAN (1997), portanto, trata-se do mesmo material. Comparando-se as composições do resíduo, a amostra apresentada por ZORDAN (1997) possui menor quantidade de argamassa e materiais cerâmicos, isto poderia levar a um aumento na massa específica devido a menor quantidade de materiais porosos, fato que não é observado. Entretanto, pode-se estar comparando resultados obtidos com métodos diferentes: LATTERZA (1998) utilizou o ensaio do Frasco de Chapman modificado, enquanto ZORDAN et al. (1999) não apontou o método adotado na determinação desta propriedade. Acredita-se que o método de ensaio possa exercer uma certa influência na determinação da massa específica do agregado reciclado, principalmente da fração graúda, devido à alta porosidade, alta absorção e alta fragilidade do material reciclado. Inclusive, LATTERZA (1998) apontou que o ensaio do Frasco de Chapman modificado não se mostrou muito adequado na determinação da massa específica do agregado reciclado devido à alta absorção do material.

Os resultados de massa específica e de massa unitária encontrados na bibliografia são muito variáveis, mesmo para materiais reciclados com composição muito parecida. Este fato pode ser explicado com base em dois aspectos. Primeiro, a própria composição do material, o tipo de beneficiamento realizado, a granulometria, entre outros fatores, são capazes de interferir na densidade dos agregados reciclados. Além disso, outro ponto que pode ser considerado muito importante é o método utilizado na determinação destas propriedades. Por exemplo, para a determinação da massa do material no estado saturado superfície seca, necessário para o cálculo da massa específica dos agregados, é preciso secar a amostra superficialmente e este procedimento pode incorrer em variabilidade, visto que devido à alta porosidade do material, não somente a película de água da superfície pode ser retirada, mas também a água dos poros um pouco mais internos. Ou ainda, pode ocorrer desagregação do material durante o seu manuseio, ou até durante a sua secagem, devido a menor resistência do material reciclado, principalmente no estado saturado. No método de ensaio do frasco de Chapman também podem ocorrer erros na determinação da massa específica do material, se não houver o cuidado de retirar a maior parte do ar desprendido pelo material poroso quando o mesmo entra em contato com a água, e o espaço que deveria estar ocupado por material e água, estaria ocupado também por bolhas de ar aprisionado. Deste modo, deve haver muito cuidado durante a execução dos ensaios de caracterização de novos materiais, inclusive devem ser levadas em consideração certas limitações no uso de normas e procedimentos de ensaio. É preciso, às vezes, considerar a utilização, ou mesmo, o desenvolvimento de outros métodos de quantificação para determinadas propriedades dos materiais reciclados.

Além disso, conhecer as massas específica e unitária dos agregados é necessário para realizar o estudo de dosagem dos concretos. Pelos valores apresentados conclui-se que existe a necessidade de realizar uma compensação da quantidade de material reciclado a ser utilizada nas misturas de concreto quando traços em massa de concretos convencionais são aplicados aos concretos reciclados. Sem este procedimento o volume de material reciclado correspondente à massa de agregado natural seria maior, resultando numa distorção entre os volumes de concreto convencional e reciclado produzidos a partir de um mesmo traço unitário.

3.1.4 Absorção de água

Para os agregados convencionais, a taxa de absorção de água não exerce quase nenhum tipo de influência nas misturas de concreto, pois os agregados apresentam pouca, ou nenhuma, porosidade. No entanto, quando utiliza-se agregados reciclados para produção de concretos, esta

influência torna-se uma grande preocupação, pois este material apresenta valores bem mais altos de absorção que os agregados naturais geralmente utilizados.

A quantidade de água que o material reciclado pode absorver depende de fatores como a condição inicial de umidade do agregado, o tempo de permanência de contato do material com a água, se o agregado entra em contato primeiro somente com a água, ou com a pasta de cimento, entre outros (BARRA, 1996).

BARRA (1996) fornece considerações qualitativas a respeito da absorção de água de agregados graúdos reciclados quando o material é adicionado diretamente à pasta de cimento, ou à argamassa. Ela menciona que a absorção não ocorre uniformemente, que se dará principalmente na zona de contato entre a pasta e o agregado, ou entre a argamassa e o agregado, variando, assim, a relação água/cimento da mistura de concreto, havendo um gradiente decrescente da pasta, ou argamassa, até a superfície do agregado. As características do agregado e a consistência da pasta, ou argamassa, são de fundamental importância para definição da quantidade de água que será absorvida pelo agregado, a partir da mistura de concreto. Quanto mais seco, poroso, de menor dimensão for o agregado e quanto maior a fluidez da pasta, ou argamassa, maior será a quantidade de água absorvida. No entanto, se o agregado seco ao ar é primeiramente misturado somente à água, ocorre maior absorção de água pelo agregado antes da mistura do concreto e a probabilidade do agregado absorver água da mistura é muito menor pois as partículas já estarão quase saturadas, podendo inclusive ocorrer o fenômeno inverso, ou seja, o agregado devolver parte da água absorvida para a mistura.

MACHADO Jr. e AGNESINI (2000) consideram que a alta absorção dos agregados reciclados promovem um efeito de "cura úmida interna", sendo esta uma propriedade inerente aos agregados leves de alto poder de absorção como, por exemplo, a argila expandida (NEVILLE, 1995).

Vários autores admitem a elevada taxa de absorção dos agregados reciclados e afirmam que isto se deve à camada de argamassa antiga aderida às partículas no caso do agregado reciclado de concreto (HANSEN, 1992; BARRA, 1996; LEVY, 1997; ZORDAN, 1997; BAZUCO, 1999, BANTHIA e CHAN, 2000; LIMBACHIYA et al., 1998). LEVY(1997) também afirma que quanto maior a quantidade de materiais cerâmicos existente na composição dos agregados reciclados, ainda maior será a absorção de água.

A Building Contractors Society in Japan (B.C.S.J.), citado por HANSEN (1992), encontrou valores de absorção da ordem de 3,6 a 8 % para os agregados reciclados graúdos e de 8,3 a 12,1 %

para os reciclados miúdos, ambos originários de concreto. Em estudo realizado por HANSEN e NARUD (1983), foram encontradas taxas de absorção de 8,7 % para agregados entre 4 e 8 mm e de até 3,7 % para agregados entre 16 e 32 mm.

Taxas de absorção média de 12,2 % para agregado miúdo e 5,8 % para agregados graúdos reciclados foram encontrados por QUEBAUD (1996). Agregados reciclados obtidos a partir de concretos e argamassas com relação a/c variando de 0,4 a 1,2 apresentaram taxas de absorção muito próximas. Para os agregados reciclados de concreto os valores variaram de 6 a 7 %, enquanto para os agregados reciclados de argamassa as taxas de absorção ficaram entre 15 e 17 %.

No estudo realizado por RASHWAN e ABOURIZK (1997), citado em 3.1.1, concluiu-se que o tempo de endurecimento do concreto exerceu pouca ou nenhuma influência sobre taxa de absorção do agregado miúdo reciclado, deixando-a um pouco maior que 2 %, o que é comparável à taxa de absorção do agregado miúdo natural. Porém, este parâmetro aumentou a taxa de absorção do agregado graúdo reciclado a valores maiores que 4 % e isso indica uma maior incidência de ar aprisionado no material reciclado, quando comparado com os agregados naturais. Então, quanto maior o período de endurecimento do concreto maior é a taxa de absorção. Os pesquisadores atribuíram tal fato à perda do teor de umidade para a hidratação do cimento e formação de gel. Foi observado ainda neste estudo que o tempo de estocagem dos agregados britados não exerceu influência significativa no teor de água dos agregados. Entretanto, a taxa de absorção dos agregados cresceu com o tempo de estocagem para valores em torno de 6 % para o agregado miúdo e 8 % para o agregado graúdo. Eles atribuem este fato à grande influência que a britagem exerce no processo de hidratação do cimento que reduz o teor de água dos agregados e a quantidade de poros.

Contudo, quando se analisa o agregado reciclado de concreto parece satisfatório afirmar que quanto mais endurecido estiver o concreto, menos poroso ele estará e portanto menor quantidade de água será absorvida, diferente da constatação feita acima pelos autores. E também, que o teor de umidade do agregado reciclado parece estar mais ligado às condições de temperatura e umidade do ambiente a que estes estão expostos, do que ao seu tempo de estocagem. Os resultados encontrados pelos pesquisadores ainda divergem dos resultados comumente encontrados na bibliografia sobre o assunto, que apontam maior taxa de absorção de água dos agregados miúdos em relação às taxas de absorção apresentadas pelos agregados graúdos reciclados. De acordo com BARRA (1996), a densidade, a porosidade, o teor de água e a absorção são propriedades que dependem da quantidade de poros e da rede de interconexão entre eles.

Quando se pensa em agregados reciclados de alvenaria, mais notadamente de material cerâmico, a absorção de água será tanto maior, quanto maior for a porosidade do material cerâmico. Taxas de absorção que variam de 22 a 25 % da massa do material seco foram encontradas em levantamento bibliográfico realizado por SCHULZ e HENDRICKS (1992). O CUR/VB, citado por SCHULZ e HENDRICKS (1992), apresenta os resultados de testes em tijolos britados que apontam a saturação completa deste material após 30 minutos, e que depois de 24 horas de imersão o percentual não varia mais que 2 pontos.

DEVENNY e KHALAF (1999) encontraram valores de taxa de absorção de agregados de tijolos cerâmicos britados variando 5 a 15 % em relação a massa do material seco. Em seu estudo, os pesquisadores avaliaram quatro tipos de tijolos diferentes em relação à resistência à compressão. Também se concluiu que seria necessário compensar a absorção de água do material submergindo o mesmo por um período de 30 minutos antes da execução da mistura de concreto. Tal decisão foi tomada mediante a análise de testes prévios que definiram que a diferença de absorção do material dos 30 minutos até as 24 horas era de apenas 2 %.

A caracterização de agregados graúdos reciclados de blocos cerâmicos de alta resistência realizada por MANSUR et al (1999) apontou que este material apresenta taxa de absorção de cerca de 6,10 % em relação à massa do material seco. Este valor é cerca de 10 vezes maior que a taxa de absorção de agregados graúdos de origem granítica utilizado em seu estudo. Os autores salientam que esta alta capacidade de absorção dos agregados reciclados pode resultar num grande potencial de movimentação de água dentro de misturas de concreto. Esta característica pode influenciar tanto as propriedades mecânicas dos concretos produzidos, quanto a durabilidade.

Em trabalho realizado por TOPÇU e GÜNÇAN (1995) foi medida a taxa de absorção em 30 minutos dos agregados graúdos reciclados, que alcançou o índice de 7 %.

No estudo realizado por BAZUCO (1999) com agregados reciclados de concreto, a taxa de absorção média, medida em 24 horas, foi de 8,45 % e foi também observado que quase toda água é absorvida até os primeiros 30 minutos do contato do material com a água.

BARRA (1996) encontrou valores de taxa de absorção para agregados reciclados que estão apresentados na Tabela 22. Observa-se que quanto menor o diâmetro do agregado e maior a porosidade inerente do material, maior é a taxa de absorção obtida.

Tabela 22 Taxas de absorção de agregados reciclados em função do tipo de componente e da granulometria

Componente reciclado	Frações	Absorção ¹ (%)
Concreto	12 – 20 mm	6,85
	6 – 12 mm	7,49
Material cerâmico	12 – 20 mm	14,5
	6 – 12 mm	14,4

1 – Capacidade de absorção do material calculada em função da massa do material seco em estufa

Fonte: A partir de BARRA (1996)

DESSY et al. (1998) encontraram valores de taxa de absorção para os agregados reciclados que variam com a sua granulometria, como pode ser visto na Tabela 23. Os resultados comprovam a maior quantidade de pasta de cimento nas frações menores, como citado no item 3.1.3.

Tabela 23 Taxas de absorção de agregados reciclados de concreto em função da sua granulometria

Frações	Absorção (%)
0 – 4 mm	8,15
4 – 7 mm	5,43
4 – 16 mm	4,68

Fonte: A partir de DESSY et al. (1998)

De acordo com TAVAKOLI e SOROUSHAN (1996a), a taxa de absorção dos agregados reciclados pode fornecer indicativos sobre a quantidade de argamassa antiga aderida às partículas de agregado reciclado de concreto.

Em seu estudo com agregados graúdos reciclados, MACHADO Jr. et al. (2000) encontraram taxas de absorção de 7,9 e 9,0 % para agregados reciclados com dimensão máxima característica de 19,0 e 9,5 mm, respectivamente. Quanto menor a dimensão do agregado maior é absorção do material, como era de se esperar.

I&T, citado por LIMA (1999), concluiu em estudo realizado em várias amostras de agregado reciclado, inclusive com diferentes composições, que após 5 minutos de imersão em água as amostras atingiram pelo menos 95 % da absorção máxima. Deste modo, 5 minutos foi considerado tempo de saturação suficiente para efetuar a pré-umidificação dos agregados.

MAULTZSCH e MELLMANN (1998) avaliaram a taxa de absorção de agregados reciclados de resíduo de construção e demolição com diversas granulometrias e encontraram valores que variaram de 4 a 10 %. Os autores concluíram ainda que após 10 minutos de imersão em água os agregados absorvem de 70 a 95 % do total de água absorvido.

KNIGHTS (1998) concluiu em seu estudo com agregado reciclado que nem toda água necessária era absorvida durante a pré-umidificação dos agregados antes das misturas de concreto. Deste modo o autor sugere que apenas a absorção do agregado reciclado relativa a 10 minutos de imersão em água é que deve ser compensada no teor de água total colocado nas misturas de concreto reciclado, ao invés da taxa de absorção relativa as 24 horas de ensaio, isto porque este foi considerado tempo suficiente para apenas reduzir a alta absorção dos agregados reciclados.

VAN DER WEGEN e HAVERKORT (1998) realizaram um estudo utilizando agregado miúdo reciclado de diferentes origens, avaliando a influência da realização de uma lavagem prévia dos grãos. A adoção do processo de lavagem dos agregados britados fez a absorção destes materiais reduzir de cerca de 13 % para 6 % para os agregados não lavados e lavados, respectivamente, enquanto a massa específica aumentou.

HANSEN e NARUD (1983) mencionam que manter uniformidade na produção de concretos com agregados reciclados é difícil, pois o agregado reciclado possui taxas de absorção sempre maiores que as apresentadas pelos agregados naturais. Na prática, estes problemas são ainda mais difíceis de solucionar, pois a taxa de absorção, ou teor de água existente nos agregados, pode variar durante a produção do concreto.

A absorção de água dos agregados reciclados é muito importante quando se estuda o seu uso em concretos, pois esta taxa interfere diretamente na relação *a/c* final das misturas. Além disso, se a absorção não for considerada, além da redução da relação *a/c*, haverá uma diminuição substancial da trabalhabilidade do material, deixando o concreto muito seco.

Fazendo uma análise simplista, quando se produz concretos com agregados reciclados existe a necessidade de acrescentar mais água à mistura, comparando com um mesmo traço feito com agregado natural. A depender da quantidade de água a mais a ser incorporada na mistura, haverá um aumento da relação *a/c* e conseqüente redução da resistência mecânica. Assim, para manter a resistência haverá a necessidade do aumento do consumo de cimento, o que aumenta o custo do concreto produzido. Compensar apenas parcialmente a taxa de absorção dos agregados reciclados é uma boa alternativa para minimizar os problemas com a trabalhabilidade das misturas e ao mesmo tempo para que não haja excesso de água no concreto com conseqüente redução da resistência mecânica.

3.1.5 Desgaste por abrasão do agregado

O ensaio de perda por abrasão dos agregados oferece um indicativo da qualidade do material a ser utilizado na produção do concreto. Com o mesmo se determina a resistência à fragmentação por choque e atrito das partículas de agregado graúdo.

Os agregados reciclados apresentam menor resistência ao impacto e menor resistência ao desgaste por abrasão que os agregados naturais. No caso dos agregados reciclados de concreto, tal fato se deve à argamassa aderida e sua fraca ligação com as partículas de agregado (BAIRAGI, et al., citado por BAZUCO, 1999). HANSEN (1992) aponta que o tipo de concreto que deu origem ao agregado tem uma íntima relação com os valores de abrasão obtidos nos ensaios. Ou seja, quanto mais resistente for o concreto original, menor relação água/cimento, menor será o valor de perda por abrasão.

HANSEN e NARUD (1983) relatam valores de perda por abrasão Los Angeles para agregados reciclados 20 a 50 % maiores que para os agregados naturais. BARRA (1996), em seu estudo, mensurou esta propriedade em agregados graúdos reciclados de concreto e de material cerâmico separadamente e encontrou valores entre 20 e 30 % de perda por abrasão.

Em seu estudo com agregados reciclados de concreto, BAZUCO (1999) encontrou valores de perda por abrasão do agregado reciclado seco de 44,5 % e para o agregado reciclado saturado de 42,7%. O desgaste do agregado reciclado foi 60 % superior ao desgaste apresentado pelo agregado natural.

QUEBAUD (1996) encontrou valores de perda por abrasão de agregados reciclados de concretos produzidos em uma usina de beneficiamento na França da ordem de 31,8 %. Este valor é inferior aos 40 %, que é o limite máximo de perda por abrasão permitido pela norma francesa NF P 18-573.

A Norma Brasileira NBR 6485 (1984) considera inadequado para uso em concretos os agregados que apresentam índices de perda por abrasão superiores a 50 % em massa. Neste caso, a grande maioria dos resultados encontrados na bibliografia para os agregados reciclados testados estariam satisfazendo as prescrições desta norma.

3.1.6 Teor de matéria orgânica e materiais pulverulentos

O *húmus* é o principal constituinte da matéria orgânica que pode estar presente nos agregados e sua existência é muito mais prejudicial no agregado miúdo que no graúdo, no qual pode ser retirada com maior facilidade, além do mesmo possuir uma superfície específica inferior (COUTINHO, 1997a).

A resistência mecânica dos concretos sofre grande influência da granulometria, tensão de ruptura e da resistência de ligação entre a pasta e a superfície do agregado utilizado na sua composição (COUTINHO, 1997a). A presença de matéria orgânica pode acarretar aumento do tempo de início de pega e, ainda, diminuição da resistência inicial do concreto que se deve à formação de bolhas de ar internas na mistura. Os ácidos orgânicos formados pela existência de matéria orgânica combinam-se com hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento, diminuindo o pH da solução de contato com estes compostos, ou da sua adsorção pelas partículas de cimento, retardando e impedindo a sua posterior hidratação. Além disso pode ocorrer instabilidade dimensional dos concretos submetidos a ciclos de gelo-degelo devido à presença deste tipo de impureza (DESSY et al., 1998).

O teor de finos nas misturas de concreto podem influenciar bastante na quantidade de água de amassamento necessária, o que pode provocar diminuição da resistência mecânica do concreto produzido. Além disso, estas partículas podem reduzir a resistência ao desgaste do concreto, principalmente por abrasão (COUTINHO, 1997a).

Exceto pelas considerações existentes apresentadas no item 2.5.3a, nenhum resultado efetivo da influência destes materiais nas propriedades do concreto reciclado foi encontrada na bibliografia disponível sobre agregados reciclados.

3.2 CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO

3.2.1 Aspectos relativos à dosagem de concretos com agregados reciclados

Para utilização de material reciclado como agregado para concreto devem ser realizadas misturas experimentais do mesmo modo que estas misturas são feitas para concretos convencionais. Deve ser estabelecida a quantidade de água suficiente para garantir a trabalhabilidade da mistura, porém, desde que não haja excesso de água, fato que comprometeria o uso racional de cimento para alcançar a resistência desejada a um custo compatível.

Segundo BARRA (1996), existe a necessidade de se utilizar um sistema de dosagem para produção de concretos com agregados reciclados que permita evidenciar a influência das propriedades

do agregado reciclado sobre as propriedades do novo concreto, visto que o material reciclado apresenta uma variedade de características muito distintas em relação ao material convencionalmente utilizado nos concretos. BANTHIA e CHAN (2000) também concordam que pequenos ajustes na dosagem dos concretos reciclados podem ser realizados a fim de obter propriedades desejáveis para o concreto produzido.

Segundo DEVENNY e KHALAF (1999), o mesmo tipo de dosagem utilizado para o concreto convencional pode ser usado para o concreto com agregado reciclado de tijolos cerâmicos. Os autores apenas salientam a necessidade de se realizar uma pré-umidificação do agregado reciclado para compensar a alta taxa absorção de água apresentada por este material.

De acordo com FORSTER (1986), a situação ideal é aquela que prevê a utilização tanto da fração graúda do agregado reciclado, quanto da fração miúda. Todavia, o autor aponta que a substituição de apenas 15 a 30 % do material fino reciclado por agregado miúdo natural pode melhorar a trabalhabilidade e o acabamento da mistura de concreto.

Alguns pesquisadores japoneses, citados por HANSEN (1992), e PIETERSEN e FRAAY (1998) concordam que se até 30 % dos agregados naturais fossem substituídos por agregados reciclados não haveriam mudanças significativas nas propriedades dos concretos quando comparados a concretos convencionais. Porém, vale a pena mencionar que VRIES, citado por BAZUCO (1999), afirma que um baixo teor de substituição de agregados naturais por agregados reciclados não é suficiente do ponto de vista ambiental.

A trabalhabilidade do concreto é uma das propriedades mais afetadas pelo uso de agregados reciclados devido, principalmente, a sua forma mais irregular e textura muito mais áspera e sua alta taxa de absorção. A menor trabalhabilidade leva à necessidade do aumento da quantidade de água das misturas para promover uma melhoria nesta propriedade. Entretanto, esta prática pode agravar outras propriedades do concreto no estado endurecido. Como é mais difícil alterar a forma e textura dos grãos, devem ser tomadas medidas para diminuir a absorção de água do material, ou pelo menos compensá-la diminuindo o seu efeito danoso sobre as propriedades do concreto no estado fresco.

Assim, para produção de concretos com qualquer tipo de agregado reciclado é interessante que sejam tomadas medidas como a pré-umidificação dos agregados reciclados e a utilização de aditivos superplastificantes que permitem a redução do transporte interno de água da pasta de cimento para o agregado seco e poroso (QUEBAUD et al., 1999; PIETERSEN e FRAAY, 1998; HENDRIKS E PIETERSEN, 1998).

3.2.2 Propriedades do concreto reciclado

3.2.2.1 Massa específica

A massa específica do concreto reciclado fresco tende a ser menor que a do concreto convencional devido a menor massa específica apresentada pelo agregado reciclado e por uma quantidade maior de vazios incorporada ao concreto com este material. Esta influência do agregado reciclado sobre a massa específica do concreto acaba conferindo-lhe valores tais que o concreto produzido fica situado no limite entre o concreto leve e o convencional (LATTERZA e MACHADO Jr., 1999). Ou, segundo BAZUCO (1999), pode ser caracterizado como intermediário entre o concreto leve e o concreto convencional.

É importante relatar a diminuição gradual da massa específica do concreto reciclado à medida que o teor de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado aumenta. Da mesma forma, o teor de ar aumenta à medida que aumenta o teor de substituição, contribuindo, assim, para diminuição da massa específica (KIKUCHI et al., 1993).

LEVY (1997) afirma que pode haver uma redução de 5 a 10 % na massa específica do concreto reciclado em relação ao convencional, devido ao total de ar incorporado em concretos com material reciclado.

LATTERZA (1998), em seu estudo com misturas de concretos usando agregados reciclados com 19 e 9,5 mm de diâmetro máximo, encontrou reduções na massa específica dos concretos com 100 % de agregados graúdos reciclados, em relação aos concretos convencionais, de 9 % e 4 %, respectivamente.

Concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de tijolos cerâmicos britados forneceram valores de massa específica 13 a 15 % menores quando comparados aos concretos de referência (DEVENNY e KHALAF, 1999). Os autores concluíram também que um aumento na densidade dos concretos leva ao aumento da resistência à compressão, ou seja, foi encontrada uma interação entre as duas propriedades.

Além disso, é importante lembrar que a composição dos resíduos também influencia no valor da massa específica. Quanto mais densos os materiais que compõem o resíduo, maior será a massa específica do concreto reciclado.

3.2.2.2 Trabalhabilidade

Dentre as propriedades do concreto no estado fresco, a trabalhabilidade pode ser considerada como uma das mais importantes, uma vez que a mesma exerce grande influência sobre as propriedades do concreto no estado endurecido.

Neste item, além de apresentar resultados e conclusões sobre a trabalhabilidade de concretos com agregados reciclados encontrados na bibliografia, serão discutidos, também, alguns aspectos relacionados com a trabalhabilidade dos concretos de uma forma geral e de dois dos métodos mais utilizados para avaliação da trabalhabilidade. Essa abordagem se faz necessária uma vez que há uma grande preocupação com a trabalhabilidade dos concretos reciclados e a melhor forma para realizar sua determinação.

3.2.2.2.1 *Trabalhabilidade dos concretos reciclados*

Há uma unanimidade em afirmar que concretos com agregados reciclados apresentam menor índice de consistência que as misturas executadas com agregados naturais de mesmo traço. Tal afirmação se justifica na maior porosidade apresentada pelo material reciclado, fato que acaba aumentando a absorção de água do mesmo, e diminuindo a quantidade de água livre das misturas (LEVY, 1997; TOPÇU e GÜNÇAN, 1995; HENDRIKS E PIETERSEN, 1998). VRIES, citado por BAZUCO(1999), aponta também a forma mais angular dos agregados reciclados como fator da diminuição da trabalhabilidade dos concretos produzidos com este material.

A utilização de agregados miúdos reciclados parece reduzir ainda mais a trabalhabilidade do concreto. Quando somente agregado graúdo de concreto é usado existe apenas uma pequena diferença na trabalhabilidade do concreto reciclado e do concreto convencional (HANSEN, 1992).

Segundo SCHULZ e HENDRICKS (1992), concretos de alvenaria britada podem ser produzidos com todo tipo de consistência, desde os muito rijos até os mais plásticos, desde que os tijolos ou blocos provenientes da alvenaria apresentem maior densidade, ou seja, tenham menor porosidade, e por consequência uma taxa de absorção de água um pouco menor. Os autores relatam ainda trabalhos nos quais alguns concretos usando agregado graúdo de material cerâmico e agregado miúdo de resíduo misto apresentaram maior trabalhabilidade que as mesmas misturas feitas com agregados miúdos naturais (CHARISIUS et al., citado por SCHULZ e HENDRICKS, 1992). Porém, o que se pode notar é que quando se utiliza materiais cerâmicos na composição do resíduo de

construção e demolição, a trabalhabilidade é ainda mais reduzida, diferente do que afirmam os autores acima.

A alta taxa de absorção de água dos agregados reciclados é fator preponderante para heterogeneidade dos valores de índice de abatimento medidos nos concretos reciclados (QUEBAUD e BUYLE-BODIN, 1999). Entretanto, os autores afirmam que a pré-umidificação dos agregados reciclados antes da mistura para produção do concreto se apresenta como boa alternativa para limitação deste problema. Além disso, pode-se lançar mão do uso de aditivos plastificantes, ou superplastificantes. Todavia, o uso de tais produtos incidirá diretamente no custo final do concreto produzido e este fato pode reduzir qualquer vantagem econômica oferecida pelo concreto reciclado.

Entretanto, RASHWAN e ABOURIZK (1997) afirmam que a trabalhabilidade de concretos com agregados reciclados não depende principalmente da quantidade de água existente na mistura como é o caso do concreto convencional, mas sim da forma e da textura do agregado reciclado utilizado. Estas duas propriedades proporcionam, principalmente, um maior travamento das misturas de concreto, dificultando a mobilidade das partículas que necessitarão de maior quantidade de pasta para vencer esta barreira.

HANSEN e NARUD (1983) compararam concretos produzidos com agregados reciclados de concreto com concretos convencionais e concluíram que os primeiros necessitam de 5 % a mais de água livre para atingir os mesmos índices de consistência dos últimos. Além disso, observaram também que existe maior coesão entre as partículas de agregados reciclados e que a perda de abatimento dos concretos reciclados é mais rápida que dos concretos com agregados naturais. A forma das partículas mais angular e com superfície mais áspera apresentada pelo agregado reciclado é um dos motivos da necessidade de maior quantidade de água livre nas misturas dos concretos. A maior coesão deriva do atrito entre a superfície áspera do agregado reciclado e da geração de finos observada durante a mistura dos concretos, devido a menor resistência do material. A perda de abatimento mais rápida observada nos concretos reciclados se deve em parte à contínua absorção de água pelo agregado, mesmo depois da mistura terminada.

RANVIDRARAJAH et al. (1987) realizaram estudos da trabalhabilidade em três misturas diferentes de concretos: uma com agregado miúdo e graúdo natural, a segunda com agregado graúdo reciclado e miúdo natural e a terceira com agregado miúdo e graúdo reciclado e relação a/c constante de 0,57. O índice de consistência inicial medido pelo abatimento do tronco de cone foi similar para todas as misturas. Entretanto, a medida da perda de trabalhabilidade apontou índices mais rápidos de

perda para os concretos com agregados reciclados, devido a maior absorção característica deste material e também a maior presença de álcalis.

Em seu estudo com agregados reciclados de blocos cerâmicos para produção de concreto, MANSUR et al. (1999) avaliaram 4 traços de concreto, com substituição total do agregado graúdo natural pelo reciclado, em que as relações a/c foram 0,3; 0,4; 0,5 e 0,6. Foram realizadas também as respectivas misturas de referência com agregado de origem granítica. Para produção do concreto os agregados foram submersos em água por 24 horas e utilizados na condição saturada superfície seca. A trabalhabilidade das misturas medida através do abatimento do tronco de cone está apresentada na Tabela 24.

Tabela 24 Trabalhabilidade das misturas de concreto medidas pelo abatimento do tronco de cone

Abatimento (mm)				
Tipo de concreto	Relação a/c			
	0,3	0,4	0,5	0,6
Referência	116	107	91	34
Reciclado	95	82	51	22

Fonte: MANSUR et al. (1999)

Observa-se através dos resultados apresentados na Tabela 24 que apesar da absorção dos agregados reciclados de material cerâmico ter sido compensada, os concretos reciclados ainda apresentaram menor trabalhabilidade que os concretos de referência. Neste caso o efeito da textura rugosa e forma angulosa dos agregados reciclados é que devem ter exercido influência preponderante sobre a trabalhabilidade, uma vez que estas características têm a capacidade de provocar maior travamento, diminuindo a mobilidade entre as partículas das misturas de concreto.

MORALES et al. (2000) produziram misturas de concreto reciclado com agregados graúdos de concreto e agregados miúdos de concreto e de alvenaria, separadamente, e observaram que para produção dos concretos é necessário compensar a alta taxa de absorção do material. Como se trata de grande quantidade de água, a avaliação da consistência das misturas acabava prejudicada pois a absorção dos agregados reciclados variava com o tempo de contato do material com água. Os autores utilizaram o método de dosagem do IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1994) e concluíram que a maior dificuldade neste caso é determinar consistências padrão, o que torna este um parâmetro muito instável.

De acordo com DE PAUW et al. (1998), os agregados reciclados ou os agregados leves possuem como característica marcante a alta porosidade, o que faz com que estes materiais guardem

significativas quantidades de água no seu interior retiradas durante a mistura de concreto. Neste caso os autores sugerem que a água presente no concreto está dividida em:

$$A_{\text{tot}} = A_{\text{agr}} + A_{\text{abs}} + A_{\text{livre}}$$

$$A_{\text{add}} = A_{\text{abs}} + A_{\text{livre}}$$

A_{tot} = água total da mistura de concreto

A_{agr} = água inicial presente no agregado

A_{add} = água adicionada durante a mistura do concreto

A_{abs} = água absorvida pelo agregado durante a mistura do concreto

A_{livre} = água disponível na pasta de cimento durante a mistura do concreto

DE PAUW et al. (1998) relatam que a água inicial presente no agregado tem grande influência sobre a trabalhabilidade dos concretos. A quantidade de água que seria absorvida pelo agregado (A_{abs}) da quantidade de água adicionada à mistura de concreto (A_{add}) foi determinada como a diferença entre a água de absorção do agregado, determinada experimentalmente depois de 24 horas de imersão do material em água, e o teor de água do material seco ao ar (A_{agr}). Para realizar a mistura de concreto foi adicionada, então, esta água absorvida (A_{abs}) mais a água livre necessária (A_{livre}). Após a mistura na betoneira esperou-se por um tempo de cerca de 30 minutos para que o agregado poroso absorvesse água e somente após este período foi feita a medida de trabalhabilidade. Os resultados de trabalhabilidade dos concretos reciclados utilizando este processo excederam em muito a faixa de trabalhabilidade prevista para o desenvolvimento deste trabalho. Baseado neste fato os autores concluíram que a absorção dos agregados porosos dentro das misturas de concreto no estado fresco é mais lenta, ou menor que quando o material encontra-se imerso em água pura. Devido a estas incertezas concluiu-se, ainda, que é impossível determinar com precisão as quantidades de água livre e água absorvida das misturas de concreto reciclado. Uma análise da microestrutura de uma amostra retirada de uma das misturas realizadas com agregado reciclado evidenciaram a presença de grande quantidade de pasta de cimento na interface do agregado, segundo os autores, isso pode explicar a menor absorção dos agregados dentro das misturas frescas de concreto. A pasta de cimento em contato com o agregado funciona como uma película impermeável que não permite que o agregado continue absorvendo água da mistura. Este é mais um motivo para que não seja compensada toda a taxa de absorção dos agregados reciclados.

LIMBACHIYA et al. (1998) e DESAI (1998) concluíram em seu estudo com agregados reciclados de concreto que quanto maior o teor de substituição do agregado natural pelo reciclado as misturas apresentaram maiores reduções de abatimento, ficando mais secas e menos coesivas. Todavia, os autores apontam que estes problemas podem ser superados adicionando-se filer às misturas, como por exemplo as cinzas volantes.

De acordo com DILLMANN (1998), o grau de compactação dos concretos com agregados reciclados no estado fresco é comparável ao do mesmo concreto de referência utilizado no desenvolvimento da sua pesquisa. O autor avaliou, também, a perda de trabalhabilidade e concluiu que os resultados obtidos para os concretos reciclados são semelhantes aos do concreto de referência. É importante salientar que para as misturas realizadas nesta pesquisa, os agregados reciclados tiveram suas taxas de absorção compensadas em relação ao teor de água absorvido durante 30 minutos.

SAGOE-CRENTSIL e BROWN (1998) apontam que a partir de estudos realizados na Austrália concluiu-se que a pré-umidificação dos agregados reciclados ou a pré-mistura a seco dos materiais para produção do concreto podem auxiliar na melhoria da trabalhabilidade do concreto. Segundo estes autores, a água contida nos poros das partículas de agregado e a água livre correspondem ao teor de água total dos agregados e é esta água que influencia na trabalhabilidade, na retração por secagem e na resistência dos concretos produzidos. A trabalhabilidade dos concretos reciclados é muito sensível ao teor de água livre das misturas e à relação areia/agregado, somente um conhecimento amplo das propriedades dos agregados pode ajudar na produção de concretos reciclados com trabalhabilidade equivalente à dos concretos convencionais.

MACHADO Jr. et al. (2000) relatam que a simples substituição de agregados graúdos naturais por reciclados para produção de concretos, apenas com pequenos acréscimos de água deram origem a misturas moldáveis, todavia o seu abatimento foi nulo. Os autores resolveram então produzir misturas de concreto com teores de substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado de 50 e 100 %, além da mistura de referência, e avaliar a perda de abatimento dos concretos que tinham como parâmetro de produção o abatimento fixado em (70 ± 10) mm. O ensaio foi realizado até que se obtivesse um abatimento de (20 ± 10) mm. Foram utilizados agregados graúdos reciclados com dimensão máxima de 19,0 e 9,5 mm, com teores de substituição de 0, 50 e 100 %. Deste modo, foram produzidas 6 misturas, ou seja, duas famílias de concreto, uma para cada dimensão de agregado. Em ambos os casos os concretos com agregados reciclados apresentaram maior perda de abatimento que os concretos de referência. Além disso, os concretos reciclados tiveram o ensaio interrompido antes dos concretos de referência e este tempo foi mais rápido para os concretos com agregado graúdo com dimensão máxima de 19,0 mm. Este fato, dá um indicativo do tempo de saturação do agregado, ou seja, para as partículas menores ocorre uma saturação mais rápida e o agregado deixa de retirar água da mistura influenciando negativamente a perda de abatimento, pode ocorrer, inclusive, o transporte inverso de água com o tempo de mistura, ou seja, do agregado para a matriz.

Através dos resultados encontrados na bibliografia, observa-se que ainda não existe um parâmetro único para nortear a produção dos concretos com agregados reciclados, tão pouco, para medir a trabalhabilidade deste material de forma satisfatória. Deste modo, a trabalhabilidade do concreto reciclado merece um estudo mais cuidadoso e aprofundado com o intuito de dirimir estas incertezas.

3.2.2.2.2 Avaliação da trabalhabilidade dos concretos

COUTINHO (1997b) salienta que a noção de trabalhabilidade é bastante ampla utilizando-se de várias propriedades físicas para sua determinação e, deste modo, sua medição não pode ser realizada através de um só método. É possível afirmar, ainda, que nenhum dos métodos utilizados consegue medir a trabalhabilidade de forma direta. A maioria fornece uma medida indireta que não diz respeito à trabalhabilidade na sua definição mais abrangente³, mensurando apenas uma das propriedades físicas relacionadas com esta propriedade do concreto (COUTINHO, 1997b; DACZKO, 2000).

As propriedades físicas que influenciam na trabalhabilidade são o ângulo de atrito, a coesão, a viscosidade – que interferem na maior ou menor mobilidade da massa; a massa *volúmica* – que interfere na compactação; a segregação e a exsudação – que interferem na estabilidade da mistura que constitui o concreto fresco (RITCHIE, citado por COUTINHO, 1997b).

Por outro lado, estas propriedades físicas dos concretos são governadas por características físicas e químicas dos materiais que dão origem às misturas. Dentre as características físicas estão a quantidade total de agregados na mistura, a proporção entre o agregado miúdo e graúdo, a distribuição granulométrica e a forma dos agregados. Dentre as características químicas estão a reatividade do cimento e das adições por ventura utilizadas para produção dos concretos (AITCIN, 1998, RAMACHANDRAN et al., 1998).

A trabalhabilidade não é uma propriedade intrínseca do concreto, uma vez que ela está relacionada com a aplicação que se dará ao concreto e aos equipamentos a serem utilizados para sua mistura, transporte, lançamento e adensamento (CECCATO, 1998; MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Existem vários aspectos que podem ser considerados para a medida da trabalhabilidade dos concretos, no entanto, apenas o tempo de vibração para atingir uma determinada compacidade é que

³A maior ou menor facilidade com que o concreto é transportado, colocado, adensado e acabado e a maior ou menor facilidade com que se desagrega ou segrega durante estas operações é designada pelo termo genérico de **trabalhabilidade** (COUTINHO, 1997b, p. 18).

tem maior importância quando se fala nesta propriedade (COUTINHO, 1997b). Isto acontece porque uma das propriedades mais importantes do concreto endurecido é a resistência e é sabido que quanto maior a compactação alcançada com o adensamento do concreto, maior a resistência que pode ser obtida.

MEHTA e MONTEIRO (1994) apresentam os três métodos mais usados para avaliação da trabalhabilidade dos concretos. O primeiro, o método de abatimento do tronco de cone, o segundo, o ensaio VeBe, e o terceiro, o ensaio de fator de compactação.

O ensaio de abatimento do tronco de cone pode ser considerado como um índice qualitativo da estabilidade e da fluidez da mistura de concreto no estado fresco. Este ensaio, normalizado no Brasil pela NBR 7223 (1982), é um dos ensaios de maior aplicação para controle da uniformidade da produção de concretos em todo o mundo. Contudo, são observadas nele dispersões bastante elevadas, com valores que chegam a cerca de 70 % (DURIEZ, citado por COUTINHO, 1997b). Conforme MEHTA e MONTEIRO (1994), o ensaio de abatimento não é muito indicado para medir a consistência de misturas muito fluídas ou muito secas.

Para os concretos reciclados, utilizar apenas o abatimento do tronco de cone para medir a trabalhabilidade das misturas não é vantajoso, uma vez que este material apresenta-se muito mais seco que as misturas de concreto convencional.

De acordo com MEHTA e MONTEIRO (1994), o ensaio VeBe tem mais significado se aplicado para a medida de trabalhabilidade de misturas mais secas. Este ensaio mede o tempo necessário para remoldagem do concreto de uma forma tronco-cônica para a forma cilíndrica, avaliando a compactabilidade da mistura (JOHNSTON, citado por CECCATO, 1998). Seu uso permite a avaliação visual da exsudação e é um ensaio influenciado pela consistência do concreto.

Na bibliografia não existe nenhum relato de estudos de trabalhabilidade para os concretos reciclados utilizando o ensaio VeBe. Como há uma componente dinâmica neste ensaio, talvez ele traduzisse melhor a trabalhabilidade do concreto reciclado, dado as características do agregado.

A Figura 9, desenvolvida por CECCATO (1998), apresenta um esquema das características relacionadas com a trabalhabilidade e com os ensaios de abatimento do tronco de cone e de VeBe.

Como pode ser observado no esquema da Figura 9, enquanto o ensaio de abatimento do tronco de cone permite avaliar qualitativamente a consistência, a plasticidade e a estabilidade das

misturas de concreto, o ensaio VeBe leva em consideração a maior ou menor facilidade com que as misturas de concreto podem ser compactadas, ou seja, introduz na avaliação da trabalhabilidade um componente dinâmico.

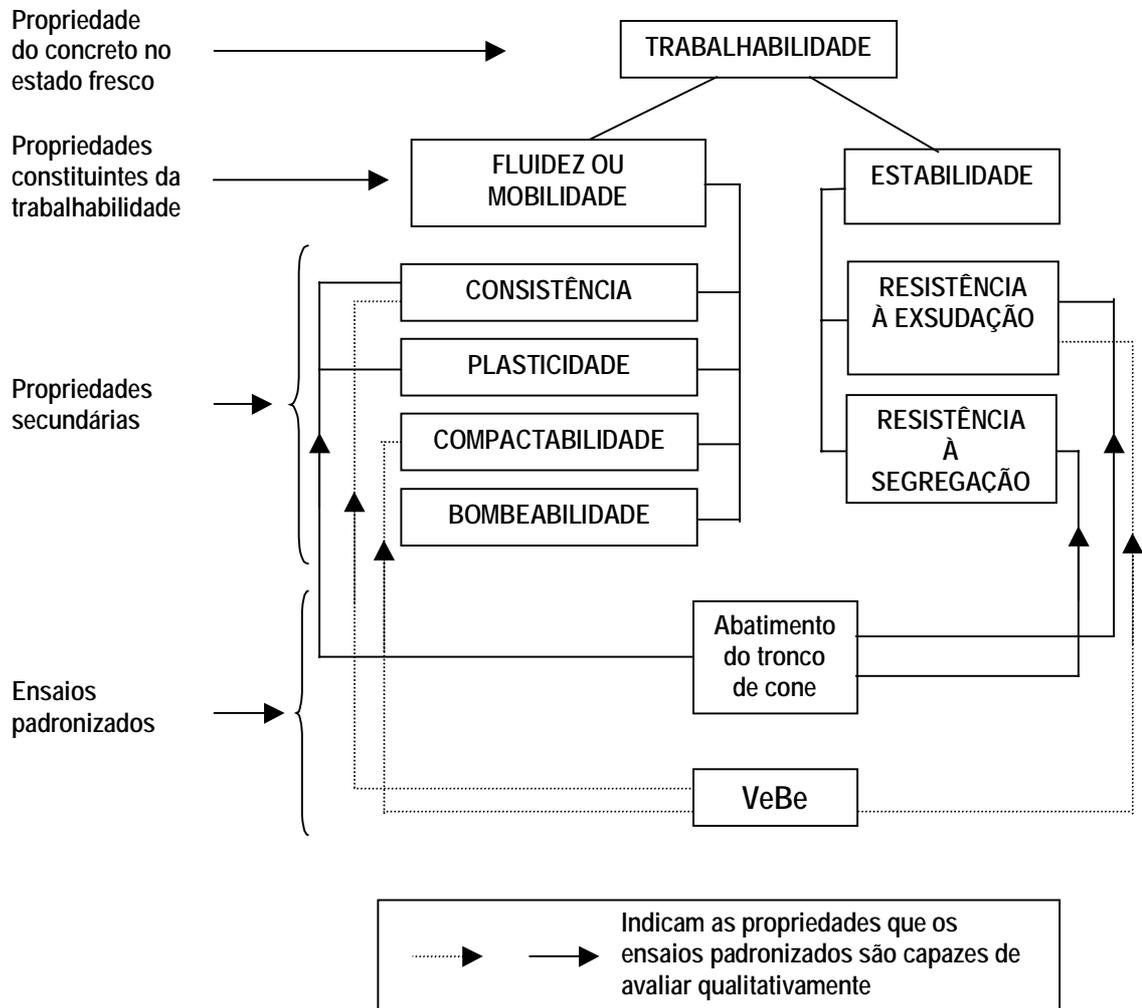


Figura 9 Resumo dos principais termos relativos à trabalhabilidade e dos ensaios empregados na sua caracterização (CECCATO, 1998)

3.2.2.3 Resistência à compressão

Todos os materiais dos quais o concreto é composto afetam diretamente a sua resistência e o seu desempenho final. Assim, os agregados também são extremamente importantes para análise criteriosa das propriedades do concreto. Qualquer variação dos materiais componentes do concreto merece um estudo sistemático e isso também se aplica ao agregado reciclado, principalmente quando se pensa que eles correspondem até 80 % de toda mistura.

De acordo com COUTINHO (1997a), a resistência do concreto só não é influenciada pela resistência do agregado graúdo quando seus valores são muito superiores aos valores de resistência

do concreto, como por exemplo valores de resistência das rochas maiores que 60 a 70 MPa. Caso contrário, a resistência dos agregados deve ser levada em consideração na análise dos fatores que influenciam a resistência final dos concretos.

Vários pesquisadores citados por HANSEN(1992) encontraram valores de resistência à compressão de concretos com agregados graúdos reciclados de 5 a 20 % mais baixos que os valores de resistência dos concretos de referência. No Japão, a taxa de redução das resistências de concretos reciclados oscila entre 14 e 32 % (TOPÇU, citado por BAZUCO, 1999).

CHARISIUS et al., citados por SCHULZ e HENDRICKS (1992), consideraram a atividade pozolânica de partículas de tijolos britados para explicar o aumento da resistência à compressão de concretos com agregado graúdo de tijolos maciços britados, produzidos com areia de resíduos de construção mistos, quando comparados aos resultados de resistência de misturas com areias naturais. Outro estudo apontou que misturas com agregado graúdo natural e areia de resíduos mistos alcançaram maiores resistências à compressão que as misturas contendo apenas tijolos britados (HEUSSNER, citado por SCHULZ e HENDRICKS, 1992).

Porém, vale a pena salientar que os bons resultados alcançados nos dois casos apontados anteriormente, talvez não tenham levado em consideração a alta taxa de absorção do agregado, que resultou numa diminuição da relação a/c , contribuindo para o aumento da resistência. Inclusive MACHADO Jr. et al. (1998) afirmam que a taxa de absorção do agregado reciclado pode diminuir o teor de água livre no concreto quando o mesmo é utilizado seco, e assim haverá aumento da resistência à compressão.

DOLARA et al. (1998) avaliaram a resistência à compressão de concretos com 50 e 100 % de substituição do agregado natural pelo reciclado e a influência do tipo de cura realizado sobre os resultados obtidos. Concluíram que a cura úmida dos concretos leva a um aumento de 10 % nos resultados de resistência comparados aos concretos curados ao ar.

A utilização de agregado miúdo reciclado parece afetar ainda mais a resistência à compressão. Concretos elaborados com agregado graúdo e miúdo reciclado apresentaram uma redução nas taxas de resistência de até 20 %, quando comparados às mesmas misturas utilizando apenas agregado graúdo reciclado e agregado miúdo natural (WAINWRIGHT et al., 1993).

Segundo BAZUCO(1999), poucos pesquisadores fazem referência ao desenvolvimento da resistência à compressão com a idade de cura. Algumas pesquisas levantadas por HANSEN(1992)

apontam um desenvolvimento de resistências similar ao dos concretos convencionais. O mesmo autor encontrou dados de desenvolvimento de resistências cerca de 15 a 30 % inferior em concretos com agregado graúdo reciclado de concreto.

Quando se analisa a resistência à compressão, fatores como as propriedades dos agregados reciclados utilizados, o teor de substituição e os níveis de resistência em que se está trabalhando devem ser levados em consideração. Para níveis inferiores de resistência, as diferenças tendem a ser menores (BAZUCO, 1999).

ZORDAN (1997), em seu estudo, chegou a valores de resistência do concreto reciclado até 50 % inferior à resistência do concreto de referência. Entretanto, o autor comparou concretos nos quais foi estabelecido como parâmetro de dosagem o índice de abatimento do concreto, ou seja, as relações água/cimento das misturas e os consumos de cimento eram variáveis.

TOPÇU e GÜNÇAN (1995) substituíram teores de 0, 30, 50, 70 e 100 % de agregados naturais por reciclados de concreto para produção de novos concretos e encontraram reduções nos valores de resistência dos concretos da ordem de 80 %. Tanto menor era a resistência do concreto reciclado, quanto maior o teor de substituição do agregado. LIMBACHIYA et al. (1998) também concluíram em seu estudo com agregados reciclados de concreto que quanto maior o teor de agregado reciclado utilizado menores eram as resistências alcançadas pelas misturas.

Quando se deseja obter concretos com resistência à compressão superior àquela do concreto que deu origem ao agregado reciclado, a fraca aderência entre a argamassa antiga e o agregado original pode levar à redução da resistência à compressão do concreto reciclado quando comparado ao concreto de referência com mesma relação água/cimento. Entretanto, quando a resistência do concreto de origem do agregado reciclado é maior que a do novo concreto de referência, o desempenho mecânico do concreto reciclado é melhor (TAVAKOLI e SOROUSHIAN, 1996b). Estes pesquisadores concluíram ainda que um aumento na perda por abrasão Los Angeles e taxa de absorção dos agregados reciclados podem levar a uma redução da resistência do concreto reciclado. Contrariando as conclusões alcançadas por TAVAKOLI e SOROUSHIAN (1996), KIKUCHI et al. (1998) afirmam que de forma geral é possível produzir concretos reciclados que tenham maior resistência que o concreto que deu origem aos agregados. Talvez os diferentes resultados apresentados nestas pesquisas sejam provenientes da falta de padronização na execução dos concretos, o que dificulta a comparação de resultados.

DELWAR et al. (1997) realizaram um estudo em concretos produzidos com agregados reciclados de pavimentos asfálticos com diferentes teores de substituição do agregado graúdo e miúdo, duas relações água/cimento, e 7 e 28 dias como idades de referência. Os pesquisadores concluíram que, para as duas idades avaliadas, quanto maior o teor de substituição dos agregados, menores eram os valores de resistência à compressão.

DEVENNY e KHALAF (1999) realizaram um estudo utilizando 4 tipos diferentes de tijolos cerâmicos para a produção de concreto. Os tijolos tinham como variável a resistência à compressão. Foram realizados dois tipos de mistura, a primeira com relação água/cimento de 0,55 e a segunda com relação água/cimento de 0,40. Os resultados mostraram que a resistência à compressão crescia à medida que crescia a resistência à compressão do espécime de tijolo usado em qualquer das duas misturas. Os autores também concluíram que é possível produzir concretos com resistências de até 67 MPa para relação a/c 0,40, utilizando-se tijolos cerâmicos britados como agregado graúdo. O tipo de ruptura encontrada levou-os a concluir que existe uma boa aderência entre a pasta do concreto e o agregado, visto que a ruptura também acontecia no agregado, ao invés de ocorrer na interface pasta/agregado como é mais comum no concreto convencional. Tal fato foi explicado através da maior angulosidade apresentada pelo material reciclado que, segundo os autores, significa que o mesmo possui maior área de superfície de contato que o agregado natural para que haja a aderência da pasta com o agregado.

KASAI e FUJII (1989) relatam que a resistência à compressão de concretos com agregados reciclados de concreto depende da relação água/cimento e da resistência do concreto original.

Os agregados reciclados apresentam grande porosidade e alto teor de absorção, características que podem propiciar uma boa aderência à matriz do concreto e um ganho de resistência entre as primeiras idades e os 28 dias (MACHADO Jr. e AGNESINI, 1999). Os autores sugerem também que exista um efeito de cura interna do concreto, sendo esta uma propriedade inerente dos agregados leves que possuem alto teor de absorção.

SALEM e BURDETTE (1998) realizaram estudos comparativos em concretos com agregado graúdo reciclado e miúdo natural e concretos com ambas frações naturais e concluíram que a resistência à compressão dos concretos com agregado graúdo reciclado era maior que a do concreto convencional. Os autores atribuíram o melhor comportamento do concreto reciclado à forma mais angular e à textura mais áspera do material reciclado que proporciona melhor aderência e maior travamento entre a pasta de cimento e o agregado se comparado ao agregado natural. Além disso,

outra causa apontada para o melhor desempenho do concreto reciclado foi a maior absorção de água apresentada pelo agregado reciclado, que pode ter ocasionado diminuição da relação a/c do concreto.

Em seu trabalho, RANVIDRARAJAH et al. (1987) prepararam misturas de concreto com agregados naturais e agregados reciclados para 5 relações a/c que variaram de 0,3 a 0,7 e mediram a resistência à compressão de cada mistura. Os autores encontraram uma redução de até 10 % dos resultados para os concretos com agregados reciclados e observaram também que o uso de agregado reciclado miúdo combinado ao agregado graúdo reciclado foi mais prejudicial à resistência do concreto que o uso de agregado graúdo reciclado e miúdo natural.

DESSY et al. (1998) produziram concretos com uma mistura que substituiu 100 % dos agregados naturais por agregados reciclados, uma mistura que substituiu apenas o agregado graúdo natural por reciclado e uma mistura de referência sem substituição, com relações a/c 0,77; 0,69 e 0,66, respectivamente. Concluíram que existe uma redução de cerca de 23 % da resistência à compressão para o concreto com 100 % de agregado reciclado e de 13 % para o concreto que substituiu apenas o agregado graúdo.

SAGOE-CRENTSIL et al. (1998) encontraram perdas de resistência à compressão de cerca de 13 % em concretos produzidos com agregado graúdo reciclado e miúdo natural e valores até 32 % inferiores para concretos produzidos somente com agregados reciclados. Os autores atribuíram esta redução a maior demanda de água apresentada pelo concreto com agregado reciclado em relação ao concreto convencional.

De acordo com o trabalho realizado por BARRA (1996), que estudou misturas de concretos com agregados graúdos reciclados de concreto, agregados graúdos reciclados de material cerâmico e agregados convencionais, dos quais foram traçadas curvas de dosagem, concluiu-se que os concretos reciclados obedecem o comportamento da Lei de Abrams. Entretanto, à medida que a relação a/c diminui, o incremento de resistência para os concretos reciclados é menor que o incremento observado para o concreto convencional.

DI NIRO et al. (1998) realizaram misturas de concreto com agregado reciclado utilizando teores de 0, 30, 50, 70 e 100 % de substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado e concluíram que quanto maior o teor de substituição utilizado, menor era a resistência à compressão do concreto reciclado. Para o traço com 100 % de agregado reciclado a redução foi de cerca de 20 %, enquanto que para a mistura com apenas 30 % de substituição a redução foi de apenas 4 %.

Concretos preparados com agregado graúdo reciclado de blocos cerâmicos, com relação a/c variando de 0,3 a 0,6, apresentaram resistência à compressão cerca de 10 % maior que as respectivas misturas de referência. Para o traço com relação a/c 0,3 o concreto reciclado apresentou resistência de 72 MPa, contra 64 MPa do mesmo traço de referência com brita granítica (MANSUR et al. 1999). Os autores atribuem o melhor comportamento do concreto reciclado à superfície rugosa, alta angulosidade, alta densidade e alta resistência dos agregados de blocos cerâmicos (153 MPa). A textura e forma dos agregados reciclados promovem melhor aderência entre a pasta e o agregado favorecendo o aumento da resistência.

LEVY e HELENE (2000) realizaram 3 misturas de concreto, uma de referência, a segunda utilizando 50 % de agregado graúdo de concreto e a terceira utilizando 50 % agregado graúdo de alvenaria, em três proporções 1:3, 1:4,5 e 1:6, tendo como fator de controle das misturas o abatimento de 70 ± 20 mm, ou seja, as relações a/c variavam para cada traço. Os autores obtiveram como resultado aos 28 dias uma redução nos valores de resistência dos concretos com agregado de alvenaria que variou de 23 a 37 %. Para os concretos com agregado de concreto os resultados de resistência obtidos foram semelhantes aos do concreto de referência. Observou-se nos resultados que o tipo de componente utilizado para produção do concreto exerce influência sobre a resistência à compressão dos concretos. A menor resistência e maior porosidade dos agregados de alvenaria, compostos de argamassa e blocos cerâmicos, são apontadas como as causas desta redução.

BALLISTA e MACHADO Jr. (2000) realizaram um estudo em concretos com agregados graúdos reciclados modificados com adição de polímero nos teores de 0, 10, 20 e 30 % em relação a massa de cimento. Observaram que apenas para o teor de 10 % de adição de polímero o concreto com agregado reciclado apresentou resultados de resistência à compressão semelhantes ao concreto de referência. Para teores de adição maiores que 10 % os resultados obtidos apresentaram uma queda de resistência que variou de 20 a 46 %. É importante salientar que foram mantidas as relações a/c para todos os traços. Além disso, os autores avaliaram 4 tipos de cura e concluíram que o melhor tipo de cura para os quatro traços desenvolvidos foi aquele no qual era realizada 6 dias de cura submersa em água e 21 dias de cura ao ar. A avaliação do tipo de cura está relacionada a adição de polímero às misturas.

MACHADO Jr et al. (2000) realizaram misturas de concreto reciclado utilizando agregado graúdo reciclado de 19,0 e 9,5 mm, separadamente, com teores de substituição de 0, 50 e 100 %. Os resultados obtidos não apresentaram diferença significativa em relação as duas graduações testadas, todavia os concretos reciclados apresentaram aumento de cerca de 15 e 19% nos valores de

resistência em relação aos concretos de referência. Os autores atribuem este comportamento a alta absorção dos agregados reciclados que não foi compensada para produção dos concretos. Neste caso, foi mencionada, também, a possibilidade de “cura úmida interna” por parte do agregado reciclado durante o endurecimento da pasta, fenômeno que ocorre com os agregados leves de alto poder de absorção descritos por NEVILLE (1995).

Diante dos vários resultados encontrados e dos mais variados tipos de pesquisa desenvolvidos, conclui-se que existe uma dificuldade em apontar qual comportamento observado para os concretos produzidos com agregados reciclados é o mais correto. Este fato é atribuído à dificuldade de avaliar quais parâmetros foram tomados como constantes em cada estudo para fazer as devidas comparações. Ou seja, a falta de um procedimento uniforme para as pesquisas torna difícil a adoção deste ou daquele resultado como parâmetro que sirva como orientador do comportamento do material, ou que ajude a corroborar os resultados já existentes.

3.2.2.4 Resistência à tração

A resistência à tração dos concretos geralmente se apresenta como uma característica mecânica secundária, visto que é sabido que o concreto não se apresenta como bom material para resistir aos esforços de tração das estruturas. Porém, quando se faz um estudo criterioso das propriedades do concreto, principalmente quando são utilizados novos materiais, essa propriedade mecânica não pode ser desprezada.

MACHADO Jr. et al. (1998) e BAZUCO (1999) afirmam que não há influência da utilização de agregado graúdo reciclado na resistência à tração de concretos. Os autores mencionam ainda que concretos com material reciclado obedecem às mesmas relações teóricas entre resistência à tração e resistência à compressão que concretos convencionais de mesma classe. Porém, BAZUCO (1999) ressalta que quando se utiliza também o agregado miúdo reciclado, tal propriedade apresenta uma redução da ordem de 10 a 20 %.

Concretos com agregados graúdos de concreto reciclado apresentaram as mesmas relações de resistência à compressão e tração de concretos com agregados naturais em estudos realizados por RAVINDRARAJAH e TAM, MUKAI et al., BCSJ, citados por HANSEN (1992). Porém um outro estudo realizado por BAIRAGI et al., citado por BAZUCO (1999) apontaram índices de resistência à tração ligeiramente mais baixos para concretos com agregado graúdo reciclado quando comparados com concretos convencionais.

Quando se utiliza agregado reciclado de tijolos cerâmicos os valores de resistência à tração dos concretos produzidos se apresentaram 10 % maiores que os valores obtidos para a mesma mistura de concreto com agregados naturais (CHARISIUS et al., citado por SCHULZ e HENDRICKS, 1992). Vale lembrar que este estudo é o mesmo que apresentou maiores resistências à compressão para os concretos reciclados, e no qual a taxa de absorção do material possivelmente não foi considerada.

TAVAKOLI e SOROUSHIAN (1996b) encontraram valores de resistência à tração por compressão diametral e tração na flexão de concretos com agregados reciclados de concreto que variaram de acordo com o tempo de mistura, a relação a/c e a dimensão máxima do agregado. Os concretos com agregados com maior dimensão característica apresentaram melhores resultados de resistência à tração. O tempo de mistura de 30 minutos não apresentou diferenças significativas nos resultados. De forma geral os autores mencionam que os resultados foram maiores ou estatisticamente comparáveis para os concretos reciclados em relação aos concretos convencionais.

Concretos produzidos com agregados reciclados de tijolos cerâmicos, com resistência em torno de 37 MPa, apresentaram resultados de resistência à tração 11 % superiores aos mesmos concretos de referência (AKHTARUZZAMAN e HASNAT, 1983).

MANSUR et al. (1999) avaliaram a resistência à tração de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de blocos cerâmicos e concretos convencionais, com 4 relações a/c variando de 0,3 a 0,6. Os resultados mostraram que o concreto reciclado apresentou um aumento de resistência de 9 e 12 % para a resistência à tração na flexão e por compressão diametral, respectivamente, em relação ao concreto de referência. Os autores atribuem este comportamento à forma angular e textura rugosa dos agregados reciclados que proporcionam melhor aderência pasta/agregado.

BALLISTA e MACHADO Jr. (2000) estudaram o comportamento de quatro traços de concreto produzidos com agregados graúdos reciclados e com adição de polímeros nos teores de 0, 10, 20 e 30 %, avaliaram ainda quatro tipos de cura. Concluíram que os melhores resultados foram obtidos para o tipo de cura no qual os corpos-de-prova ficavam 6 dias submersos em água e 21 dias expostos ao ar. Além disso, concluíram que os melhores resultados de resistência à tração por compressão diametral foram obtidos quando se adicionou 10 % de polímero às misturas. Para teores de adição dos polímero maiores que 10 % houve redução dos resultados de resistência da ordem de 4 a 17 %.

MACHADO Jr. et al. (2000) ensaiaram concretos com 0, 50 e 100 % de substituição de agregados graúdos naturais por reciclados, com dimensões máximas de 19 e 9,5 mm. Observou-se

através dos resultados apresentados, tanto para a tração na flexão, quanto para a tração por compressão diametral, que nem o teor de substituição, nem a dimensão máxima característica dos agregados apresentaram influência significativa sobre os resultados obtidos. A melhor aderência existente entre a matriz e o agregado reciclado, bem como, a maior taxa de absorção do material reciclado foram apontadas como razões para este comportamento. No entanto, é importante salientar que a taxa de absorção do material reciclado não foi compensada, o que pode ter diminuído a relação a/c final das misturas, favorecendo o aumento da resistência.

No estudo realizado por SALEM e BURDETTE (1998), citado no item 3.2.2.3, a resistência à tração do concreto reciclado apresentou um incremento aos 7 dias e depois ocorreu diminuição aos 28 dias, quando os resultados foram comparados ao concreto convencional. De acordo com os autores, MEHTA e MONTEIRO consideram a existência de uma forte aderência física entre a pasta de cimento e a superfície rugosa do agregado nas primeiras idades, e que em idades mais avançadas, esta interação deixa de ter efeito e passa haver o efeito da interação química entre o agregado e a pasta de cimento, e segundo os autores, essa foi a explicação para que houvesse uma diminuição da resistência à tração do concreto reciclado em relação ao concreto convencional a estas idades. Contudo, MEHTA e MONTEIRO (1994) fazem esta consideração com base no uso de agregados convencionais, no entanto, quando se utiliza material reciclado, o que pode ocorrer em idades mais avançadas é que a fragilidade do agregado gráudo passe a exercer um papel muito mais importante na resistência à tração do que a aderência física matriz/agregado, que com o grau de hidratação tende a melhorar ainda mais.

Como pode ser visto, assim como com os resultados de resistência à compressão, a resistência à tração de concretos reciclados não obedece um comportamento uniforme, pelo menos nos estudos levantados na bibliografia. Porém, vale a pena levantar algumas hipóteses que merecem estudos mais aprofundados, como por exemplo, que a resistência à tração leva em consideração mecanismos de aderência física entre as partículas. Assim, seria correto dizer que esta aderência entre a matriz de concreto e a superfície dos grãos do agregado ocorre mais facilmente e melhor em materiais cuja forma apresenta-se mais irregular e cuja textura é mais rugosa, pois há um aumento da área superficial de contato e há um maior entrelaçamento dos compostos de hidratação com os poros superficiais do material. NEVILLE (1995) inclusive cita que partículas mais brandas, porosas e mineralogicamente heterogêneas apresentam melhor aderência.

Com base no que foi exposto, e avaliando as características do material reciclado, seria interessante mencionar que este tipo de material oferece vantagens em relação às propriedades de

aderência e assim o comportamento normal esperado seria uma melhoria da resistência à tração dos concretos produzidos com agregados reciclados.

3.2.2.5 Módulo de deformação

Geralmente os concretos reciclados apresentam-se mais deformáveis que os concretos convencionais. Segundo LEVY (1997), este fato se deve à camada de argamassa antiga aderida à superfície do agregado reciclado de concreto e a maior porosidade dos materiais que compõem o resíduo.

RAVIDRARAJAH et al., citados por HANSEN (1992), estudando concretos com substituição total dos agregados graúdos naturais pelos reciclados e usando agregado miúdo natural, concluíram que: a diferença entre o módulo de deformação de concretos reciclados e concretos convencionais aumenta a medida que cresce o valor da resistência à compressão; o módulo de deformação de concretos reciclados é sempre menor; para concretos reciclados há uma redução de 25 % e 35 % no módulo dos concretos curados em água, e ao ar, respectivamente, quando comparados ao mesmo concreto de referência curado em água; e por fim que o uso de agregado miúdo reciclado diminui o valor do módulo, tanto quanto o uso de agregado graúdo reciclado.

Vários outros estudos citados por HANSEN (1992) apontam a diminuição do módulo de deformação do concreto reciclado em relação ao concreto convencional, com valores de redução que oscilam entre 15 e 40 %. Segundo alguns trabalhos levantados pelo autor, a diferença é maior quando, além do agregado graúdo, o agregado miúdo reciclado é utilizado.

O módulo de deformação de concretos produzidos com agregados reciclados de material cerâmico equivale à metade, ou a dois terços, dos valores obtidos para concretos convencionais com mesma resistência à compressão. O intervalo de variação se deve ao tipo de material cerâmico utilizado, ou seja, quando se trata de tijolos mais densos os resultados são um pouco melhores, quando se utiliza materiais mais porosos, portanto de menor qualidade, os resultados são um pouco piores (SCHULZ e HENDRICKS, 1992).

DELWAR et al. (1997) desenvolveram uma pesquisa utilizando agregado graúdo reciclado de pavimento asfáltico para produção de concretos com diferentes teores de substituição. Os pesquisadores concluíram que a tensão de concretos reciclados, comparada a tensão dos concretos de referência, foi sempre menor para qualquer valor de deformação analisado. Por outro lado, eles também concluíram que quanto maior o teor de substituição do agregado, mais dúctil era o concreto

obtido. Este aspecto pode ser considerado favorável quando se requer a utilização de concretos em áreas onde se deseja atenuar a força de impacto e energia. Nesta mesma pesquisa foi investigado o módulo secante dos concretos e concluiu-se que à medida que se aumenta o teor de substituição, o valor do módulo diminui.

AKHTARUZZAMAN e HASNAT (1983), em sua pesquisa utilizando agregado reciclado de tijolos resistentes, concluíram que o módulo de deformação dos concretos produzidos com este material é 30 % menor que o módulo de concretos convencionais e 40 % maior que o módulo de concretos produzidos com agregados leves.

DILLMANN (1998) encontrou resultados de módulo de deformação de concretos reciclados cerca de 20 % inferior ao módulo dos concretos de referência.

O módulo de deformação tangente inicial de concretos com agregado reciclado de blocos cerâmicos de alta resistência resultou 23 % inferior ao módulo de deformação do concreto de referência no estudo realizado por MANSUR et al. (1999). Os autores comparam este resultado com os resultados encontrados por AKHTARUZZAMAN e HASNAT (1983) e explicam que o melhor desempenho apresentado pelo concreto reciclado desenvolvido nesta pesquisa se deve a melhor granulometria utilizada.

MACHADO Jr. et al. (2000), estudando concretos com agregado graúdo reciclado, com dimensões máximas de 19,0 e 9,5 mm e teores de substituição de 0, 50 e 100 %, concluíram que não havia influência significativa nem da dimensão máxima característica, nem do teor de substituição utilizado para a produção dos concretos sobre os resultados de módulo de deformação. Entretanto, é importante salientar que a taxa de absorção do agregado reciclado não foi compensada para a produção dos concretos o que deve ter provocado a diminuição da relação a/c final das misturas com consequente aumento nos resultados de módulo de deformação dos concretos reciclados.

Os concretos com agregados graúdos reciclados de concreto, estudados por SALEM e BURDETTE (1998), apresentaram uma redução nos valores de módulo de deformação de cerca de 9 % aos 7 dias, e 16 % aos 28 dias, comparados aos concretos convencionais. De acordo com os autores, esta redução se deve a camada de argamassa antiga aderida às partículas do agregado reciclado. Esta argamassa antiga confere ao agregado reciclado maior deformabilidade, assim como ao concreto confeccionado com este material.

MEHTA e MONTEIRO (1994) fazem algumas observações sobre parâmetros que podem influenciar o módulo de deformação dos concretos. Eles dizem que o módulo de deformação do concreto está intrinsecamente ligado à fração volumétrica, à massa específica, ao módulo de deformação do agregado e da matriz de cimento e às características da zona de transição. Os autores apontam que o módulo de deformação do agregado está ligado principalmente à sua porosidade e, em grau um pouco menor, ao diâmetro máximo do agregado, forma, textura, granulometria e composição mineralógica. Segundo eles, é a rigidez do agregado que controla a capacidade de restrição da deformação da matriz e esta rigidez é determinada pela sua porosidade. Para agregados de baixa porosidade, os valores de módulo de deformação variam de 69 a 138 GPa e para agregados menos densos estes valores estão na faixa de 21 a 48 GPa. Os agregados leves apresentam valores de módulo entre 7 e 21 GPa. A matriz da pasta de cimento apresenta resultados de módulo que variam entre 7 e 28 GPa. Estes valores são regidos pela porosidade das pastas, que por sua vez é controlada pela relação a/c , pelo grau de hidratação do cimento, pelo conteúdo de ar da mistura e pela presença de adições minerais. Na zona de transição existe a influência dos espaços vazios, das microfissuras e dos cristais de hidróxido de cálcio orientados sobre as relações de tensão/deformação.

Com base nas características que influenciam o módulo de deformação apontadas acima, pode-se dizer que o módulo de deformação dos agregados reciclados está bem próximo dos valores de módulo apresentados pela matriz da pasta de cimento, visto que a composição dos resíduos de construção e demolição se dá basicamente a partir de materiais de base cimentícia (argamassas de concreto, de revestimento e de execução de alvenaria) e componentes cerâmicos muito porosos. Desta forma, como a porosidade do agregado é que controla a restrição da deformação da matriz, no caso do agregado reciclado o concreto produzido será mais deformável, pois esse controle é incipiente. Matriz e agregado do concreto reciclado são muito mais porosos quando comparados aos concretos produzidos com agregados naturais. A diminuição da massa específica dos concretos reciclados também leva a reduções nos valores de módulo. Resta apenas a influência da zona de transição que pode ter tido uma aderência melhorada, como já foi visto anteriormente, mas que por si só não é suficiente para elevar os valores de módulo dos concretos reciclados.

Determinações teóricas dos valores de módulo de deformação podem ser feitas a partir de equações que levam em consideração a massa específica e a resistência à compressão dos concretos. Para os concretos convencionais, a NBR 6118 (1978) estima o módulo de deformação longitudinal dos concretos a partir da seguinte equação:

$$E_c = 6600 * \sqrt{f_{ck} + 3,5} \quad [3.1]$$

3.2.3 Durabilidade

A durabilidade de concretos, sejam eles convencionais ou não, está diretamente relacionada com a permeabilidade do concreto, entre outras propriedades. QUEBAUD et al. (1999) realizaram estudos em concretos com agregados reciclados e agregados naturais, substituindo 100 % das duas frações (miúda e graúda), e substituindo apenas parte das frações e mediram a permeabilidade dos concretos à água, ao ar e de superfície. Concluíram que os concretos com agregados naturais apresentam uma permeabilidade à água que é 2 a 3 vezes inferior à permeabilidade de concretos reciclados. De acordo com os autores, isto se deve ao uso de agregados naturais pouco porosos e que levam a menor porosidade da matriz de concreto e ao uso de relações água/cimento menores. A permeabilidade ao ar foi 2 a 5 vezes inferior para os concretos convencionais. Quanto maior a proporção de areia reciclada mais permeável é o concreto. A permeabilidade de superfície dos concretos reciclados também é maior que a dos concretos convencionais.

ZORDAN (1997) mediu também a permeabilidade ao ar de concretos com agregados reciclados e concluiu que as amostras ensaiadas apresentaram valores de permeabilidade muito próximos dos resultados obtidos com o concreto de referência. De acordo com a classificação apresentada pelo autor, que é baseada no método que utiliza o Permeator como aparelho para medição da permeabilidade e classifica os materiais em índices de 0 (muito pobre) a 5 (excelente), os concretos produzidos foram considerados médios, bons e muito bons. Os resultados e a classificação dos concretos quanto a permeabilidade estão apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 Índice de permeabilidade kT de concretos reciclados

Amostras	A	B	C	D	Referência
Valor médio do coeficiente kT (10^{-16} m^2)	0,137	0,698	0,045	0,129	0,120
Classificação	bom	médio	muito bom	Bom	bom
Intervalo de variação do coeficiente kT (10^{-16} m^2)	0,1 a 0,5	0,5 a 2,5	0,025 a 0,1	0,1 a 0,5	0,1 a 0,5

Fonte: A partir de ZORDAN (1997)

Concretos com agregado reciclado de concreto apresentam menor resistência aos ciclos de gelo/degelo e maior retração por secagem que concretos produzidos com agregados naturais. Entretanto, se concretos com agregados reciclados são produzidos com aditivos incorporadores de ar, a sua resistência ao gelo/degelo é similar à resistência apresentada pelo concreto convencional de mesmas proporções (KASAI e FUJII, 1989). SALEM e BURDETTE (1998) encontraram resultados semelhantes em relação a resistência aos ciclos de gelo/degelo de concretos com agregados reciclados de concreto. Os autores atribuem a causa deste comportamento à elevada taxa de absorção

dos agregados reciclados que aumenta o potencial de saturação dos mesmos e durante o teste, quando expostos ao congelamento, expulsam parte da água para a matriz de cimento diminuindo sua durabilidade. Porém, os autores também mencionam que se for adicionado cinza volante ou agentes incorporadores de ar ao concreto, a resistência aos ciclos de gelo/degelo aumenta significativamente, mas ainda assim o concreto convencional apresenta melhor desempenho. Contrariando KASAI e FUJII (1989) e SALEM e BURDETTE (1998), FORSTER (1986) e KIKUCHI et al. (1998) apontam que os concretos reciclados apresentam melhor resistência aos ciclos de gelo/degelo que concretos convencionais de mesmas proporções. KIKUCHI et al. (1998) só encontraram resultados de resistência aos ciclos de gelo/degelo menores para os concretos com agregado miúdo reciclado.

PIETERSEN e FRAAY (1998) realizaram estudos em concretos com agregados reciclados e demonstraram que a substituição de até 100 % de agregados naturais por reciclados não prejudica o desempenho do concreto ensaiado. Os concretos reciclados apresentaram níveis satisfatórios de resistência aos ciclos de gelo/degelo e ataque acelerado de cloretos, para uso corrente na Holanda, local onde foi desenvolvida a pesquisa.

BARRA (1996) também estudou o comportamento dos concretos produzidos com agregados reciclados de concreto, concretos produzidos com 10, 20 e 40 % de substituição do agregado graúdo natural por reciclado de material cerâmico, e concretos com agregados naturais e concluiu que a condição de saturação do agregado reciclado piora o comportamento do concreto frente aos ciclos de gelo/degelo e isto se deve ao enfraquecimento da zona de transição que não é capaz de absorver as tensões existentes nesta área. Em contrapartida, o uso de material cerâmico melhora o comportamento frente aos ciclos de gelo/degelo.

TOBORI et al. (1999) estudaram a retração por secagem e a resistência a ciclos de gelo/degelo em concretos convencionais, concretos com agregado graúdo reciclado e miúdo natural e concreto com 100 % de agregados reciclados incorporando também superplastificantes a base de poliestireno sulfonado e formaldeído naftaleno sulfonado. Concluíram que os concretos com agregados reciclados apresentam maior retração por secagem e menor resistência ao ciclo de gelo/degelo, e que o uso de aditivos superplastificantes pode reduzir a retração por secagem dos concretos reciclados quando comparados aos concretos reciclados sem o aditivo. Porém o uso de superplastificante não melhora em nada a resistência ao gelo/degelo dos concretos reciclados produzidos e piora os resultados quando usado no concreto convencional.

Alguns trabalhos realizados com concretos com agregados reciclados, principalmente aqueles que incorporam maior quantidade de agregados miúdos, apresentaram valores de retração por

secagem maiores que os mesmos concretos produzidos com agregados naturais (QUEBAUD e BUYLE-BODIN, 1999; RANVIDRARAJAH et al., 1987; SAGOE-CRENTSIL et al. 1998). Esta característica pode ser explicada devido a maior taxa de absorção apresentada pelos agregados reciclados que deve ser compensada e, portanto, os concretos reciclados dispõem de maior quantidade de água passível de evaporação. O valor da retração é tanto maior, quanto maior for o teor de substituição do agregado natural pelo reciclado (QUEBAUD e BUYLE-BODIN, 1999). SAGOE-CRENTSIL et al. (1998) chegaram a valores de retração por secagem 50 % maiores para concretos com substituição total do agregado miúdo natural pelo reciclado, quando comparados ao concreto de referência. Os autores observaram que a taxa de absorção dos agregados reciclados é ainda maior quando existe a incidência de partículas muito finas de argila na composição do material.

Diferente dos resultados encontrados anteriormente, MANSUR et al. (1999) encontraram resultados de retração por secagem para concretos com agregado graúdo reciclado de resíduos de bloco cerâmico de alta resistência, 17 % mais baixos que os resultados apresentados pelos concretos de referência. Os autores explicaram os resultados encontrados com base na alta absorção dos agregados reciclados de blocos cerâmicos que pode exercer grande influência na movimentação de água dentro das misturas de concreto fazendo com que, no intervalo de duração utilizado neste ensaio, aproximadamente 120 dias, não houvesse aumento da retração por secagem dos concretos reciclados, servindo inclusive para que os mesmos apresentassem menores resultados se comparados ao referência. De acordo com HENDRIKS e PIETERSEN (1998), os agregados reciclados, principalmente os de alvenaria, tem a capacidade de promover essa transferência de umidade dentro das misturas reduzindo a retração por secagem, principalmente no estágio inicial de hidratação.

DE PAUW et al. (1998) realizaram um estudo da retração por secagem de 5 misturas de concreto: uma de referência utilizando como agregado natural pedra calcária, a segunda com agregado reciclado de concreto, a terceira e quarta com agregado reciclado de alvenaria de diferentes origens designados por tipo 1 e tipo 2, e a quinta com agregado leve. Neste estudo foi substituído apenas o agregado graúdo. Os autores chegaram as seguintes conclusões:

- Nos primeiros dias do ensaio o concreto de referência apresentou a maior deformação, enquanto a mistura com agregado leve apresentou a menor deformação. Na maior parte do tempo, o concreto com agregado de alvenaria de tipo 1 apresentou a segunda menor deformação;

- Depois de um mês e meio, a curvatura da deformação do concreto de referência tendeu a diminuir, enquanto para as outras misturas esta curvatura manteve-se inalterada;
- Após 3 meses, a retração dos concretos com agregados de alvenaria aumentaram em relação ao concreto de referência;
- Após um ano, os concretos com agregado de concreto e agregado de alvenaria designado por tipo 2 apresentaram maior retração que o concreto de referência. Diferentemente, o concreto com agregado de alvenaria designado por tipo 1 ficou na mesma ordem do concreto de referência.

Quando agregados reciclados são obtidos a partir da britagem de concretos, uma grande quantidade de argamassa antiga pode ficar aderida às partículas do agregado graúdo produzido, ou mesmo, devido a sua fragilidade, apresentar-se em quantidade suficientemente grande na composição do agregado miúdo. De acordo com HANSEN e NARUD (1983), este fato pode traduzir-se em problemas quando este material é incorporado a misturas para produção de novos concretos. Os autores apontam que podem ocorrer problemas de deformação e retração por secagem, assim como propriedades físicas e químicas de durabilidade dos concretos podem ser afetadas.

A adoção de mais de uma britagem pode influenciar na qualidade do material obtido. Por exemplo, FUJII, citado por TAVAKOLI e SOROUSHIAN (1996a), relata uma diminuição da retração por secagem devido à rebitagem do agregado graúdo reciclado de concreto. Segundo o autor, esta iniciativa causa maior desprendimento da argamassa antiga das partículas do agregado natural antigo, bem como, devido a sua menor resistência, existe maior tendência de desagregação da argamassa endurecida, resultando em menor quantidade deste material na composição granulométrica do agregado graúdo reciclado de concreto. Uma diminuição da quantidade de pasta de cimento endurecida na composição do agregado graúdo utilizado acarreta uma diminuição da retração por secagem no concreto reciclado, quando somente a fração graúda do agregado reciclado é usada.

BARRA (1996) estudou a resistência ao ataque por CO_2 em concretos convencionais e concretos reciclados e concluiu que:

- a resistência ao ataque depende da resistência à compressão que está sendo analisada;
- para concretos ricos (consumo de cimento $C > 400 \text{ kg/m}^3$), o risco de carbonatação do concreto reciclado é maior que para o concreto convencional;

- para concretos normais ($400 \text{ kg/m}^3 > C > 300 \text{ kg/m}^3$), as condições de mistura dos materiais na betoneira influenciam muito nos resultados de carbonatação. Por exemplo, quando o cimento é adicionado ao agregado previamente umedecido na betoneira, ou seja, o agregado possui apenas a superfície molhada, o comportamento do concreto frente à carbonatação é equivalente ao comportamento do concreto convencional. Segundo a autora, neste procedimento de mistura existe uma maior concentração de grãos de cimento na superfície do agregado reciclado e, assim, a formação de uma barreira à penetração do CO_2 , melhorando o desempenho do concreto reciclado. Quando a mistura é feita colocando a pasta, ou argamassa, previamente misturadas junto com o agregado reciclado seco, a formação desta barreira não existe. Assim, o CO_2 possui mais de um caminho para permear o concreto, a nova matriz que pode ser boa o suficiente para barrar a entrada do CO_2 , ou o agregado reciclado poroso e mais suscetível ao ataque.
- para concretos pobres ($C < 300 \text{ kg/m}^3$), os concretos convencionais e reciclados apresentaram comportamento semelhante frente ao ataque por CO_2 .

De acordo com BARRA (1996), a resistência à carbonatação de concretos reciclados sofre uma influência muito grande da porosidade da matriz nova e da matriz antiga de agregados reciclados de concreto e também da maior porosidade inerente ao material.

KIKUCHI et al. (1998) avaliaram a resistência à carbonatação de concretos com agregados reciclados de concreto e concluíram que estes apresentaram menor frente de carbonatação que os concretos de referência quando submetidos durante um mês a uma concentração de CO_2 de 5 %, temperatura de 30 °C e 60 % de umidade. Os autores relatam, ainda, que os concretos com agregado miúdo reciclado apresentaram maior frente de carbonatação que os concretos com agregado graúdo reciclado.

SCIOTTI et al. (1998) afirmam que a carbonatação é um dos processos mais comuns que podem existir na argamassa antiga dos agregados reciclados de concreto. Os autores realizaram estudos da interface pasta/agregado de concretos com agregado reciclado de concreto e avaliaram que os agregados reciclados são provenientes de fontes desconhecidas de material e os concretos geralmente possuem diferentes relações a/c , como existe uma relação entre o sistema de poros, a relação a/c e a carbonatação é lógico que concretos com altas relações a/c tendem a difundir mais a carbonatação. Para minimizar o problema os autores recomendam que os concretos reciclados passem por um processo de cura úmida, desta forma o processo de hidratação será melhor desenvolvido.

LEVY e HELENE (2000) realizaram estudos de durabilidade em concretos com 50 % de agregados graúdos reciclados de concreto, concretos com 50 % de agregados graúdos reciclados de alvenaria e concretos de referência, sendo realizadas três misturas para cada família de concreto nas proporções 1:3, 1:4,5 e 1:6 com diferentes relações a/c. Nesta pesquisa foram avaliadas a carbonatação, a resistividade, a absorção por imersão e o índice de vazios dos concretos. Os resultados mostraram que a taxa de absorção medida e o índice de vazios tendem a ser maiores para a família de concretos que incorpora agregados graúdos reciclados de alvenaria. Com relação a frente de carbonatação, os concretos submetidos a uma concentração de 12 % de CO₂ durante duas semanas, apresentaram profundidades de carbonatação muito semelhantes, o que significa dizer que os autores não encontraram influência do tipo de agregado utilizado, nesta propriedade. A resistividade dos concretos com agregados reciclados foi semelhante a dos concretos de referência, com exceção do traço rico, 1:3, no qual os concretos com agregados reciclados apresentaram menor resistividade que o concreto de referência. Os autores concluíram que os concretos que utilizam 50 % de agregados graúdos de concreto são tão duráveis quanto o concreto de referência.

Assim como acontece com as propriedades mecânicas, os aspectos relativos à durabilidade dos concretos reciclados, estudados em menor escala, também apresentam resultados contrastantes. Atribui-se a este fato a falta de uma metodologia adequada e uniforme para o estudo do comportamento dos agregados reciclados quando incorporados ao concreto.

3.2.4 Uso de aditivos e adições no concreto reciclado

A Federal Highway Administration, o Army Corps of Engineering e algumas agências rodoviárias estaduais nos Estados Unidos, citados por DELWAR et al. (1997) e FORSTER (1986), conduziram vários estudos em concretos com agregados reciclados e concluíram que o uso de agentes redutores de água são efetivos no aumento da resistência de concretos com agregados reciclados. Bem como, o uso de agentes incorporadores de ar e cinza volante podem melhorar a durabilidade e a trabalhabilidade destes concretos.

Em trabalho realizado por HANSEN e HEDEGARD (1984), foram produzidos concretos utilizando-se aditivos superplastificante, incorporador de ar, retardador de pega e acelerador de pega. Os concretos produzidos com tais aditivos foram britados e peneirados, sendo utilizados como agregados graúdos para produção de novos concretos, cuja finalidade era testar o efeito dos aditivos existentes nos concretos de origem sobre os novos concretos. Deste estudo concluiu-se que: o uso de superplastificante, de incorporador de ar e acelerador ou retardador de pega no concreto de origem

produz pouco ou nenhum efeito sobre o concreto reciclado, em relação ao aumento da trabalhabilidade, incorporação de ar e influência nos tempos de pega, respectivamente.

FORSTER (1986) realizou levantamento de projetos que utilizaram concretos com agregados reciclados nos Estados Unidos e concluiu que este material necessita de quantidades menores de agentes incorporadores de ar quando comparados a concretos convencionais para atingir um mesmo nível de teor de ar incorporado.

SALEM e BURDETTE (1998) produziram misturas de concreto com agregado graúdo reciclado de concreto e com agregados naturais adicionando ainda às misturas cinza volante e aditivo incorporador de ar, separadamente. Concluíram que o uso de altos teores de cinza volante causa aumento da resistência ao gelo-degelo em ambas misturas, porém com melhor desempenho do concreto convencional, e não chega a afetar as suas propriedades físicas. E o uso de aditivo incorporador de ar aumenta a resistência ao gelo-degelo dos dois tipos de mistura indistintamente. Todavia, causa redução significativa das propriedades mecânicas dos concretos reciclados e convencionais.

TOBORI et al. (1999) realizaram um estudo sobre o uso de superplastificantes a base de poliestireno sulfonado e formaldeído naftaleno sulfonado em misturas de concreto com agregados naturais, misturas com agregado graúdo reciclado de concreto e agregado miúdo natural e misturas com agregados reciclados. Os autores observaram que, em todos os casos, o abatimento aumentava com o aumento do teor de superplastificante, embora o incremento fosse diferenciado em relação ao tipo de agregado de cada mistura. Ou seja, o incremento no abatimento era maior nos concretos convencionais e no concreto com agregado graúdo reciclado e miúdo natural que nos concretos com substituição total dos agregados naturais pelos reciclados. O mesmo comportamento foi observado quando se fez a mudança de um tipo de superplastificante para o outro. Os autores atribuem este fato à grande absorção apresentada pelo agregado miúdo. Quando o superplastificante é adicionado à mistura de concreto reciclado, ao invés de atuar sobre os grãos de cimento, ocorre a absorção de sua fase líquida pelo agregado miúdo reciclado, assim, o aditivo funciona como parte da água de molhagem do agregado, e ainda, as partículas de cimento previamente aderidas à superfície dos agregados não estão disponíveis para que haja sua interação com o aditivo, o que implica em pior desempenho do aditivo sobre o concreto reciclado.

HANSEN (1992) afirma que apesar de não ter encontrado muitos relatos de trabalhos desenvolvidos com o uso dos mais variados tipos de adições existentes, ele acredita que seus efeitos não sejam deletérios se forem utilizados para produção de concretos reciclados.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Visando atingir os objetivos propostos neste trabalho foi desenvolvido um projeto experimental que contribuísse para o entendimento do comportamento do material reciclado em concretos produzidos com o mesmo. Desta forma, foram estudadas algumas propriedades destes concretos no estado fresco e no estado endurecido, para os quais foram utilizados diferentes teores substituição do agregado natural por agregado reciclado de resíduo de construção e demolição, para diferentes níveis de resistência.

O projeto experimental dispôs de embasamento estatístico, objetivando oferecer maior confiabilidade aos resultados obtidos ao final dos experimentos.

Foi realizado, também, um estudo na microestrutura do concreto, através de microscópio eletrônico de varredura (MEV), utilizando elétrons retroespalhados e elétrons secundários, o que permitiu um maior entendimento sobre a influência da utilização do material reciclado sobre as propriedades do concreto estudadas. Foi analisada a zona de transição dos concretos produzidos, objetivando avaliar qualquer interação existente entre o agregado reciclado e a pasta de cimento.

4.1 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS E PROJETO ESTATÍSTICO UTILIZADO

O planejamento estatístico de experimentos possibilita a definição de uma sequência de ensaios econômica e eficiente; e facilita a realização de uma avaliação estatística dos resultados, o que assegura respaldo científico e maximização das informações obtidas.

Na realização de um estudo para a viabilização de um novo produto, inicialmente deve-se analisar se existe uma demanda no mercado que torne esta pesquisa interessante. Então, analisa-se quais características o produto a ser estudado deve possuir para satisfazer as necessidades dos clientes, transformando estas necessidades em variáveis de resposta que podem ser analisadas estatisticamente.

As variáveis de resposta são aspectos que podem ser medidos e que permitem quantificar as características de qualidade exigidas. No caso dos concretos estruturais, deseja-se que os mesmos apresentem bom desempenho mecânico e sejam duráveis.

Considerando que um dos objetivos deste trabalho é avaliar algumas das características reológicas e mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição, foram definidas as variáveis de resposta abaixo relacionadas:

- Massa específica do concreto no estado fresco;
- Trabalhabilidade, medida pelo índice de abatimento do concreto;
- Resistência à compressão axial (f_c);
- Resistência à tração por compressão diametral ($f_t'D$);
- Resistência à tração na flexão ($f_t'F$);
- Módulo de deformação (E_c).

Muitos projetos de experimentos são realizados com duplo propósito: quantificar a relação entre a importância de algumas das variáveis de resposta mensuráveis e o conjunto de fatores experimentais que podem afetá-las; e encontrar os valores dos fatores que produzem o melhor, ou os melhores valores de resposta (CORNELL, 1990).

Partindo então das variáveis de resposta que se desejaria quantificar, foram definidas as variáveis que seriam trabalhadas, ou seja, foram definidos os parâmetros do processo. Estão relacionados abaixo os parâmetros de processo, que são variáveis que podem ser alteradas e que talvez tenham algum efeito sobre as variáveis de resposta.

- Relação água/cimento (a/c): foram utilizados cinco níveis de relação água/cimento, abrangendo uma faixa que permitiu avaliar o comportamento do material estudado. O projeto estatístico ajudou a definir o melhor intervalo de pontos para o estudo: 0,40; 0,45; 0,60; 0,75; 0,80.
- Percentuais de substituição: foram utilizados percentuais de substituição que variaram de 0 a 100 % tanto de agregado miúdo reciclado (%AMR), quanto gráudo (%AGR), em combinações também definidas pelo projeto estatístico. Este planejamento faz-se necessário para uma melhor análise tanto da influência da granulometria do agregado utilizado, como também do teor de substituição incorporada ao concreto. Os percentuais definidos foram: 0; 11,5 %; 50 %; 88,5 % e 100 %.

Dentro do projeto estatístico optou-se por adotar o projeto de superfície de resposta. Esta é uma técnica que consiste em projetar o experimento e depois analisar os dados obtidos com o mesmo (CORNELL, 1990). Esta é considerada uma técnica eficaz, capaz de detectar possíveis mudanças de concavidade no desenvolvimento das regressões. No projeto de superfície de resposta, deve haver no mínimo três níveis de cada fator para que se possa ajustar um modelo de segunda ordem.

Uma das categorias de projetos mais usadas para estimar os coeficientes no modelo de segunda ordem é categoria de projeto de composição, do qual o projeto de composição central faz parte. O projeto de composição central consiste em um fatorial fracionado somado a pontos axiais e pontos centrais, que podem estar no plano ou no espaço, quando se trabalha com 2 ou 3 fatores ou variáveis, respectivamente. A Figura 10 apresenta o esquema do projeto escolhido.

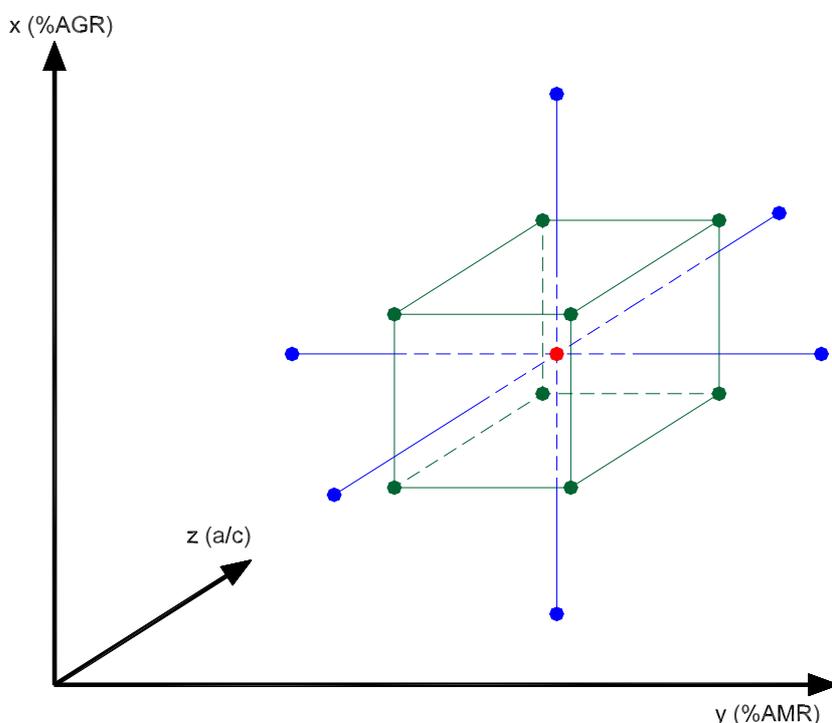


Figura 10 Projeto de composição central para 3 fatores ou variáveis adotado para realização da pesquisa

A Tabela 26 apresenta as coordenadas dos pontos axiais e centrais do projeto fracionado. Cinco níveis de cada variável foram escolhidos e combinados entre si. Os pontos escolhidos obedecem uma distribuição que permitirá a construção de modelos de comportamento bem mais estruturados.

Foram realizados, além dos traços definidos na Tabela 26, os traços dos concretos de referência, ou seja, os concretos com 100 % de agregados naturais e com as cinco relações água/cimento definidas. Esta decisão foi tomada levando-se em consideração que se trata de um material pouco estudado e seria necessário um parâmetro para nortear a execução dos ensaios e

controlar melhor os dados obtidos ao longo do experimento. Assim o projeto experimental consta de um total de 20 traços. Entretanto, para a análise de resultados e modelagem do comportamento do material somente os resultados de cada ensaio para os 15 traços apresentados na Tabela 26 foram utilizados. Caso fossem utilizados os pontos dos concretos de referência haveria uma distorção do comportamento a ser avaliado pois haveriam muitos pontos extremos não definidos no projeto.

Tabela 26 Variáveis definidas pelo projeto estatístico

Experimento nº	a/c	%AGR	%AMR	
1	0,45	11,5	11,5	CUBO
2	0,75	11,5	11,5	
3	0,45	11,5	88,5	
4	0,75	11,5	88,5	
5	0,45	88,5	11,5	
6	0,75	88,5	11,5	
7	0,45	88,5	88,5	
8	0,75	88,5	88,5	
9	0,60	0	50	ESTRELA
10	0,60	100	50	
11	0,60	50	0	
12	0,60	50	100	
13	0,40	50	50	
14	0,80	50	50	
15	0,60	50	50	PONTO CENTRAL

Foi definido ainda pelo projeto estatístico que deveriam ser executadas três repetições de cada traço, fato este que reduziria a influência dos chamados fatores de ruído, ou seja, aqueles fatores que não podem ser controlados mas que podem influenciar nas respostas obtidas, como por exemplo umidade relativa, temperatura, operadores, equipamentos, entre outros.

Deve-se enfatizar que a utilização de um projeto fracionado possibilita a execução de experimentos de forma mais prática e econômica, aumentando a precisão da aquisição e análise dos resultados obtidos.

Depois de definidas as variáveis de resposta e os intervalos dos parâmetros do processo que foram trabalhados na pesquisa (relação a/c; %AMR; e %AGR), foram definidos os fatores que deveriam ser mantidos constantes durante a execução do experimento. Para este trabalho optou-se por manter constante:

- Idade do concreto: foi estabelecida como idade padrão para o estudo de todas as propriedades mecânicas os 28 dias. Entretanto, é importante salientar que para a resistência

à compressão, foi realizado o acompanhamento da evolução da resistência ao longo do tempo, aos 3, 7, 28, e 91 dias. As idades foram escolhidas visando avaliar o comportamento do material desde as primeiras idades até idades mais avançadas, permitindo estimar qualquer tipo de influência que o resíduo de construção e demolição pudesse exercer sobre a resistência à compressão dos concretos produzidos com este material. Um outro fator que norteou a escolha das idades foi o tempo e o espaço disponíveis para a execução dos ensaios.

- Tipo de cura: foi estabelecido que a cura dos corpos-de-prova (CP's) de concreto seria realizada por imersão em água com cal.
- Pré-umidificação dos agregados reciclados: esse procedimento foi adotado visando evitar que o agregado reciclado absorvesse parte da água de amassamento do concreto, fato que prejudicaria a trabalhabilidade do mesmo e iria mascarar o real valor de relação a/c. Assim, optou-se por pré-umidificar os agregados de acordo com as curvas de absorção em 24 horas traçadas para os mesmos, apresentadas no item 4.7.2.1.3.

Na Tabela 27 está apresentada uma programação esquemática envolvendo todos os parâmetros de execução dos experimentos, bem como o número de corpos-de-prova que foram moldados para cada traço.

Tabela 27 Esquema de variáveis analisadas no programa experimental e quantidade de corpos-de-prova a serem ensaiados

a/c	% AGR	%AMR	Nº de traços	Ensaio realizado/traço	Idade (dias)	Nº de CP's
0,40	0	0	2	fc ^(*)	3, 7, 28, 91	48
	50	50		ft'D, ft'F, Ec ^(**)	28	24
0,45	0	0	5	fc ^(*)	3, 7, 28, 91	120
	11,5	11,5		ft'D, ft'F, Ec ^(**)	28	60
	11,5	88,5				
	88,5	11,5				
	88,5	88,5				
0,60	0	0	6	fc ^(*)	3, 7, 28, 91	144
	0	50		ft'D, ft'F, Ec ^(**)	28	72
	100	50				
	50	0				
	50	100				
	50	50				
0,75	0	0	5	fc ^(*)	3, 7, 28, 91	120
	11,5	11,5		ft'D, ft'F, Ec ^(**)	28	60
	11,5	88,5				
	88,5	11,5				
	88,5	88,5				
0,80	0	0	2	fc ^(*)	3, 7, 28, 91	48
	50	50		ft'D, ft'F, Ec ^(**)	28	24
Total			20	-	-	720

(*) fc e ft'D considerar 2 exemplares por idade

(**) ft'F e Ec considerar apenas 1 exemplar por idade

4.2 PROPRIEDADES AVALIADAS – MÉTODOS DE ENSAIO

4.2.1 Massa específica

Foram determinadas as massas específicas dos concretos no estado fresco de acordo com a NBR 9833 (1987) – “Concreto fresco – Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico”. A massa específica do concreto no estado fresco foi determinada tanto para o concreto de referência quanto para o concreto com agregado reciclado.

4.2.2 Trabalhabilidade

Dentro do programa experimental foi realizado o estudo da trabalhabilidade dos concretos reciclados. Para avaliar esta propriedade foi utilizado, num primeiro momento, a medida do abatimento do tronco de cone para todos os traços apresentados na matriz do experimento (Figura 10 e Tabela 26) e para os respectivos traços do concreto de referência. No entanto, os resultados obtidos levaram ao desenvolvimento de dois estudos exploratórios complementares, cujo objetivo era ampliar o

conhecimento do comportamento da trabalhabilidade dos concretos com agregados reciclados. Assim, o estudo da trabalhabilidade foi realizado em três momentos distintos, de acordo com os procedimentos apresentados a seguir.

4.2.2.1 Abatimento do tronco de cone

A trabalhabilidade dos concretos produzidos foi determinada através da medida de abatimento do tronco de cone de acordo com a prescrição da NBR 7223 (1982). Este ensaio foi realizado, tão somente com o objetivo de controlar a produção dos concretos a serem desenvolvidos, ou seja, o ensaio teve apenas um caráter qualitativo dentro do desenvolvimento do experimento. Como os agregados reciclados influenciam muito a trabalhabilidade dos concretos, como foi visto no item 3.2.2.2.1, seja pela sua alta absorção de água, seja pela sua forma mais heterogênea e textura mais rugosa, características que acabam causando redução da água livre e maior travamento nas misturas de concreto no estado fresco, optou-se, então, por não considerar este como um parâmetro fixo durante a produção dos concretos. Parte da água de absorção do agregado foi compensada, como está descrito no item 4.7.2.1.3 a seguir, para minimizar o efeito deste fenômeno, característico do material reciclado, sobre a trabalhabilidade dos concretos, evitando que as misturas ficassem muito secas e que houvessem dificuldades com a moldagem e acabamento da superfície dos concretos.

4.2.2.2 Perda de abatimento

Apesar da trabalhabilidade medida através do índice de consistência dos concretos não ter sido considerada como parâmetro fixo durante a realização dos experimentos, e mesmo, ter apresentado valores cuja alta variabilidade demonstram ineficácia do processo para determinação desta propriedade em concretos reciclados, houve a necessidade de se determinar também a perda de abatimento de alguns traços de concreto reciclado com o objetivo de avaliar uma tendência do comportamento deste material em relação a esta propriedade.

A determinação da perda de abatimento foi realizada de acordo com prescrição da NBR 10342 (1988). Como o ensaio objetiva apenas apresentar uma tendência de comportamento, para esta etapa do estudo, foram escolhidos dois traços intermediários com agregados reciclados e o respectivo traço de referência. Os traços escolhidos estão apresentados na Tabela 28. A influência de cada tipo de fração granulométrica foi avaliada separadamente no ensaio de perda de abatimento. Nos três traços foram usadas as quantidades de material definidas para os traços unitários apresentados no item 4.8.3. Todavia, nesta etapa do estudo, para o ensaio de perda de abatimento com os traços com agregado

reciclado não foi realizada a pré-umidificação do agregado. Ao contrário, mais água foi acrescentada à mistura até que se alcançasse a trabalhabilidade desejada de 70 ± 10 mm.

Tabela 28 Traços escolhidos para o ensaio de perda de abatimento

Traço nº	Relação a/c	% AMR	% AGR
18	0,60	0	0
09	0,60	50	0
11	0,60	0	50

4.2.2.3 Trabalhabilidade e perda de trabalhabilidade dos concretos reciclados medidas através do abatimento do tronco de cone e do ensaio VeBe

Inicialmente, observou-se que os resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone (item 5.2.1) apresentaram alta variabilidade, seja para os concretos de referência, seja para os concretos reciclados. Além disso, observou-se que, mesmo apresentando valores de abatimento muito baixos, uma vez que as misturas não possuíssem altos teores de substituição de ambas frações de agregados reciclados, os concretos produzidos eram perfeitamente adensáveis, ou seja, concluiu-se que seria interessante introduzir, na medida da trabalhabilidade, um componente dinâmico. Por outro lado, a perda de trabalhabilidade dos concretos reciclados se apresenta ainda como uma incógnita, uma vez que as investigações realizadas demonstram que cada fração de agregado se comporta de maneira distinta nas misturas de concreto (item 5.2.2). Desta forma, com o intuito de aumentar o conhecimento no âmbito da trabalhabilidade dos concretos reciclados, optou-se por realizar um terceiro estudo exploratório da trabalhabilidade e da perda de trabalhabilidade de alguns traços de concreto com e sem agregados reciclados, utilizando-se para medir esta propriedade o ensaio do abatimento do tronco de cone e o ensaio VeBe. O primeiro é amplamente conhecido e utilizado para o controle da produção de concretos, no entanto só avalia a mistura do ponto de vista estático. O segundo, com um uso menos difundido, consegue avaliar a capacidade de compactabilidade de misturas de concreto, como foi discutido no esquema apresentado na Figura 9.

A seguir estão apresentadas as relações a/c e os traços utilizados nesta etapa do trabalho, para os quais foram realizados os ensaios adicionais de abatimento e VeBe.

- Relação a/c: 0,40; 0,60 e 0,80;
- Traços: → Referência

→ 50 % AMR / 0 % AGR

→ 0 % AMR / 50 % AGR

→ 50 % AMR / 50 % AGR

→ 100 % AMR / 100 % AGR

4.2.2.3.1 *Procedimento do ensaio*

O ensaio de abatimento do tronco de cone para as misturas de concreto avaliadas foi realizado como prescreve a NBR 7223 (1982).

Para realização do ensaio VeBe foi seguido o seguinte procedimento:

- Moldou-se um tronco de cone, de acordo com os procedimentos prescritos na NBR 7223 (1982), dentro de um molde cilíndrico de 24 cm de diâmetro e 20 cm de altura, instalado sobre uma mesa vibratória;
- Retirou-se o molde tronco-cônico e em seguida colocou-se um disco de acrílico transparente sobre o tronco de cone moldado;
- A mesa vibratória foi então acionada e foi medido o tempo necessário para que todo o ar existente entre o disco e a massa de concreto houvesse saído.

A trabalhabilidade do concreto é expressa com base neste tempo de vibração, em segundos.

A avaliação da perda de trabalhabilidade foi realizada com base na NBR 10348 (1992), que prescreve o ensaio de perda de abatimento de concretos. É importante salientar que como os dois ensaios foram realizados no mesmo instante para a mesma amostra de concreto, o tempo de duração do ensaio de perda de abatimento prescrito na norma não foi seguido. Na verdade foi realizada uma adaptação do procedimento da NBR 10348 (1992) para que os dois ensaios fossem realizados em uma só mistura de cada traço de concreto.

Desta forma a duração do ensaio foi estabelecida como suficiente para que se realizassem 5 determinações tanto do abatimento, quanto do tempo de vibração VeBe. Assim, os ensaios duraram em média cerca de 85 minutos desde o instante inicial de adição do cimento até a última determinação. Vale a pena mencionar que primeiro foi realizada a medida do abatimento e em seguida a medida do tempo de vibração VeBe.

4.2.2.3.2 *Produção dos concretos*

A mistura dos concretos de referência seguiu a ordem normalmente utilizada para produção de concretos convencionais (agregado graúdo - água - cimento - agregado miúdo). Após a mistura foi realizada a medida do abatimento e do tempo VeBe.

Para os concretos reciclados houve uma pequena modificação durante a produção dos traços. Para este ensaio também a taxa de absorção do agregado reciclado foi parcialmente compensada, como está descrito e justificado no item 4.7.2.1.3. Deste modo, os agregados reciclados foram pré-umidificados 10 minutos antes da sua mistura na betoneira. Em seguida foi realizada a mistura do concreto, como descrito no item 4.9.1. O abatimento do concreto e o tempo de vibração VeBe foram determinados neste instante. Assim como ocorreu na produção dos concretos para execução do ensaio de perda de abatimento descrito no item 5.2.2, também para execução dos concretos reciclados desta fase não foi utilizado aditivo superplastificante. Entretanto, foi adicionada mais água às misturas de concreto reciclado para que estas atingissem o mesmo tempo de vibração VeBe do concreto de referência.

O tempo de vibração VeBe foi escolhido como parâmetro para controlar a trabalhabilidade dos concretos pois, como foi no item 5.2.1, o ensaio de abatimento do tronco de cone apresentou uma variabilidade muito alta, tanto para o concreto reciclado quanto para o concreto de referência. Além disso, foi observado que os concretos reciclados, apesar de apresentarem baixos valores de abatimento, apresentavam maior facilidade de adensamento. Deste modo seria mais interessante avaliar a trabalhabilidade destas misturas inserindo uma componente dinâmica na sua determinação.

Após a adição de água aos concretos foi feita mais uma determinação tanto do abatimento do tronco de cone quanto do tempo de vibração VeBe. Contudo, é importante ressaltar que esse procedimento não pôde ser seguido para os traços de concreto reciclado com 50 % e 100 % de substituição de ambas frações de agregados, uma vez que, na primeira mistura, estes concretos apresentaram-se muito ásperos e sem coesão, o que dificultaria muito a moldagem do tronco de cone e também da medida do tempo de vibração VeBe. Assim, já neste instante, foi acrescentada mais água a estas misturas de concreto.

A partir deste momento procedia-se conforme a recomendação da NBR 10348 (1992), ou seja, realizava-se a mistura do concreto por 1 minuto, deixava-se em repouso por 10 minutos e misturava-se novamente por 2 minutos. Em seguida, eram realizadas as determinações do abatimento e do tempo

VeBe correspondentes. Como foi dito, o ensaio foi realizado até que se fizessem 5 determinações para cada traço .

Para os traços com agregados reciclados, após o ajuste da água, foram moldados dois corpos-de-prova cilíndricos de 10x20 cm e realizados ensaios de determinação da resistência à compressão axial, com o objetivo de avaliar a possível perda de resistência devido ao aumento da relação a/c das misturas de concreto reciclado.

4.2.3 Resistência à compressão axial

Os corpos-de-prova de concreto foram ensaiados de acordo com a NBR 5739 (1994) – “Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos – Método de ensaio”, nas idades definidas no programa experimental. Antes do ensaio, os corpos-de-prova foram capeados com enxofre, para que houvesse uma regularização das superfícies de aplicação de carga. Para cada idade foram ensaiados 2 exemplares por traço de concreto.

4.2.4 Resistência à tração na flexão

Completada a idade de cura (28dias), os corpos-de-prova prismáticos foram marcados e ensaiados como prescreve a NBR 12142 (1994) – “Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos – Método de ensaio”. Após a ruptura dos corpos-de-prova foram realizadas as medidas das dimensões da secção de ruptura do corpo-de-prova, como especifica a Norma. Para esta propriedade foi ensaiado 1 exemplar por traço de concreto executado.

4.2.5 Resistência à tração por compressão diametral

A determinação da resistência à tração por compressão diametral foi realizada de acordo com a especificação da NBR 7222 (1994) – “Argamassa e Concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos”. O ensaio foi realizado em dois exemplares de cada traço.

4.2.6 Módulo de deformação

O ensaio para determinação do módulo de deformação dos concretos foi realizado como prescreve a NBR 8522 (1983) – “Concreto – determinação do módulo de deformação estática e diagrama - tensão-deformação – Método de ensaio”.

De acordo com a norma foi adotado, para a realização do ensaio, o plano de carga III. Conforme este plano de carga, a aplicação do carregamento deve ser realizada de forma crescente a uma velocidade de $0,50 \pm 0,05$ MPa/s. Foi adotado um intervalo de tempo de 60 segundos para realização das medidas de deformação. O carregamento foi mantido à velocidade constante até a ruptura do corpo-de-prova.

Para a determinação das deformações foram utilizados três métodos:

- Extensômetro elétrico
- LVDT – Transformador diferencial variável linear
- Extensômetro mecânico

O sistema de LVDT e extensômetro mecânico possuem precisão de 0,01 mm e medem o deslocamento entre dois anéis paralelos que são fixados ao corpo-de-prova (Figura 11a). O extensômetro elétrico fornece a deformação do corpo-de-prova com precisão de 10^{-6} , sendo colado à superfície do material sobre uma base adesiva lisa e depois executada a ligação dos extensômetros aos circuitos e conexão ao aquisitor de dados para execução do ensaio (Figura 11b).

Para o extensômetro elétrico e o LVDT foi feita aquisição direta dos dados em computador, as leituras foram gravadas manualmente ao fim de cada intervalo de aplicação de carga e também foram efetuadas as leituras no extensômetro mecânico.

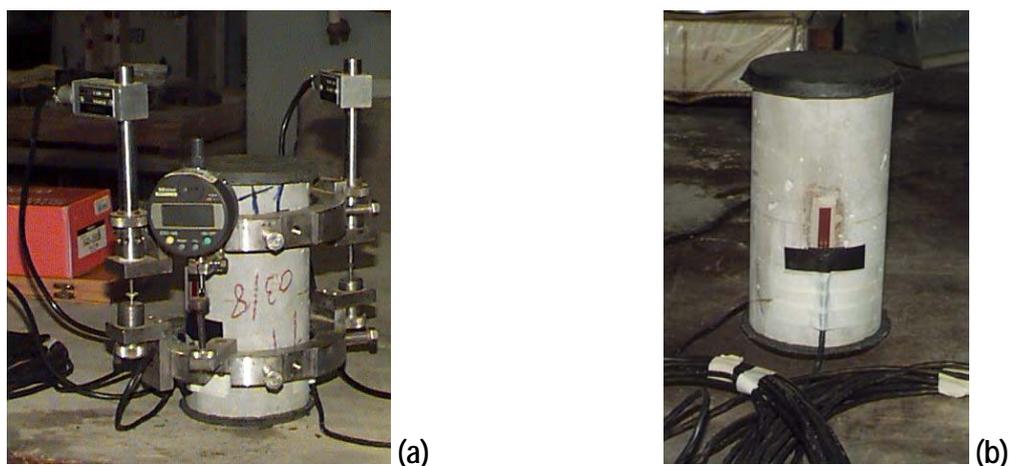


Figura 11 a) Sistemas para medida de deformação em corpos-de-prova de concreto. b) Extensômetro elétrico e circuitos para posterior conexão ao aquisitor de dados

4.2.7 Investigação da microestrutura dos concretos

Como já foi mencionado anteriormente, visando analisar a zona de transição entre o agregado e a pasta do concreto, foi realizado um estudo na microestrutura do material, com o objetivo de oferecer maior embasamento às conclusões sobre a influência do agregado reciclado nas propriedades mecânicas do concreto.

Para análise da microestrutura optou-se por fazer ensaios nas amostras de concreto de apenas uma idade de referência, já que o número de amostras para todo o espaço amostral seria muito grande. A idade adotada foi de 28 dias, por ser um padrão normalmente adotado para todos os ensaios mecânicos em concreto.

Adotou-se o percentual de 50 % de substituição, tanto do agregado reciclado graúdo, quanto do miúdo. No que se refere à relação *a/c*, adotou-se o valor 0,60 por ser este um valor usual para concretos com resistência média comumente utilizados em estruturas de concreto.

Foi definido ainda que seriam analisadas as interfaces dos três tipos de componentes que predominam no agregado reciclado de resíduo de construção e demolição: agregado reciclado de argamassa, agregado reciclado de concreto e agregado reciclado de material cerâmico. Na Tabela 29 estão apresentados os tipos e quantidades de amostras preparadas para a avaliação da microestrutura.

Tabela 29 Quantidade de amostras para ensaios de microestrutura

	Agregado de argamassa	Agregado de concreto	Agregado de material cerâmico	Concreto de referência	Nº total de amostras
Elétrons Retroespalhados	1	1	1	1	4
Elétrons Secundários	1	1	1	1	4
Total	2	2	2	2	8

4.3 DEFINIÇÃO E COLETA DA AMOSTRA DE RESÍDUO

O resíduo de construção possui uma composição bastante diversificada, como foi visto no capítulo 2, e sua separação no local de beneficiamento é uma prática difícil e onerosa. Sendo assim, optou-se por utilizá-lo no estado como ele sai da obra.

A amostra de resíduo para realização deste estudo foi coletada no Aterro de Inertes da Zona Sul, da cidade de Porto Alegre, pois a cidade não dispõe de uma usina de reciclagem de resíduo de construção e demolição. Como este local se destina a receber todo tipo de material inerte gerado na

cidade, o resíduo do setor de construção pode ser proveniente tanto da etapa de construção, propriamente, quanto de demolição.

Assim, a composição do resíduo pode apresentar os seguintes materiais: material cerâmico (blocos, tijolos, telhas, revestimento de piso e parede), argamassa (revestimento e assentamento), concreto e pedras naturais. Durante o beneficiamento da amostra em laboratório foram descartados papel, papelão, madeira, barras de aço, vidros, ou quaisquer outras impurezas que pudessem afetar o desempenho do concreto de forma mais significativa.

A definição do tamanho da amostra a ser coletada foi feita objetivando a obtenção de um lote que pudesse ser representativo do universo da cidade de Porto Alegre. Para realização da coleta foi feita a separação de todo resíduo de construção e demolição que chegou ao Aterro de Inertes da Zona Sul durante uma semana. Foram então selecionadas 28 cargas de resíduo, 140 m³ aproximadamente (valor correspondente a cerca de 9 % do índice deste resíduo coletado em Porto Alegre apresentado na Tabela 1), que ficaram estocadas em um local separado no próprio aterro (Figura 12). Esta seleção foi feita através de análise visual do material e de informações da pessoa que fazia o transporte do material, com o objetivo de descartar todo material que possuísse uma quantidade grande de matéria orgânica, que poderia inviabilizar a utilização do resíduo, principalmente da fração fina.



Figura 12 Seleção e estocagem do lote de resíduos no Aterro da Zona Sul de Porto Alegre

Feita a separação do lote de resíduo, do qual sairia a amostra a ser utilizada na pesquisa, procedeu-se à mistura e homogeneização do material com a ajuda de uma retroescavadeira (Figura 13a). Terminada esta tarefa, foi definida uma amostra de aproximadamente 6000 kg (Figura 13b), tamanho que foi julgado satisfatório para atender às necessidades da pesquisa, visto que foram necessários aproximadamente 2000 kg de material britado para a realização dos ensaios.

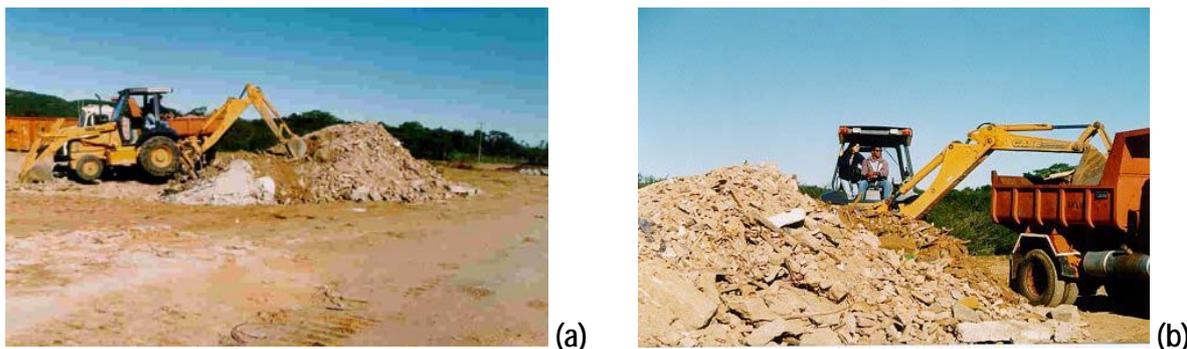


Figura 13 Detalhes da coleta da amostra de resíduo. a) Mistura e homogeneização do material no aterro. b) Coleta da amostra para posterior transporte

A amostra coletada foi transportada até o Campus Centro da UFRGS, onde foi depositada (Figura 14), para posterior separação, britagem e peneiramento do material.



Figura 14 Deposição da amostra de resíduo no Campus centro da UFRGS

4.4 BENEFICIAMENTO DO RESÍDUO

Após a coleta da amostra de resíduo, teve início a etapa de beneficiamento do material, ou seja, todo o material foi separado manualmente e britado em britadores de pequeno porte. Apesar de todos os cuidados na separação das cargas de resíduos que chegavam ao aterro, o material separado para a pesquisa apresentou ainda uma quantidade de contaminantes muito grande. Deste modo, antes da britagem, foi realizada uma triagem no material para retirada de impurezas como papel, papelão, plásticos, madeira, gesso, vidros, barras de aço, terra, entre outras. Inclusive em alguns momentos, principalmente na fase final da britagem, o material a ser beneficiado necessitou ser lavado, pois a quantidade de terra aderida ao resíduo era grande.

Para a britagem do material foram utilizados dois tipos de equipamentos:

- Britadores de mandíbula: foram usados britadores de duas granulometrias distintas. Primeiro a amostra foi passada num britador que reduzia o material a um diâmetro máximo de

aproximadamente 50 mm (Figura 15a). Em seguida, todo o material foi passado em outro britador no qual se obtinham partículas de diâmetro máximo de aproximadamente 32 mm (Figura 15b).

- Britador de impacto ou de rolos: esse britador permite ajustar o afastamento máximo entre os rolos, sendo produzidos nele desde os agregados graúdos, até os miúdos. Em ambos os casos, o material já havia passado pelo britador de mandíbulas de graduação mais grossa.



Figura 15 a) Britador de mandíbulas para produção de agregados com graduações maiores. b) Britador de mandíbulas para produção de agregados de graduações menores

Terminada a britagem, o material foi peneirado em peneirador mecânico. Posteriormente, foi acondicionado separadamente todo material passante na peneira de 19 mm e retido na malha 4,8 mm classificado como agregado graúdo, e todo o material passante na malha de 4,8 mm classificado como agregado miúdo.

Como existia a necessidade de uma grande quantidade de material britado (aproximadamente 2000 kg), tanto o britador de mandíbulas, quanto o de rolos, foram utilizados na produção de agregado graúdo. Então, para minimizar o efeito de uma variabilidade ainda maior na granulometria do material devido ao tipo de britador utilizado, todo agregado graúdo reciclado foi remisturado e, por fim, acondicionado em silos de armazenagem de material.

4.5 DEFINIÇÃO DA FAIXA GRANULOMÉTRICA PARA O AGREGADO MIÚDO RECICLADO

Como se observou um elevado teor de finos no agregado miúdo, resolveu-se fazer um estudo da melhor faixa granulométrica do agregado miúdo a ser utilizada para produção do concreto. Este estudo foi realizado em corpos-de-prova de argamassas, no qual foram avaliados o índice de consistência e a resistência à compressão alcançados.

Primeiro foram definidos os intervalos granulométricos que seriam estudados:

- Agregado miúdo reciclado passante na malha # 4,8 mm e retido na # 0,3 mm;
- Agregado miúdo reciclado passante na malha # 4,8 mm e retido na # 0,15 mm;
- Agregado miúdo reciclado passante na malha # 4,8 mm;
- Agregado miúdo reciclado passante na malha # 2,4 mm e retido na # 0,3 mm;
- Agregado miúdo reciclado passante na malha # 2,4 mm e retido na # 0,15 mm;

Em seguida foi definido o traço de referência que seria preparado com agregado miúdo natural. O traço adotado foi 1:3 em massa, com relação água/cimento de 0,5, sendo medida a consistência do mesmo, como recomenda a NBR 7215 (1996) – Anexo B.

Para elaboração do traço com agregado reciclado, foi estabelecido o traço em volume com base nos valores das massas específicas dos agregados, visto que o agregado reciclado possui massa específica inferior à do agregado natural. Deste modo, se houvesse simples substituição da massa de agregado natural por agregado reciclado, o volume de argamassa com material reciclado seria maior, necessitando de maior quantidade de água e cimento para produzir misturas equivalentes à mistura de referência, em consistência e resistência mecânica.

As massas específicas dos agregados utilizados são:

- Agregado miúdo natural: $\gamma_{amn} = 2,63 \text{ kg/dm}^3$
- Agregado miúdo reciclado: $\gamma_{amr} = 2,41 \text{ kg/dm}^3$

A compensação do volume do material foi feita utilizando-se a equação 4.1.

$$M_{amr} = M_{amn} * \frac{\gamma_{amr}}{\gamma_{amn}} \quad [4.1]$$

onde:

M_{amr} = Massa do agregado miúdo reciclado (kg)

M_{amn} = Massa do agregado miúdo natural (kg)

γ_{amr} = Massa específica do agregado miúdo reciclado (kg/dm³)

γ_{amn} = Massa específica do agregado miúdo natural (kg/dm³)

Os traços utilizados estão apresentados na Tabela 30.

Tabela 30 Traços e quantidades de materiais utilizados na definição da faixa granulométrica do agregado miúdo reciclado

Quantidade de materiais (g)						
Cimento	Areia		Água	Relação a/c	Traço em massa	Tipo de traço
	Natural	Reciclada				
624	1872	-	312	0,50	1:3	Referência
624	-	1715,4	374,4	0,60	1:2,75	Reciclado

Como pode ser observado na Tabela 30, o traço com agregado miúdo reciclado teve sua relação a/c modificada para 0,60. Isso se deve à baixíssima fluidez apresentada com os traços executados com material reciclado e relação a/c 0,5. Na Figura 16 a e b pode ser visualizado o aspecto da consistência da argamassa de referência e da argamassa com material reciclado e relação a/c 0,50. Observa-se que a argamassa com agregado reciclado apresenta um aspecto extremamente seco, sem coesão. Assim, optou-se por executar novos traços com agregado miúdo reciclado, porém utilizando-se uma relação a/c maior. O traço de referência com relação a/c 0,60 não foi produzido, pois com a adição de água ao traço original, para a mesma quantidade de agregado natural, a argamassa ficaria muito fluida.



(a)



(b)

Figura 16 Medida do índice de consistência de argamassas: a) argamassa de referência, relação a/c=0,50; b) argamassa reciclada, relação a/c=0,50

Os resultados obtidos com o ensaio estão apresentados na Tabela 31. Durante a produção das argamassas pôde-se perceber que os traços com agregado reciclado que apresentaram melhor aspecto foram os traços com maior teor de finos, ou seja, o traço que incluiu a faixa de material passante na malha # 4,8 mm e retido na malha # 0,15mm, e o traço que incluiu a faixa de material passante na malha # 4,8 mm. Acredita-se que a maior quantidade de finos, apesar de acarretar maior

demanda de água, pode ajudar a diminuir a aspereza da mistura; junto com o cimento os finos reciclados contribuem como pasta, lubrificam os grãos dos agregados e melhoram a trabalhabilidade das misturas. O melhor desempenho mecânico foi observado na argamassa reciclada que utilizou todo material passante na malha # 4,8 mm.

Tabela 31 Resultados obtidos com as argamassas para escolha da melhor faixa granulométrica de agregado miúdo reciclado a ser usada

Tipo de agregado miúdo	Relação a/c	Consistência (mm)	Resistência à Compressão 28 dias (MPa)			Média (Mpa)
Natural	0,50	384	25,2	24,4	24,7	24,8
0,30 < reciclado < 4,8	0,60	285	19,4	19,5	14,7	17,9
0,15 < reciclado < 4,8	0,60	300	13,3	14,0	20,0	15,8
reciclado < 4,8	0,60	257	22,0	21,9	-	22,0
0,30 < reciclado < 2,4	0,60	251	12,3	17,6	18,0	16,0
0,15 < reciclado < 2,4	0,60	268	20,1	15,9	16,0	17,3

Com os resultados obtidos e as observações realizadas durante a execução das argamassas, optou-se por não considerar a consistência como parâmetro para escolha da melhor faixa granulométrica, pois verificou-se que nem sempre o menor índice de consistência significava uma argamassa imprópria para o manuseio. Deve ser levado em consideração, no caso do agregado reciclado, que a forma e a textura dos grãos podem influenciar muito as medidas de consistência e trabalhabilidade geralmente usadas para materiais convencionais.

Assim, foi adotada como melhor faixa granulométrica para o agregado miúdo reciclado todo o material passante na malha # 4,8 mm, pois para esta faixa granulométrica foram obtidos os maiores resultados de resistência à compressão. Além dos fatores apontados acima, a utilização desta faixa contribui como facilitador do processo de peneiramento do agregado reciclado e, por consequência, permite ainda que se facilite o processo de beneficiamento do resíduo, diminuindo também custos. Outro aspecto importante é que toda a fração de agregado reciclado produzido foi utilizada, não havendo necessidade de descarte de material para o meio ambiente.

4.6 DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO

Como foi mencionado no item 2.5, a composição do resíduo de construção e demolição é muito importante na análise da influência do comportamento deste material para produção de concreto. No presente trabalho, a determinação da composição do resíduo foi feita após o beneficiamento do mesmo. Sendo assim, a determinação foi realizada somente para os agregados graúdos, visto que para os grãos de menor dimensão seria impossível identificar "a olho nu" de qual tipo de material se tratava.

Na análise da composição do resíduo de construção foram encontrados os seguintes constituintes:

- Concreto: todo material composto por cimento, areia e brita cuja identificação não deixasse dúvidas;
- Material cerâmico: todo material cerâmico polido, ou não, constituído de blocos, tijolos, telhas, revestimento cerâmico de piso e parede, ladrilhos, entre outros;
- Argamassa: parcela de material constituído de cimento e/ou cal e areia sem a presença de agregado graúdo ou pedrisco;
- Rochas naturais: qualquer tipo de fragmento de rocha natural que foi usado, ou não, e que não apresente nenhum tipo de material aglomerante;
- Outros: todos as partículas de material como papel, madeira, metal, plástico, têxteis, amianto, entre outros.

Após concluída a separação do material, cada fração foi pesada e a partir dos resultados das massas obtidas determinou-se a porcentagem de cada constituinte do resíduo, como está apresentado na Tabela 32.

Tabela 32 Constituintes percentuais do resíduo de construção e demolição da amostra coletada no Aterro de Inertes da Zona Sul de Porto Alegre

Constituinte		Amostra 1 (%)	Amostra 2 (%)	Valor Médio (%)
Argamassa		25,91	30,62	28,26
Concreto		15,88	14,49	15,18
Material cerâmico		25,89	26,77	26,33
Rocha Natural	Arenito	14,19	11,28	12,74
	Outros	17,75	16,44	17,10
Outros		0,39	0,39	0,39
Total		100	100	100

Observou-se que, na separação do material cerâmico, apenas uma pequena parte era proveniente de cerâmica polida, cerca de 0,54 % do total, assim optou-se por não apresentar o resultado deste constituinte separado devido à sua pequena ocorrência. Pode ser visto também que a maior parte da composição do resíduo é de rocha natural, se forem somadas as porcentagens do arenito de piso encontrado e de outras rochas. A separação deste tipo de constituinte foi feita pois

observou-se uma quantidade de arenito de piso muito grande na amostra. A Figura 17 apresenta a distribuição da composição do resíduo estudado.

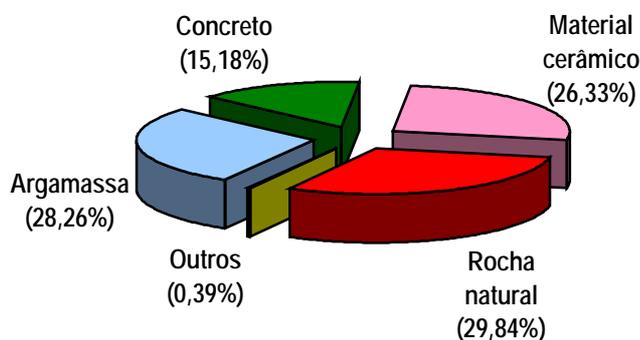


Figura 17 Distribuição da composição média dos resíduos de construção e demolição coletados no Aterro de Inertes da Zona Sul de Porto Alegre

Através da Figura 17 pode ser observada a distribuição de cada constituinte na composição do resíduo. Os resultados mostram ainda uma elevada incidência de argamassa, seguida de material cerâmico e concreto. A ocorrência de um grande percentual de argamassa na composição dos resíduos de construção e demolição já havia sido apontada em outros estudos no Brasil, como os de PINTO(1986), ZORDAN (1997), LATTERZA (1998) e CARNEIRO et al. (2000), observados no item 2.5.2. Este fato também foi comprovado com o levantamento das perdas na construção (Tabela 2), no qual a argamassa e seus insumos apresentaram índices bastante elevados.

4.7 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.7.1 Cimento

Para produção dos concretos optou-se por utilizar o Cimento Portland Comum CP I S – 32. A opção por este tipo de cimento foi feita por que ele possui um teor de adição muito baixo (1 – 5 % de material pozolânico + material carbonático + escória) segundo a NBR 5732 (1991), podendo ter a influência destas adições desprezada quando da análise dos resultados.

As características químicas, físicas e mecânicas do cimento utilizado estão apresentadas na Tabela 33.

Utilizando-se este cimento, qualquer influência que o material reciclado pudesse exercer sobre as propriedades mecânicas do concreto poderia ser detectada. Além disso, a utilização deste cimento permite a reprodução desta pesquisa em qualquer região do país.

Tabela 33 Propriedades químicas, físicas e mecânicas do Cimento Portland CP I S – classe 32

Propriedades químicas do CP I S – classe 32			
Composição química do cimento	Resultados	Método de ensaio	Limites da NBR 5732 (1991)
Al ₂ O ₃ (%)	4,26	NBR 5749 (1976)	≤ 4,0
SiO ₂ (%)	18,49	NBR 5749 (1976)	-
Fe ₂ O ₃ (%)	3,06	NBR 5749 (1976)	-
CaO (%)	61,20	NBR 5749 (1976)	-
MgO (%)	4,96	NBR 5749 (1976)	≤ 6,5
SO ₃ (%)	2,61	NBR 5745 (1989)	≤ 4,0
Perda ao Fogo (%)	3,25	NBR 5743 (1989)	≤ 4,5
CaO livre (%)	2,02	NBR 5747 (1989)	-
Resíduos Insolúveis (%)	0,67	NBR 5744 (1991)	≤ 5,0
Equivalentes alcalinos (%)	0,48	-	-
Propriedades físicas do CP I S – classe 32			
Expansibilidade a quente (mm)	0,50	NBR 3435 (1991)	≤ 5
Tempo de Pega (min)	Início	165	NBR 3434 (1991)
	Final	240	
Consistência normal (%)	27,5	NBR 3433 (1991)	-
Blaine (cm ² /g)	3255	NBR 7224 (1984)	≥ 2800
# 200 (%)	1,30	-	≤ 12
# 325 (%)	8,30	-	-
Massa específica (kg/dm ³)	3,11	NBR 6474 (1984)	-
Resistência à Compressão (MPa)	1 dia	14,1	NBR 7215 (1996)
	3 dias	27,5	
	7 dias	33,4	
	28 dias	43,3	
			≥ 10
			≥ 20
			≥ 32

Fonte: Companhia de Cimento Itambé – Relatório de Ensaio, período Junho/99

4.7.2 Agregados

Agregado miúdo natural: Utilizou-se areia quartzosa proveniente do Rio Jacuí/RS. Todo o material foi previamente seco ao ar e em seguida peneirado na malha de # 4,8 mm, sendo retirada assim toda fração superior a este valor.

Agregado miúdo reciclado: A obtenção deste material se deu pela britagem e peneiramento do resíduo de construção e demolição coletado. Foi utilizado como agregado miúdo toda a fração passante na peneira de malha # 4,8 mm (Figura 18a). Tal escolha foi feita com base nos resultados apresentados no item 4.5.

Agregado graúdo natural: como agregado graúdo utilizou-se brita de origem basáltica. O diâmetro máximo adotado foi de 19 mm. Este agregado era lavado para retirada de todo material pulverulento, ou qualquer outra impureza que o mesmo pudesse conter, e colocado para secar ao ar.

Agregado graúdo reciclado: Este agregado foi obtido com a britagem e peneiramento do resíduo de construção coletado. A faixa granulométrica adotada foi a do material que passava pela peneira de malha # 19 mm e ficava retido na peneira de malha # 4,8 mm (Figura 18b). Diferente do agregado natural, o material reciclado não pode ser lavado devido à sua facilidade de desagregação, então ele foi usado no estado em que se encontrava depois de peneirado.



Figura 18 Aspecto geral dos agregados reciclados: a) Agregado miúdo; b) Agregado graúdo

4.7.2.1 Propriedades dos agregados

4.7.2.1.1 Composição granulométrica

Foi realizado o estudo da composição granulométrica dos agregados, tanto natural quanto reciclado, miúdo e graúdo, de acordo com as especificações da NBR 7217 (1987).

Os resultados da composição granulométrica dos agregados estão apresentados na Tabela 34 e na Tabela 35.

Quanto maior o módulo de finura dos agregados, maior é o tamanho de suas partículas, o que diminui a superfície específica dos agregados e, por consequência, a necessidade de pasta para lubrificar os grãos. O agregado miúdo reciclado apresentou módulo de finura semelhante ao do agregado natural. Mas isso não é suficiente para afirmar que os agregados são iguais pois a distribuição granulométrica dos dois materiais são bem diferentes, por exemplo. De acordo com o resultado do módulo de finura, seria possível dizer que a demanda de água para o agregado miúdo reciclado deveria ser igual a do agregado natural, no entanto outras propriedades também devem ser levadas em consideração quando se analisa a quantidade de água necessária para as misturas, como por exemplo o formato e a textura das partículas.

Tabela 34 Composição granulométrica do agregado miúdo natural e reciclado

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

Tabela 35 Composição granulométrica do agregado graúdo natural e reciclado

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

O agregado graúdo reciclado apresentou módulo de finura um pouco menor que o agregado natural. Assim, contrário ao que acontece com o agregado miúdo, a fração mais grossa do material reciclado necessita de mais água para molhar a sua superfície específica que o agregado graúdo natural. Contudo, deve-se salientar que a diferença é muito pequena. Além disso, a composição granulométrica do agregado graúdo reciclado não se encaixou dentro da faixa da composição do agregado de graduação 1 (Brita 1) e também em nenhuma das outras graduações prescritas pela NBR 7211 (1983) que fornece a especificação para agregados para concreto. Apesar disso, o agregado graúdo reciclado foi usado sem manipulações em sua granulometria, pois o intuito era utilizar o agregado no estado em que ele era produzido, com o mínimo de beneficiamento possível.

Os resultados de módulo de finura dos agregados reciclados encontrados nesta pesquisa são contrários à tendência de granulometria mais grossa do material reciclado apontada pela bibliografia. Considera-se que o sistema de beneficiamento dos resíduos e a sua composição devem ter influência direta sobre os resultados obtidos.

Os gráficos com as curvas granulométricas para os agregados miúdo e gráudo estão apresentados na Figura 19 e na Figura 20, respectivamente.

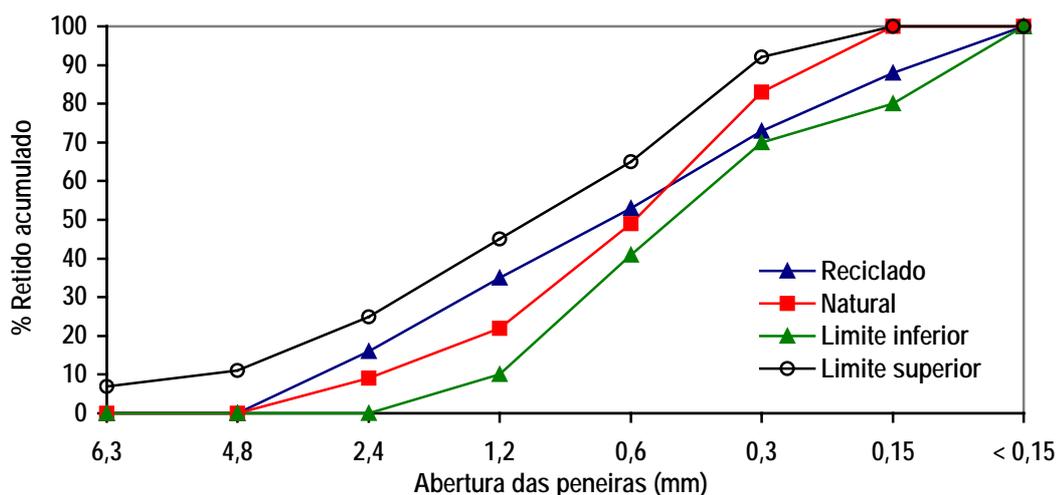


Figura 19 Curvas granulométricas dos agregados miúdos natural e reciclado e respectivos limites inferior e superior da areia média especificada pela NBR 7211 (1983)

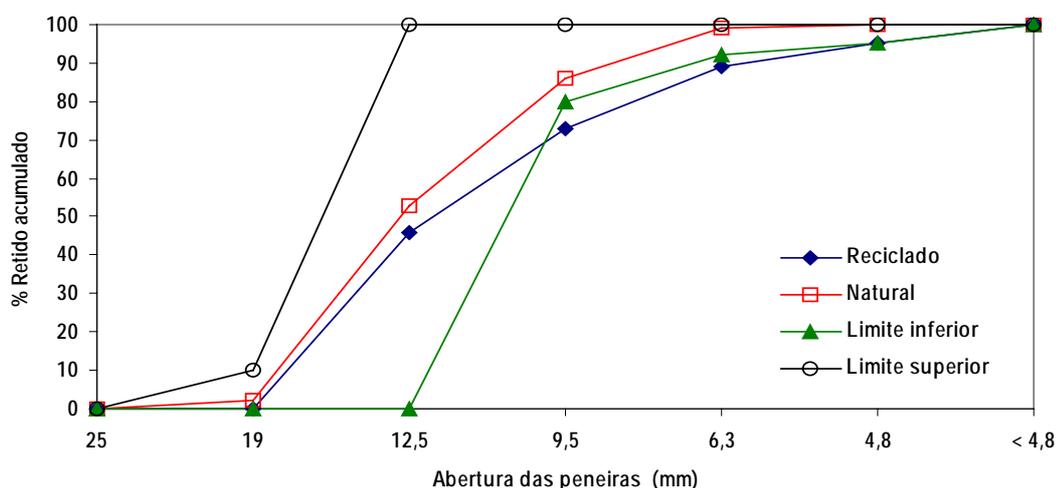


Figura 20 Curvas granulométricas dos agregados gráudos natural e reciclado e respectivos limites inferior e superior da brita 1 especificada pela NBR 7211 (1983)

Tanto para o agregado miúdo, quanto para o agregado gráudo reciclado, as curvas evidenciaram materiais de granulometria contínua. Para a produção de concretos isso é desejável, pois permite um melhor arranjo entre as partículas do agregado, aumentando o efeito de empacotamento

entre os grãos. Além disso os agregados com granulometria contínua são muito bons para o uso em concretos bombeados (NEVILLE, 1995).

No resultado de composição granulométrica dos agregados miúdos reciclados observa-se ainda que o percentual de material fino passante na peneira # 0,15 mm é bastante elevado, para esta amostra ficando em torno de 11,5 %. Por esse motivo foi realizada, também, uma análise de granulometria a laser de duas amostras de agregado miúdo reciclado passantes na malha de abertura # 0,15 mm. E também foi feita a mesma análise para uma amostra de CP I S – 32 com o objetivo de comparar os resultados. Os resultados das composições granulométricas das amostras estão apresentadas no ANEXO 2.

Com relação aos resultados apresentados, o material reciclado passante na peneira # 0,15 mm apresenta um diâmetro médio de 54,98 μm e 90 % dos grãos são menores que 123,14 μm . Segundo NEVILLE (1995), todo material com dimensão menor que 125 μm é considerado como ultrafino. Deste modo, o agregado miúdo reciclado possui uma quantidade razoável de material ultrafino. O autor menciona que não há um limite para estes materiais, mas a sua presença é muito importante quando se produz concretos bombeados, concretos para peças muito delgadas, ou armadas e concretos estanques a água. Os ultrafinos são principalmente prejudiciais para os concretos que devem apresentar boa resistência aos ciclos de gelo/degelo, assim como resistência à perda por abrasão. Comparando os resultados da amostra de material cerâmico com a amostra de cimento observa-se que o diâmetro médio do agregado reciclado passante na peneira # 0,15 mm é cerca de 5,5 vezes maior que o diâmetro médio do cimento CP I S – 32, cujo valor é 10,07 μm .

De acordo com NEVILLE (1995), a composição granulométrica dos agregados possui maior influência sobre a trabalhabilidade dos concretos do que sobre sua resistência mecânica propriamente dita. Entretanto, é importante salientar que a resistência do concreto está intimamente relacionada com o adensamento das misturas, e que quanto mais denso, mais resistente é o concreto. Se a mistura não apresenta boa trabalhabilidade o adensamento fica comprometido, afetando a resistência do concreto. O autor afirma que a composição granulométrica exerce grande influência sobre a área superficial do agregado, fator determinante na quantidade de água necessária para a molhagem completa dos sólidos da mistura; que altera o volume relativo ocupado pelo agregado; a trabalhabilidade da mistura; e a segregação.

Com relação à segregação, NEVILLE (1995) enfatiza que os agregados devem possuir quantidades razoáveis de material fino menor que 0,30 mm para que as misturas de concreto fiquem

menos ásperas. Desta forma, pode-se concluir que os concretos com agregado miúdo reciclado tendem a segregar menos que os concretos produzidos com areias naturais em virtude da sua maior quantidade de finos.

É interessante enfatizar, ainda, que essa grande quantidade de finos presente no agregado miúdo reciclado pode diminuir a durabilidade dos concretos produzidos, do ponto de vista da resistência ao desgaste por abrasão.

4.7.2.1.2 *Massa específica e massa unitária*

A determinação da massa específica dos materiais é muito importante para a dosagem de concreto, pois conhecendo o seu resultado é possível calcular o consumo de materiais utilizados para produção das misturas. A massa específica do material pode ser definida como a massa do material por unidade de volume, incluindo os vazios internos do mesmo.

A massa específica dos agregados miúdos, natural e reciclado foi determinada de acordo com a NBR 9776 (1987), que prescreve o uso do frasco de Chapman.

Para o agregado graúdo natural foi utilizada a prescrição da NBR 9937(1987) e determinada a massa específica do material com o auxílio de uma balança hidrostática. Porém, para o agregado graúdo reciclado constatou-se que não seria possível utilizar a norma usada para o agregado natural, pois o material reciclado é muito poroso e frágil. Devido a estas características seria muito difícil proceder à secagem superficial do material sem desagregá-lo, e muito menos ter certeza de que a água dos poros internos mais superficiais não estaria sendo retirada no processo de secagem mascarando, por consequência, os resultados a serem obtidos.

Assim sendo, buscou-se na bibliografia um método que pudesse ajudar na determinação desta propriedade para o agregado graúdo reciclado e que fornecesse resultados confiáveis. Decidiu-se adaptar, para o agregado reciclado, um método proposto por NEVILLE (1995) para determinação da massa específica de agregados convencionais. Adotou-se portanto o procedimento descrito a seguir:

- Utiliza-se um recipiente de volume conhecido, um balão volumétrico, ou um picnômetro com dimensão e capacidade compatíveis ao diâmetro máximo e tamanho da amostra de agregado graúdo utilizada;

- Preenche-se o recipiente totalmente com água, com o auxílio de uma placa de vidro colocada no topo do recipiente, de modo que não haja nenhuma bolha de ar e garantindo que o recipiente esteja completamente cheio. Verifica-se em seguida a massa do conjunto;
- Utiliza-se uma amostra de material seco de aproximadamente 800 g. O material é colocado para secar em estufa, a 110 °C, por 24 horas;
- Coloca-se a amostra fria no recipiente com água e, para garantir a inexistência de qualquer bolha de ar, coloca-se também a placa de vidro no topo do recipiente. Em seguida é realizada a pesagem do conjunto;
- O cálculo da massa específica é feito com o auxílio da equação 4.2 descrita a seguir:

$$\gamma = \frac{C}{B - A + C} \quad [4.2]$$

A = massa do recipiente + amostra + água

B = massa do recipiente + água

C = massa da amostra seca em estufa

Para este ensaio foi utilizado um balão volumétrico com capacidade de 1000 ml. Como o agregado reciclado possui uma porosidade muito alta, a medida "A" só foi realizada após 24 horas de imersão da amostra em água. Este procedimento foi adaptado para o agregado graúdo reciclado e está descrito em forma de Proposta de Norma no ANEXO 3.

Foi realizado também o ensaio de massa unitária do material no estado solto. A massa unitária é definida como a massa das partículas do agregado que ocupam uma unidade de volume, ou seja, o volume ocupado por partículas e vazios entre os mesmos. A massa unitária foi determinada com o agregado no estado solto, de acordo com a prescrição da NBR 7251 (1982).

Os resultados dos ensaios de massa específica e de massa unitária dos agregados estão apresentados na Tabela 36.

A massa específica do agregado reciclado miúdo é cerca de 4 % menor que a do agregado miúdo natural. Enquanto que para o agregado graúdo reciclado esta redução em relação ao natural foi

de 19 %. Vale salientar que a massa específica do agregado graúdo natural está um pouco acima da média de valores dos materiais geralmente utilizados para a produção de concreto, o que aumenta um pouco a diferença entre as massas específicas dos agregados graúdos naturais e reciclados.

Tabela 36 Resultados de massa específica e massa unitária dos agregados

Fração granulométrica	Tipo de material	Massa específica (kg/dm ³)	Relação com o natural (%)	Massa unitária (kg/dm ³)	Relação com o natural (%)
Miúdo	Natural	2,632	-	1,54	-
	Reciclado	2,529	96	1,21	79
Graúdo	Natural	3,09	-	1,61	-
	Reciclado	2,51	81	1,12	70

A massa unitária do agregado reciclado forneceu relações ainda menores quando comparados ao material natural. O agregado miúdo reciclado possui massa unitária cerca de 21 % inferior à do agregado miúdo natural. Para o agregado graúdo a diferença é ainda maior, a sua massa unitária é 30 % inferior.

Os resultados confirmam a menor densidade do material reciclado apontada pela bibliografia. Confirmam ainda a necessidade da compensação das massas de material reciclado a serem utilizados nos traços de concreto para que não haja diferenças muito grandes nos volumes de material quando os traços de concretos convencionais forem utilizados para misturas com agregados reciclados.

4.7.2.1.3 Absorção de água dos agregados

Nos agregados naturais normalmente utilizados nas misturas de concreto a taxa de absorção do material geralmente tem índices muito baixos e sua influência para produção de concretos convencionais não é considerada. Mesmo para os agregados miúdos normalmente utilizados, cujos valores de taxa de absorção variam de 1 a 2,5 %, o efeito da absorção geralmente não é considerado, pois o processo se dá de forma mais lenta devido à baixa porosidade dos materiais comumente utilizados. Entretanto, quando se utiliza agregados mais porosos, como é o caso dos agregados reciclados, cuidados devem ser tomados para minimizar os efeitos de absorção, e sua quantificação merece atenção especial.

As normas para determinação das taxas de absorção dos agregados naturais miúdos e graúdos são a NBR 9777 (1987) e a NBR 9937 (1987), respectivamente. Todavia, o uso destas normas para determinação da taxa de absorção dos agregados reciclados foi dificultada devido à alta porosidade do material e à possibilidade de perda de material por desagregação do agregado graúdo e por causa da grande quantidade de finos apresentada pelo agregado miúdo. Secar superficialmente o

agregado graúdo poderia incorrer em perda do material, e no caso do agregado miúdo, que apresenta partículas muito finas, haveria uma coesão muito forte entre os grãos, dificultando a determinação da condição saturada superfície seca. Além disso, poderia ocorrer uma separação do material muito fino quando o agregado fosse completamente submerso em água, como prescreve a norma para agregado miúdo.

Deste modo, foi necessário desenvolver um método adequado para a determinação da absorção do agregado reciclado. A absorção do material reciclado foi determinada com o auxílio de um recipiente no qual a tampa e o fundo são revestidos com uma malha de 0,044 mm de abertura (Figura 21a). A amostra, seca em estufa e resfriada até a temperatura ambiente, foi colocada neste recipiente, que foi submerso em água. A partir deste instante foi monitorado o ganho de massa do material submerso com o auxílio de uma balança dotada de um dispositivo para medida hidrostática da massa com precisão de 0,1 g (Figura 21b). Antes de cada leitura o recipiente era agitado cuidadosamente para facilitar a saída do ar presente na amostra. O monitoramento do ganho de massa do material foi realizado ao longo de 24 horas, como se segue:

- até os 10 minutos iniciais: uma leitura a cada minuto;
- 10 - 30 minutos: uma leitura a cada 5 minutos;
- 30 minutos – 1 hora: uma leitura a cada 10 minutos;
- 1 - 2 horas: uma leitura a cada 15 minutos;
- a partir das 2 horas foi feita uma leitura a cada uma hora até que se completassem 9 horas depois do instante inicial;
- a última leitura foi feita passadas 24 horas da colocação da amostra em água.

Para as duas faixas granulométricas foram observados os mesmos procedimentos. Porém, para o agregado miúdo reciclado, nos 10 minutos iniciais, as leituras foram realizadas a cada 2 minutos, pois a absorção de água nas partículas mais finas é muito rápida, característica que dificulta inclusive a realização da primeira leitura.

A taxa de absorção de água do agregado graúdo natural foi determinada de acordo com a prescrição da NBR 9937 (1987) e o índice medido para este material foi de 0,3 %.



Figura 21 Ensaio de absorção do agregado reciclado: a) Recipiente utilizado para execução do ensaio de absorção; b) Amostra de agregado submersa e balança hidrostática utilizada para efetuar as medidas durante a realização do ensaio.

Foi feita a determinação da absorção do material reciclado em relação à massa do material seco, que se convencionou chamar de **absorção do material seco**. E também, a determinação da absorção do material em relação à leitura do material submerso no instante inicial, que foi chamado de **absorção do material submerso**.

Este procedimento de cálculo foi adotado pois não era possível obter a massa do material em balança hidrostática sem que o material já estivesse com água internamente, ou seja, não era possível obter a massa do material no instante zero de imersão em água e assim calcular o valor de absorção real do material. Desta forma, acredita-se que, utilizando a média entre os valores de absorção do material seco e absorção do material submerso, se consiga uma boa aproximação do valor real. Então, as taxas de absorção foram calculadas com o auxílio das equações 4.3 e 4.4 descritas a seguir:

$$A_{SECA} (\%) = \frac{M_{SUB-F} - M_{SUB-0}}{M_{SECA}} \quad [4.3]$$

$$A_{SUB} (\%) = \frac{M_{SUB-F} - M_{SUB-0}}{M_{SUB-0}} \quad [4.4]$$

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

M_{SUB-0} = Massa do material submerso no instante inicial

M_{SECA} = Massa do material seco em estufa

A Tabela 37 apresenta os resultados das taxas de absorção calculadas através das equações 4.3 e 4.4, bem como as taxas de absorção médias das duas faixas granulométricas de material reciclado.

Tabela 37 Taxa de absorção média dos agregados reciclados

	Agregados reciclados			
	Miúdo		Graúdo	
	Seco	Submerso	Seco	Submerso
Absorção (%)	6,0	11,2	3,6	6,3
Absorção média (%)	8,60		4,95	

Na Figura 22 e na Figura 23 estão apresentadas as curvas de absorção dos agregados miúdo e graúdo reciclado, respectivamente.

Através das curvas apresentadas na Figura 22 e na Figura 23 foi constatado que, tanto o agregado miúdo reciclado, quanto o graúdo, absorveram mais de 50 % da massa total de água antes dos primeiros 30 minutos. Observou-se, também, que o percentual de absorção, para as duas frações, não variou muito do intervalo dos 10 para os 30 minutos de ensaio. Com base nestas observações foram estabelecidas algumas diretrizes para compensação da absorção de água do material para execução dos traços de concreto com agregado reciclado. Foi estabelecido que os agregados reciclados teriam suas taxas de absorção compensadas e que o material seria pré-umidecido 10 minutos antes do início da mistura dos materiais na betoneira. Foi adicionada à água total de cada traço de concreto a quantidade de água referente ao percentual aproximado da absorção do agregado reciclado referente a 10 minutos. Assim, foi adicionada à água total de cada traço 50 % da taxa de absorção média do agregado miúdo reciclado e 40 % da taxa de absorção média do agregado graúdo reciclado. Estes valores foram escolhidos levando-se em consideração três fatores. Primeiro, 10 minutos foi considerado um tempo razoável de espera antes da realização da mistura de concreto para que o processo não se tornasse muito demorado. Segundo, como foi mencionado, o percentual de absorção do material reciclado não varia muito dos 10 aos 30 minutos de ensaio. Terceiro, compensar apenas parcialmente a taxa de absorção das frações de agregado miúdo e graúdo reciclado permite

que não haja um excesso muito grande de água no concreto, fato que levaria as resistências mecânicas a valores muito baixos. Além disso, de acordo com NEVILLE (1995), a relação água/cimento efetiva nos traços de concreto já é maior do que seria se houvesse total absorção de água pelos agregados comumente utilizados no concreto, cujas taxas de absorção são muito pequenas. Em se tratando de agregados porosos como o reciclado, compensar apenas parte de sua absorção pode ser considerado como mais que suficiente, pois assim, não há risco de diminuição excessiva da relação água/cimento das misturas devido à absorção, nem há o risco de deixar as misturas muito fluidas. É importante ressaltar também que o autor enfatiza que a absorção dos agregados se torna mais lenta, ou é interrompida pelo revestimento das partículas com a pasta de cimento, quando todos os materiais são misturados na betoneira, e assim contribui para que não haja, na prática, absorção total.

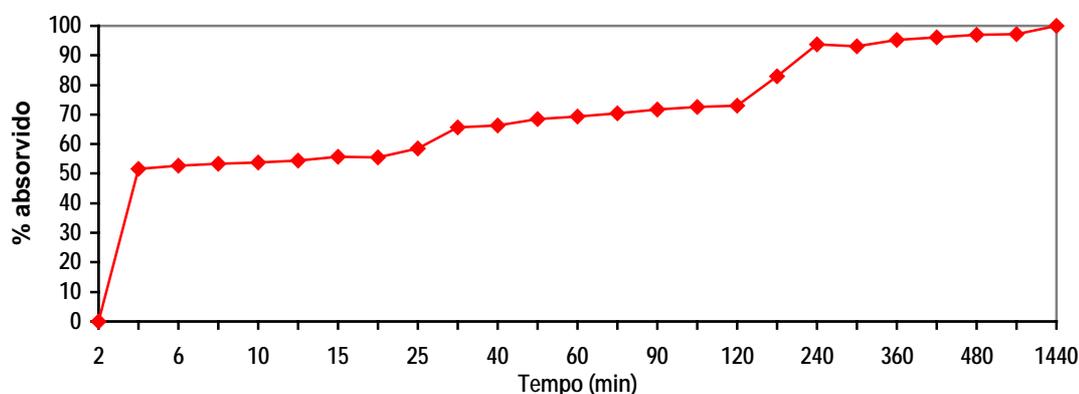


Figura 22 Curva de absorção do agregado miúdo reciclado

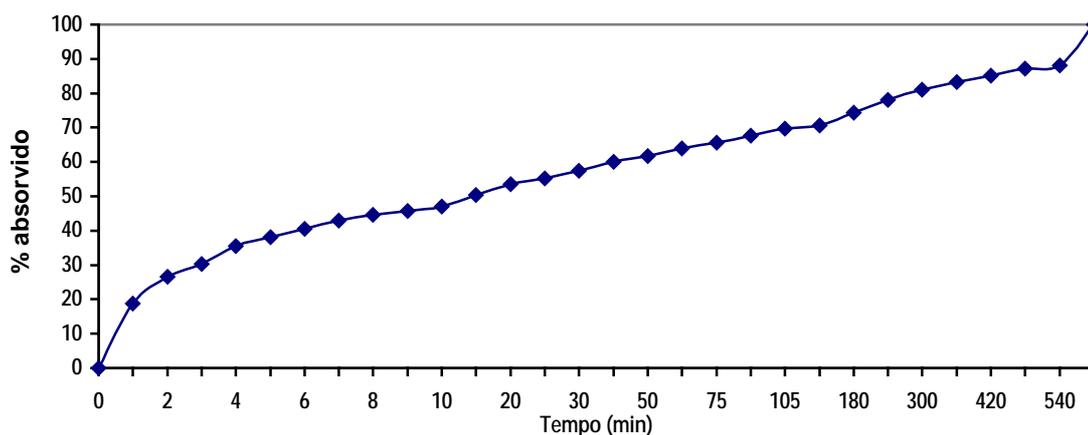


Figura 23 Curva de absorção do agregado graúdo reciclado

Com base no procedimento de ensaio desenvolvido para determinar a taxa de absorção de agregados reciclados foi elaborada uma Proposta de Norma para este ensaio, que está apresentada no ANEXO 4.

Por outro lado, assim como o agregado reciclado pode absorver água da mistura de concreto, pode ocorrer também uma perda de água do agregado reciclado para a mistura, uma vez que o mesmo seja utilizado saturado. Assim, com o objetivo de tentar traçar o comportamento do mecanismo de transporte de água do agregado reciclado para o meio foi realizado o ensaio de perda de água do material reciclado graúdo. Foi utilizado o procedimento inverso ao da absorção de água, para determinação da perda de água dos agregados graúdos reciclados. O ensaio foi realizado sob as condições de temperatura e umidade normais do ambiente. É importante salientar que os dias do ensaio estavam com temperatura em torno dos 25°C e umidade relativa em torno de 80 %.

Com os resultados do monitoramento da perda de massa da amostra ao longo do tempo obteve-se o gráfico da Figura 24.

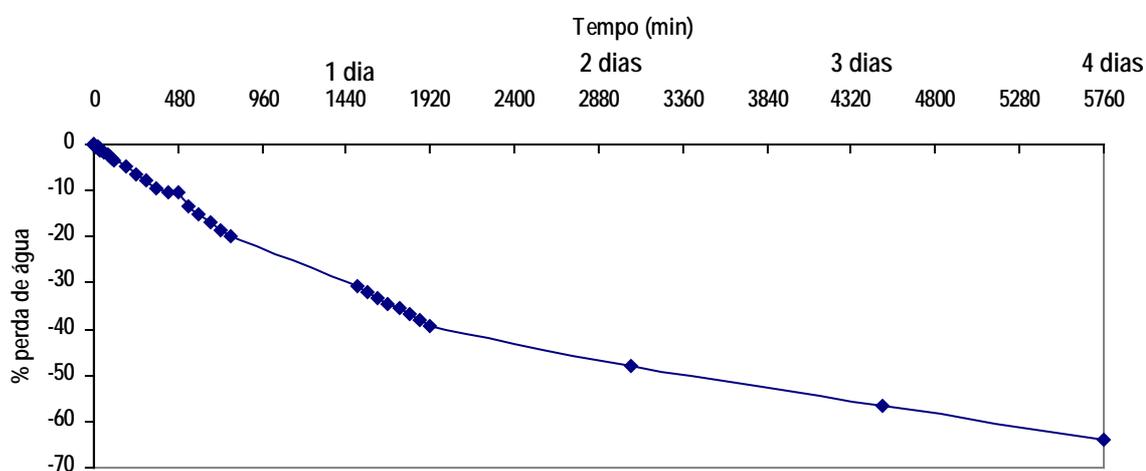


Figura 24 Curva de perda de água para o agregado graúdo reciclado

Pelo gráfico da Figura 24 é possível observar que a perda de água dos agregados para a atmosfera é muito mais lenta que a absorção observada. Em 24 horas de ensaio, cerca de 30 % do total de água absorvida pela amostra foi perdida e depois de 4 dias, ou seja, 96 horas, um pouco mais de 60 % da água total havia sido liberada.

Deste modo, pode ser concluído que a perda de água dos agregado é muito lenta. Entretanto, não pode ser desconsiderado que, dentro das misturas de concreto, os mecanismos de transporte interno de água podem ser diferenciados. Por exemplo, dentro das misturas, os agregados podem sofrer movimentações, desagregações, fricções, entre outros, que podem levar a taxas de perda de água do agregado para o meio muito mais rápidas. Além disso, quando tem início as reações de hidratação do cimento, a temperatura da mistura se eleva e isso pode ter também alguma influência sobre o mecanismo de transporte interno de água. Por outro lado, deve ser considerado ainda que o

ambiente em contato com o agregado durante a mistura na betoneira possui um nível de saturação bastante elevado, o que pode dificultar a perda de água para o meio.

4.7.2.1.4 Índice de forma

O índice de forma é determinado para agregados graúdos com dimensão máxima característica maior que 9,5 mm, como prescreve a NBR 7809 (1983). O índice de forma é dado pela razão entre o comprimento e a espessura de todos os grãos medidos.

Os resultados do ensaio de índice de forma estão apresentados na Tabela 38, para os agregados graúdos naturais e reciclados.

Tabela 38 Resultados do ensaio de índice de forma dos agregados natural e reciclado

	Tipo de agregado	
	Natural	Reciclado
Índice de forma	2,6	2,3

Os resultados apresentados pelos agregados natural e reciclado estão em conformidade com a NBR 7211 (1983) que especifica agregados para concreto e prescreve que o índice de forma dos agregados não deve ser superior a 3.

Além disso, os resultados também indicam que os agregados utilizados podem ser classificados como lamelares, pois apresentam relação entre comprimento e espessura maior que 2. Todavia, os agregados reciclados apresentaram-se menos lamelares que os agregados naturais, fato que se traduz numa vantagem para o material reciclado, pois a forma das partículas exerce grande influência sobre a trabalhabilidade das misturas de concreto produzidas. Segundo COUTINHO (1997a), as areias finas e lamelares diminuem a trabalhabilidade e o agregado graúdo com esta forma torna os concretos ásperos e difíceis de compactar. Estas características fazem com que a quantidade de água presente nas misturas seja extremamente determinante de variações bruscas de trabalhabilidade. Como o agregado reciclado, além da forma lamelar, ainda apresenta textura rugosa, esta propriedade, no concreto reciclado, fica muito afetada pelo tipo e teor de substituição do agregado natural pelo reciclado. WALLEVIK et al. (1995) mencionam que o movimento nas misturas de concreto no estado fresco requer a rotação das partículas e, que no caso de agregados lamelares, este movimento fica bastante prejudicado. Além disso, as partículas lamelares tendem a se orientar em planos horizontais, fazendo com que ocorra a formação de uma película maior de água embaixo dos grãos, piorando a zona de transição, diminuindo a aderência pasta/agregado. Por outro lado, é importante lembrar que, no caso dos agregados reciclados, pode ser que esta película não se forme tão intensamente, uma vez

que este material apresenta grande absorção de água. Como foi visto no item 3.1.4, BARRA (1996) aponta que a absorção de água não ocorre uniformemente nas misturas de concreto reciclado, e que ela se dá principalmente na zona de contato entre a pasta e o agregado.

4.7.3 Aditivo

Para execução de algumas das misturas de concreto com agregados reciclados foi necessária a utilização de um aditivo superplastificante, com o objetivo de melhorar a trabalhabilidade das misturas sem alterar as relações água/cimento originais dos traços de concreto. Foi utilizado um aditivo a base de naftaleno sulfonado. A dosagem de aditivo utilizada foi sempre de 2,5 % da massa de cimento. Com exceção dos traços de referência, dos traços com 11,5 % de substituição do agregado graúdo e miúdo natural pelo reciclado e dos traços com 50 % de substituição do agregado miúdo, ou graúdo, natural pelo reciclado, todos os traços com agregados reciclados tiveram aditivo superplastificante incorporado às suas misturas.

4.8 DOSAGEM EXPERIMENTAL

Para produção dos concretos foi adotado o método de dosagem IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992). Este método necessita de pelo menos três pontos que são usados para montar o diagrama de dosagem que correlaciona resistência à compressão, relação água/cimento, traço unitário, em massa, e consumo de cimento. O estudo consiste no ajuste do teor ideal de argamassa para um traço intermediário, fixando-se um valor de abatimento. Em seguida são executados mais dois traços, um mais pobre e outro mais rico em cimento, dos quais são moldados corpos-de-prova para determinação da resistência à compressão e com os resultados é elaborado o diagrama de dosagem.

4.8.1 Ajuste do teor ideal de argamassa

Segundo HELENE e TERZIAN (1992), essa é uma fase importante no estudo de dosagem. A falta de argamassa numa mistura tem como consequência uma maior porosidade ou o surgimento de falhas durante a concretagem. O seu excesso, pode gerar o risco de fissuração de origem térmica ou de retração por secagem, devido a um alto consumo de cimento, e também aumenta o custo final do concreto.

Para determinação do teor ideal de argamassa foi utilizado o traço 1:6,5 em massa. Esta escolha foi baseada no intervalo de relação água/cimento definido pelo projeto estatístico, que variou de 0,4 a 0,8. A trabalhabilidade para o concreto de referência foi estabelecida através do ensaio de

abatimento prescrito na NBR 7223 (1982), fixado em 70 ± 10 mm. De acordo com o ajuste foi determinado o teor ideal de argamassa de 49 %, que resultou numa relação água/cimento igual a 0,58 para o traço 1:6,5.

4.8.2 Traços auxiliares

Depois de obtido o teor ideal de argamassa foram calculados os traços auxiliares do estudo de dosagem. Foram calculados mais quatro traços auxiliares, dois mais ricos (1:3,5; 1:5) e dois mais pobres (1:8; 1:9,5), em cimento, para que todo intervalo de variação da relação a/c fosse contemplado pelo estudo. Depois de calculados os traços auxiliares, foram realizadas as misturas experimentais, sendo ajustada, para cada traço, a relação água/cimento a obter a medida de abatimento estabelecida para o experimento. Foram então moldados os corpos-de-prova para o ensaio de resistência à compressão. Com os resultados obtidos com as misturas experimentais foi traçado o diagrama de dosagem que pode ser visualizado na Figura 25.

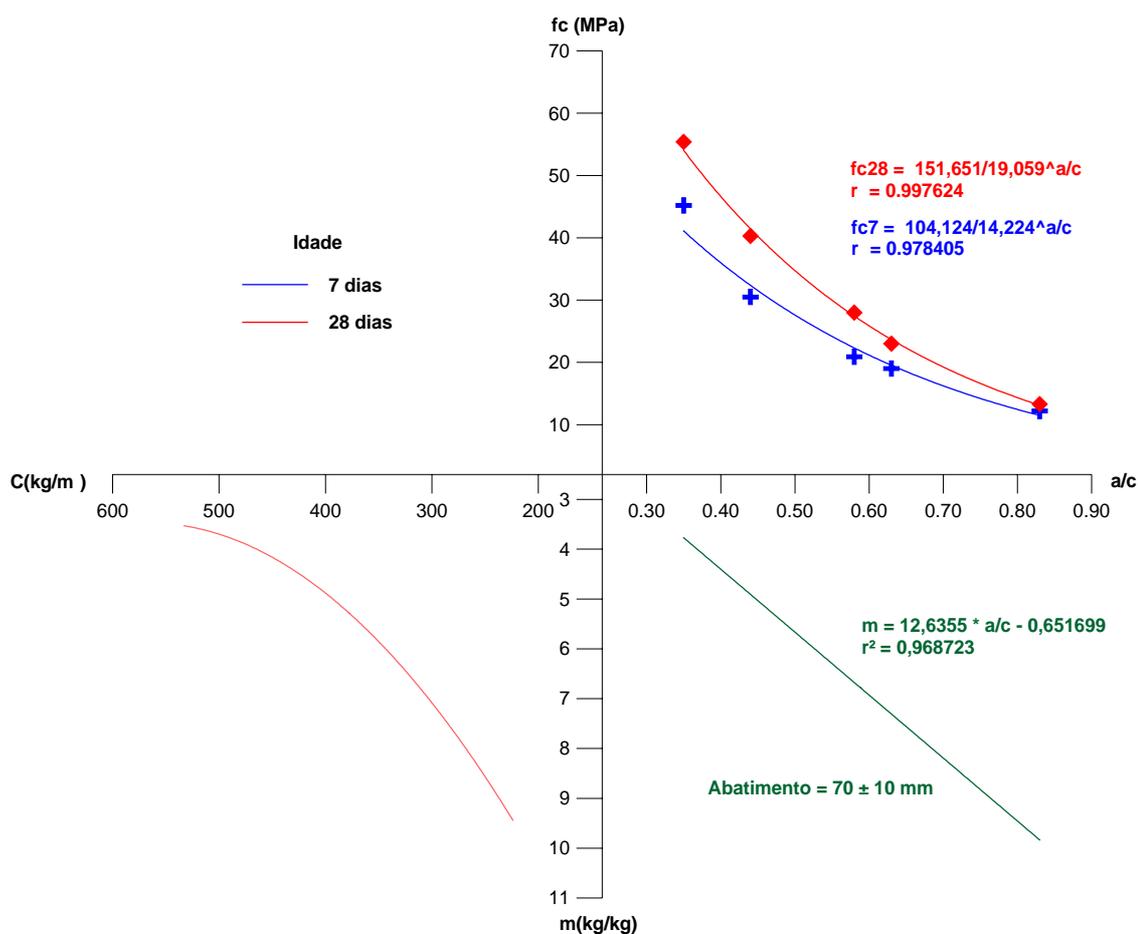


Figura 25 Diagrama de dosagem dos concretos

4.8.3 Definição dos traços do concreto de referência e do concreto reciclado

Para determinação dos traços do concreto reciclado, primeiro foram estabelecidos os traços do concreto de referência, a partir do diagrama de dosagem. Foram definidos os traços unitários para cada relação água/cimento definida no projeto estatístico e também calculados os consumos de cimento para cada traço. Os traços de referência e seus respectivos consumos de cimento estão apresentados na Tabela 39.

Tabela 39 Traços em massa utilizados na produção do concreto de referência e consumo de cimento/m³

Relação a/c	Teor de argamassa (%)	m	a	p	Teor de água - h (%)	Consumo de cimento/m ³
0,40	49	4,37	1,63	2,74	7,45	448,8
0,45	49	5,02	1,95	3,07	7,48	399,0
0,60	49	6,97	2,91	4,06	7,53	299,5
0,75	49	8,92	3,86	5,06	7,56	239,4
0,80	49	9,57	4,18	5,39	7,57	224,5

Os traços para a produção do concreto com agregado reciclado foram determinados a partir dos traços unitários do concreto de referência, levando em consideração o teor de substituição do agregado. Foi realizada também a compensação de volume através da redução da massa de agregados reciclados, calculada com o auxílio da equação 4.1 (item 4.5), que leva em consideração os valores de massa específica dos materiais, visto que os agregados reciclados apresentam menor massa específica. Os traços em massa estão apresentados na 0.

Tabela 40 Traços em massa utilizados na produção dos concretos com agregado reciclado

Traço nº	a/c	%AGR	%AMR	ρ_{AMN}	ρ_{AMR}	ρ_{AGN}	ρ_{AGR}
1	0,45	11,5	11,5	1,73	0,22	2,72	0,29
2	0,75	11,5	11,5	3,42	0,43	4,48	0,47
3	0,45	11,5	88,5	0,22	1,66	2,72	0,29
4	0,75	11,5	88,5	0,44	3,28	4,48	0,47
5	0,45	88,5	11,5	1,73	0,22	0,35	2,20
6	0,75	88,5	11,5	3,42	0,43	0,58	3,63
7	0,45	88,5	88,5	0,22	1,66	0,35	2,20
8	0,75	88,5	88,5	0,44	3,28	0,58	3,63
9	0,60	0	50	1,45	1,40	4,06	0,00
10	0,60	100	50	1,45	1,40	0,00	3,30
11	0,60	50	0	2,91	0,00	2,03	1,65
12	0,60	50	100	0,00	2,79	2,03	1,65
13	0,40	50	50	0,82	0,78	1,37	1,11
14	0,80	50	50	2,09	2,01	2,70	2,19
15	0,60	50	50	1,45	1,40	2,03	1,65

AMN - Agregado Miúdo Natural
AMR - Agregado Miúdo Reciclado

AGN - Agregado Graúdo Natural
AGR - Agregado Graúdo Reciclado

4.9 PRODUÇÃO DO CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO

4.9.1 Mistura dos materiais

A realização das misturas dos materiais para produção do concreto seguiu praticamente a mesma ordem comumente utilizada, ou seja, primeiro se colocava a brita, um pouco da água, o cimento, a água restante e, por fim, a areia.

Alguns aspectos devem ser observados quando se utiliza agregado reciclado. Primeiro, na produção de concretos com altos percentuais de substituição, tanto do agregado graúdo, quanto do miúdo, ocorre a necessidade da utilização de aditivo superplastificante para minimizar o efeito da textura rugosa dos agregados e ainda da sua alta taxa de absorção, que foi parcialmente compensada. O aditivo foi colocado antes da colocação da areia para que a dispersão dos grãos de cimento pudesse ser mais eficaz.

Outro aspecto da mistura que deve ser mencionado é que foi feita a compensação de parte da absorção de água do agregado reciclado antes da mistura dos materiais na betoneira. Essa quantidade adicional de água foi definida como descrito no item 4.7.2.1.3, e variava com o percentual e o tipo de substituição de cada traço. O processo consistiu de uma pré-umidificação do material durante um intervalo de tempo de 10 minutos, definido a partir do ensaio de absorção, como descrito no item 4.7.2.1.3.

A verificação do abatimento foi realizada após a completa mistura dos materiais na betoneira, de acordo com a prescrição da NBR 7223 (1982). Para os concretos com agregados reciclados o abatimento de 70 ± 10 mm definido para os concretos de referência não foi considerado, pois como o agregado reciclado possui forma e textura muito diferente do agregado natural, ele proporciona uma redução significativa no índice de abatimento dos concretos, sem que isto signifique diretamente uma perda de trabalhabilidade. Deste modo, o abatimento dos concretos reciclados esteve em muitos casos muito abaixo do valor de 70 ± 10 mm, estabelecido para os concretos convencionais.

4.9.2 Moldagem, adensamento e cura dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova de concreto foram moldados e curados de acordo com a prescrição da NBR 5738 (1994). Foram moldados, para cada traço de concreto produzido, 11 corpos-de-prova, em formas cilíndricas metálicas de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, e um corpo-de-prova prismático de 10x10x35 cm. Foi adotado o processo de adensamento mecânico, realizado em apenas uma

camada, como prevê a norma supracitada. A cura dos corpos-de-prova foi feita ao ar, nas primeiras 24 horas, e, depois de desmoldados, os corpos-de-prova foram curados por imersão em água com cal até a idade em que foram ensaiados. A Tabela 41 apresenta a quantidade de corpos-de-prova por tipo de ensaio que foram moldados durante a produção de cada traço de concreto.

Tabela 41 Resumo da quantidade de corpos-de-prova moldados para cada tipo de ensaio por traço de concreto

Ensaio	fc				ft'F	ft'D	Ec	Total
	3 d	7 d	28 d	91 d	28 d	28 d	28 d	
10x20	2	2	2	2	-	2	1	11
10x10x35	-	-	-	-	1	-	-	1

5 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA O CONCRETO NO ESTADO FRESCO

Como foi dito no início do capítulo 4, o programa experimental foi embasado por um planejamento estatístico que confere maior confiabilidade à análise de resultados. Dentro da análise de resultados foi utilizada uma análise de regressão linear múltipla ponderada com cada uma das variáveis de resposta estudadas. O programa Statgraph foi usado na análise de regressão e a ponderação foi dada para a diminuição do efeito dos resíduos, utilizado-se a equação 5.1 como peso para resíduo padrão. Este programa fornece as equações ajustadas de cada modelo testado bem como fornece parâmetros da análise de variância e os valores de r^2 de cada análise.

$$P_{Residuo} = \frac{1}{1 + R_p^2} \quad [5.1]$$

A seguir são apresentados os resultados e análises para cada uma das propriedades avaliadas dentro do desenvolvimento do projeto experimental. É importante lembrar que, para a análise de dados, não foram utilizados os resultados obtidos com os traços de referência, pois estes traços não foram previstos na matriz do experimento, como foi mostrado no item 4.1. Além disso, os traços de referência foram rodados apenas com intuito de nortear a execução dos traços de concreto com agregado reciclado. Foram construídos modelos matemáticos que explicam a forma como as propriedades do concreto são afetadas pelas variáveis independentes (parâmetros do processo, definidas no item 4.1) e suas interações. Os modelos foram ajustados para níveis codificados de cada um dos parâmetros utilizados. Dentro dos intervalos previstos é possível avaliar qualquer traço, bastando para isso calcular o código do traço desejado através das equações 5.2, 5.3 e 5.4.

$$X_{codificado} = \frac{X_{real} - Média}{SA} \quad [5.2]$$

$$Média = \frac{X_{real-máx} + X_{real-min}}{2} \quad [5.3]$$

$$SA = \frac{X_{real-máx} - X_{real-min}}{2} \quad [5.4]$$

Os níveis reais e codificados de cada variável podem ser visualizados na Tabela 42. Vale salientar que a variável idade somente foi considerada para o ajuste do modelo de resistência à compressão axial, analisado no capítulo 6.

Tabela 42 Níveis codificados de cada uma das variáveis independentes utilizadas

Relação a/c	Nível real	0,40	0,45	0,60	0,75	0,80
	Nível codificado	0,5	0,625	1,0	1,375	1,5
Teor de substituição de AGR	Nível real	0%	11,5%	50%	88,5%	100%
	Nível codificado	-1,0	-0,77	0,0	0,77	1,0
Teor de substituição de AMR	Nível real	0%	11,5%	50%	88,5%	100%
	Nível codificado	-1,0	-0,77	0,0	0,77	1,0
Idade	Nível real	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias	
	Nível codificado	-1,0	-0,91	-0,43	1,0	

5.1 MASSA ESPECÍFICA

A análise de regressão múltipla realizada com os resultados de massa específica obtidos com os concretos no estado fresco (ANEXO 1, Tabela 66) mostrou que, em ordem de importância, os teores de substituição de AGR, as relações a/c e os teores de substituição de AMR apresentaram efeito significativo sobre a massa específica. Porém, nenhuma interação entre as variáveis resultou significativa dentro da análise de variância.

Como foi mencionado anteriormente, a análise de regressão múltipla com o auxílio do Statgraph fornece a equação ajustada para a modelagem das curvas de comportamento do material, e a expressão resultante da análise, para os níveis codificados apresentados na Tabela 42, é a seguinte:

$$\gamma_{CF} = 2,2526 + \frac{0,0632}{a/c} - 0,1632 * AGR - 0,0301 * AMR \quad [5.5]$$

Na equação aparecem apenas os termos que exercem influência significativa sobre a propriedade avaliada. Foi obtido um coeficiente de determinação $r^2 = 0,983$ para o modelo.

5.1.1 Efeito isolado do teor de substituição do agregado graúdo reciclado (%AGR) e do agregado miúdo reciclado (%AMR) sobre a massa específica do concreto

De acordo com MEHTA e MONTEIRO (1994), a massa específica do concreto no estado fresco depende da massa específica do agregado e da sua porosidade, bem como da sua textura, forma e tamanho.

O efeito isolado de cada uma das variáveis, AGR e AMR, sobre a massa específica do concreto, pode ser visualizado no gráfico da Figura 26. Cada efeito isolado foi calculado com base na equação 5.5. Foram variados os níveis codificados, tanto de AGR, quanto de AMR, respectivamente, em função dos pontos médios codificados das outras variáveis.

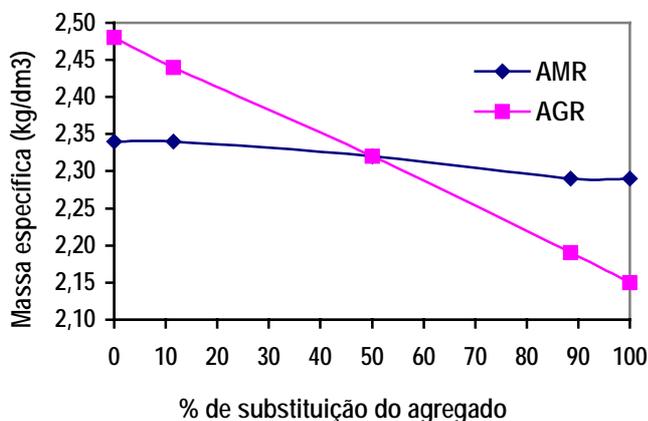


Figura 26 Efeito isolado do %AGR e do %AMR sobre a massa específica do concreto fresco

No gráfico da Figura 26, pode-se observar que, quanto maior o teor de substituição do agregado reciclado, menor é a massa específica do concreto. A maior porosidade intrínseca ao agregado reciclado é uma das maiores causas para que esta redução ocorra. Além disso, percebe-se que a redução causada pelo agregado graúdo reciclado é muito maior que a redução causada pelo agregado miúdo. Isto demonstra a influência do tamanho das partículas sobre a massa específica. Quanto maior o grão do agregado, a maior que porosidade é incorporada à mistura e, portanto, maior é a redução da massa específica da mesma. Por outro lado, como foi visto no item 3.1.1, quando se falou sobre a granulometria do agregado reciclado, observou-se que as partículas de agregado tendem a apresentar maior quantidade de grãos de cimento, o que faz com que a redução da massa específica com o uso do agregado miúdo seja menos acentuada. Outro fator que contribui para diminuição da massa específica do concreto é que os valores de massa específica dos agregados reciclados apresentaram-se menores que os valores obtidos para os agregados naturais, como pode ser visto no item 4.7.2.1.2.

5.1.2 Efeito isolado da relação a/c sobre a massa específica do concreto

Assim como para os teores de substituição de AGR e AMR, a ação do efeito isolado da relação a/c foi calculada levando em consideração a variação dos níveis codificados desta variável e mantendo as demais variáveis no ponto médio codificado. No gráfico da Figura 27 pode ser visualizado este

efeito, no qual é possível observar a diminuição da massa específica do concreto com o aumento da relação a/c.

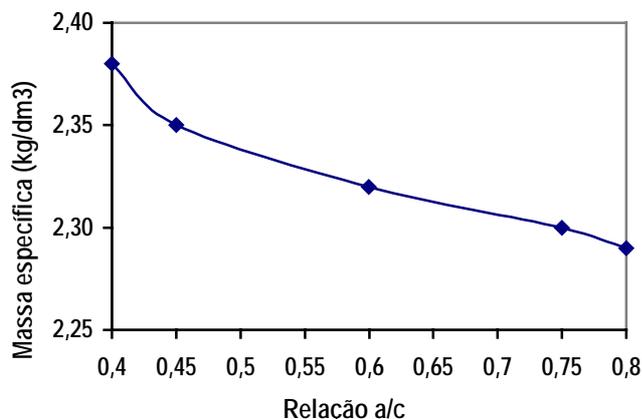


Figura 27 Efeito isolado da relação a/c sobre a massa específica do concreto fresco

É interessante considerar que, quanto maior a relação a/c, menor é a quantidade de cimento nas misturas para se combinar com a água existente, fator que aumenta a porosidade do concreto e gera redução da massa específica.

5.1.3 Considerações gerais

Para avaliar a influência das variáveis utilizadas sobre a massa específica, a partir da equação 5.5, foram calculadas as curvas do concreto de referência, dos concretos com 50 % e 100 % de substituição de ambas frações de agregados e dos concretos com 100 % de apenas uma das frações de agregado reciclado. A Figura 28 apresenta os resultados.

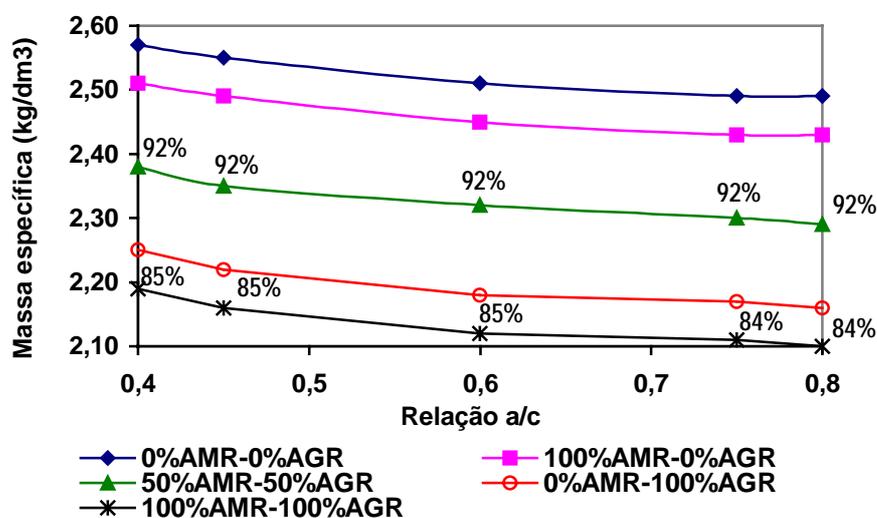


Figura 28 Efeito combinado das variáveis a/c, AGR e AMR sobre a massa específica do concreto e percentuais de massa específica em relação ao concreto de referência

Pode ser visualizada uma redução de até 16 % da massa específica do concreto com 100 % de substituição do agregado natural miúdo e graúdo pelo reciclado, em relação ao concreto de referência. Os resultados confirmam a tendência de redução da massa específica de concretos reciclados apontada pela bibliografia, como foi visto no item 3.2.2.1. Quanto maior o teor de substituição do agregado e a relação a/c utilizada, maior é a redução dos resultados.

5.2 TRABALHABILIDADE

5.2.1 Abatimento do tronco de cone

Como foi mencionado no item 4.2.2.1, o ensaio de abatimento do tronco de cone foi realizado para controlar a produção dos concretos com agregados reciclados. A Tabela 43 apresenta os resultados do abatimento do tronco de cone para cada traço de concreto produzido, bem como suas médias e coeficiente de variação.

Tabela 43 Resultados do ensaio de determinação do índice de consistência pelo abatimento do tronco de cone

Traço nº	%AGR	%AMR	a/c	Abatimento (mm)			Média (mm)	CV (%)		
				1º Repetição	2º Repetição	3º Repetição				
13	50	50	0,4	30	-	25	35	5	25	55
16	0	0		65	-	40	50	50	50	20
1	11,5	11,5	0,45	45	40	25	25	30	35	28
3	11,5	88,5		60	50	45	-	20	45	39
5	88,5	11,5		15	10	55	-	0	20	121
7	88,5	88,5		5	0	0	-	5	5	115
17	0	0		80	-	60	70	60	70	14
9	0	50	0,6	25	25	30	-	15	25	26
10	100	50		5	0	5	-	0	5	115
11	50	0		10	10	10	10	0	10	56
12	50	100		0	5	20	10	0	5	120
15	50	50		35	-	15	20	10	20	54
18	0	0		85	-	55	70	55	65	22
2	11,5	11,5	0,75	20	20	20	15	15	20	15
4	11,5	88,5		15	20	0	-	25	15	72
6	88,5	11,5		10	10	0	-	0	5	115
8	88,5	88,5		0	-	0	-	0	0	-
19	0	0		55	-	35	25	25	35	40
14	50	50	0,8	10	10	20	15	10	15	34
20	0	0		40	-	30	25	20	30	30

Os resultados apresentados na Tabela 43 demonstram uma variabilidade muito alta no ensaio de determinação do índice de consistência dos concretos com agregados reciclados. Mesmo para os concretos de referência, como, por exemplo, para o traço 20, com relação a/c = 0,80, os resultados

foram variáveis. Este fato denota uma certa ineficiência deste método tanto na avaliação da trabalhabilidade de concretos com agregados reciclados, quanto na determinação da trabalhabilidade de concretos convencionais com pequenas quantidades de cimento. Esta constatação é apontada por NEVILLE (1995), que considera que misturas ricas tem abatimento satisfatório e são sensíveis a variações de trabalhabilidade. Todavia, as misturas pobres ou ásperas tendem ao abatimento por cisalhamento, ou ao desmoronamento, podendo se obter resultados muito diferentes para diferentes amostras da mesma mistura. O concreto reciclado apresenta maior aspereza, e assim, possui índices de abatimento mais baixos e mais variáveis que o concreto convencional.

Com o intuito de tentar modelar o abatimento dos concretos também foi realizada a análise de regressão múltipla dos resultados apresentados na Tabela 43, excluindo os valores relativos aos concretos de referência, através da qual observa-se que, em ordem de importância, o teor de substituição de AGR, a relação a/c , as interações duplas $AGR \times AMR$ e $a/c \times AGR$ e a interação tripla $a/c \times AGR \times AMR$ resultaram significativas. A equação 5.6 descreve o modelo matemático ajustado para determinação do abatimento dos concretos com agregados reciclados. O coeficiente de determinação r^2 para o modelo obtido foi de 0,748.

$$A = 30,422 - 14,941 * a / c - 25,358 * AGR + 11,78 * a / c * AGR - 17,059 * AGR * AMR + 11,508 * a / c * AGR * AMR \quad [5.6]$$

5.2.1.1 Efeito isolado da variável AGR sobre o abatimento do concreto

O efeito isolado da variável AGR sobre o abatimento do concreto pode ser visualizado no gráfico da Figura 29. Este efeito isolado foi calculado com base na equação 5.6, variando os níveis codificados de AGR em função dos pontos médios codificados das outras variáveis. Os valores codificados das variáveis estão apresentados na Tabela 42.

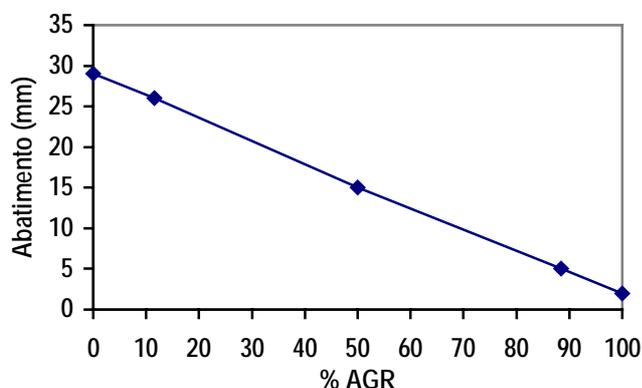


Figura 29 Efeito isolado do % AGR sobre o abatimento do concreto

Através do gráfico da Figura 29 é possível observar que, quanto maior o teor de AGR, menor tende a ser o abatimento obtido. Este comportamento já era esperado, uma vez que o agregado reciclado possui características físicas tão distintas, como forma mais irregular e textura mais rugosa que os agregados naturais. Adicionalmente, é possível que a composição granulométrica mais contínua esteja ajudando a diminuir o abatimento devido ao efeito de empacotamento dos grãos. Tais características só poderiam influenciar de forma a diminuir o abatimento destas misturas de concreto reciclado, uma vez que esta propriedade está muito relacionada com as características físicas do material presente nas misturas.

5.2.1.2 Efeito isolado da relação a/c sobre o abatimento do concreto

A Figura 30 apresenta a tendência de comportamento do abatimento dos concretos quando se analisa o efeito isolado da relação a/c sobre esta propriedade. Através da equação 5.6 foi calculado o efeito isolado de a/c variando seus níveis codificados e mantendo as demais variáveis nos seus respectivos pontos médios codificados, apresentados na Tabela 42.

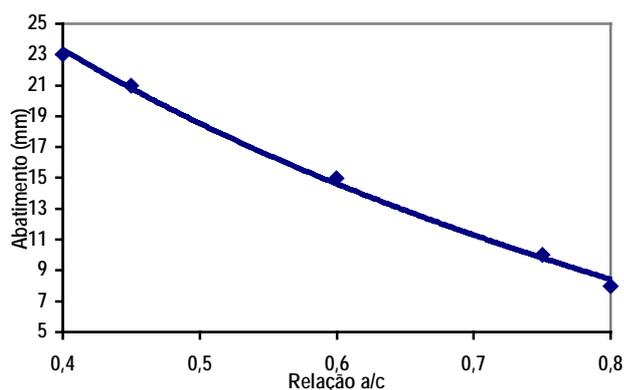


Figura 30 Efeito isolado da relação a/c sobre o abatimento do concreto

Observa-se que, quanto maior a relação a/c, menor é o valor do abatimento do tronco de cone. Levando-se em consideração que as misturas com maior relação a/c possuem menor quantidade de cimento e assim tendem a ser mais ásperas e apresentar maior travamento, é possível entender o comportamento apresentado no gráfico da Figura 30. É importante lembrar que as interações entre a relação a/c e os teores de AMR e AGR podem gerar algumas modificações nos resultados obtidos para esta propriedade.

5.2.1.3 Efeito da interação $a/c \times AGR$ sobre o abatimento do concreto

Na Figura 31 pode ser visualizado o efeito da interação $a/c \times AGR$ sobre o abatimento dos concretos. Os valores para o montagem do gráfico foram obtidos a partir da equação 5.6, variando os valores codificados de AGR para cada valor codificado de a/c e mantendo as demais variáveis no seu ponto médio codificado.

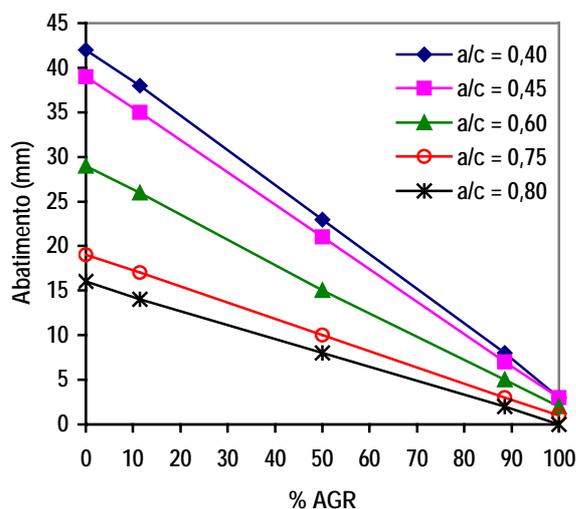


Figura 31 Abatimento em função do efeito da interação $a/c \times AGR$

Pelos resultados apresentados no gráfico da Figura 31 observa-se que, quanto maior o teor de AGR, e quanto maior a relação a/c utilizada, menor é o abatimento apresentado pelas misturas de concreto. Admite-se que a combinação do baixo consumo de cimento dos traços pobres com o alto teor de agregados rugosos e irregulares tende a intensificar a queda no valor de abatimento dos concretos.

5.2.1.4 Efeito da interação $AGR \times AMR$ sobre o abatimento do concreto

O gráfico que representa o valor do abatimento em função de AGR (%) foi obtido a partir da equação 5.6, variando os valores codificados de AGR para cada valor de AMR, também codificado, e mantendo as demais variáveis no ponto médio. O mesmo foi feito para obtenção do gráfico de abatimento em função de AMR. Os respectivos gráficos podem ser visualizados na Figura 32.

Observa-se que, quanto maior o teor de AMR, para baixos teores de AGR, maior é o abatimento do concreto. O comportamento inverso é observado quando o teor de AGR aumenta de 0 para 100 %. Como o agregado miúdo reciclado apresenta uma quantidade razoável de finos, como ficou evidenciado na sua composição granulométrica apresentada na Tabela 34, pode-se afirmar que há um aumento na quantidade total de finos nas misturas com agregado miúdo reciclado e isso pode

estar contribuindo para obtenção de maiores valores de abatimento para estes traços. No entanto, à medida que o teor de AGR aumenta, a influência negativa deste material é maior que o aumento do teor de finos provocado pelo agregado miúdo reciclado. Ou ainda, a combinação dos dois tipos de agregados nas misturas pode estar gerando uma necessidade maior de água. Como esta água não foi acrescentada às misturas, há uma tendência de redução no abatimento.

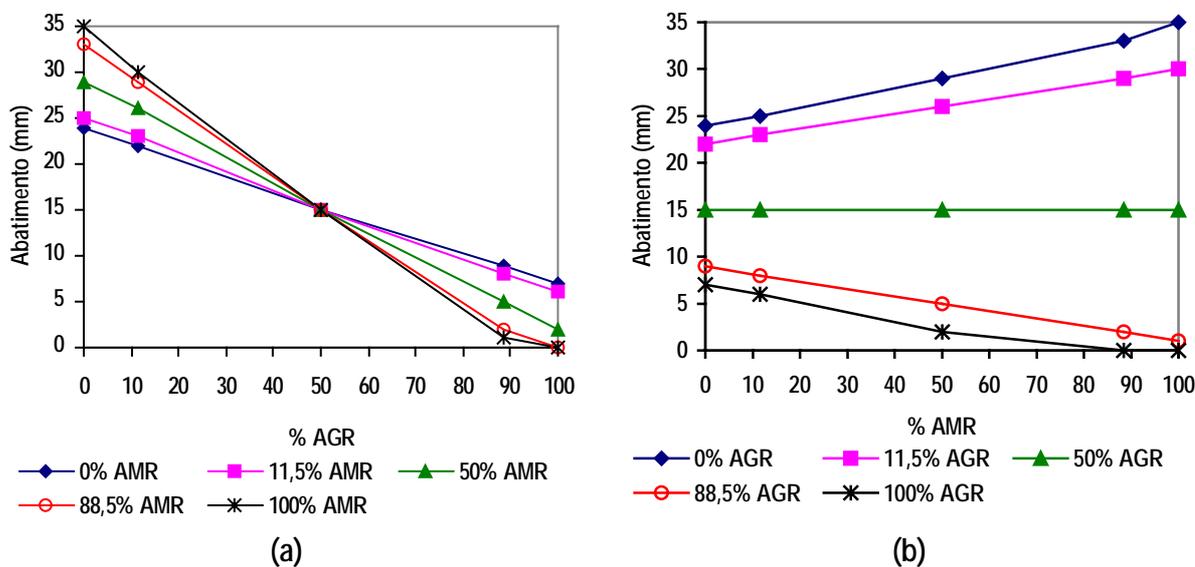
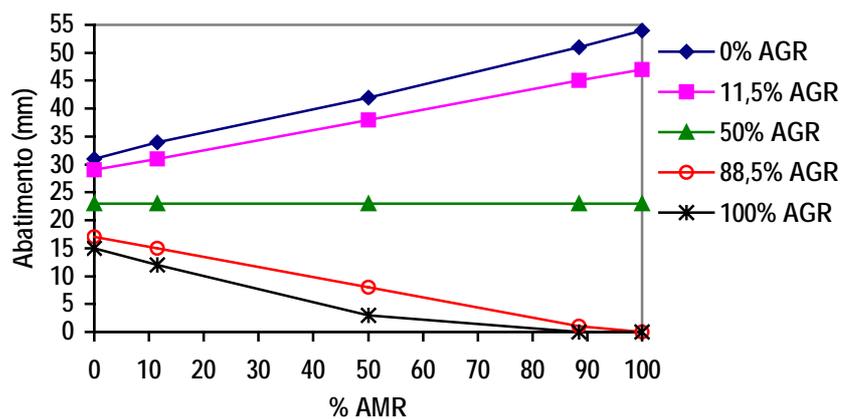


Figura 32 Abatimento em função do efeito da interação AGRxAMR: a) Gráfico do abatimento em função do % AGR; b) Gráfico do abatimento em função do % AMR

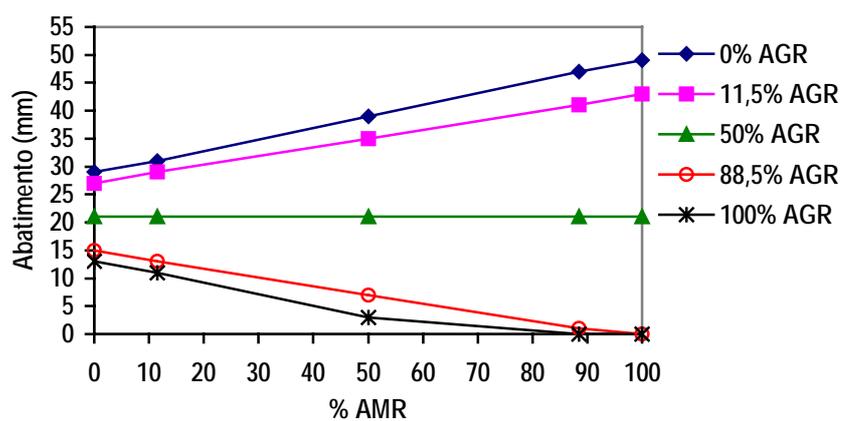
5.2.1.5 Efeito da interação a/cxAGRxAMR no abatimento do concreto

A interação tripla a/cxAGRxAMR foi calculada a partir da equação 5.6. Como resultado obteve-se um gráfico de abatimento em função de AMR variando os valores codificados de AGR para cada valor codificado da relação a/c (gráficos da Figura 33).

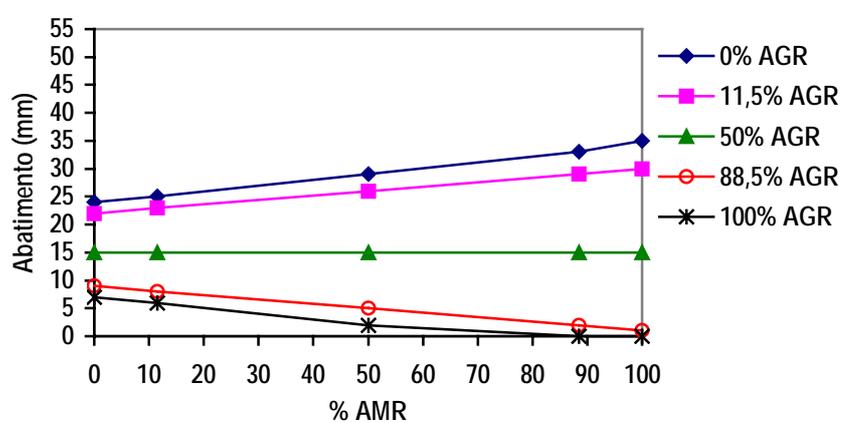
Observa-se, pelos gráficos da Figura 33, que, quanto maior a relação a/c, avaliada, menores são os valores de abatimento obtidos. Além disso, observa-se que, para relações a/c < 0,60, de forma geral, quanto maior o teor de substituição do agregado miúdo reciclado maiores são os valores de abatimento alcançados. Para as relações a/c > 0,60 o abatimento dos concretos independe do teor de AMR utilizado. Por outro lado, percebe-se também que, quanto maior o teor de substituição de AGR, menores são os resultados de abatimento. É possível observar ainda um efeito forte da interação entre AGR e AMR.



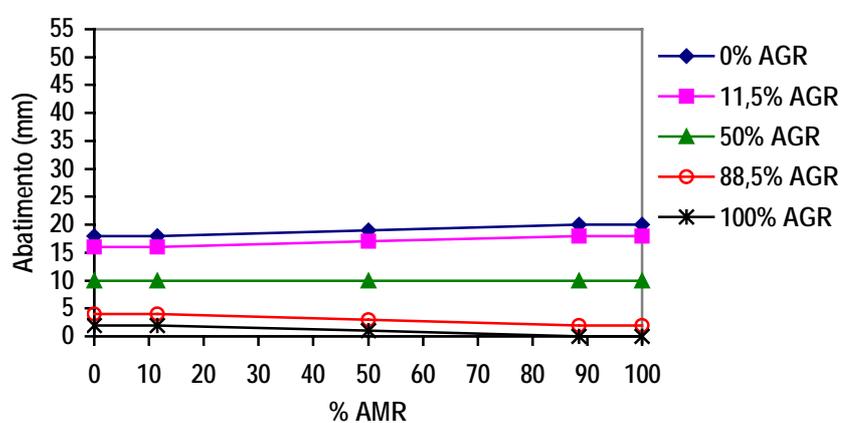
(a)



(b)



(c)



(d)

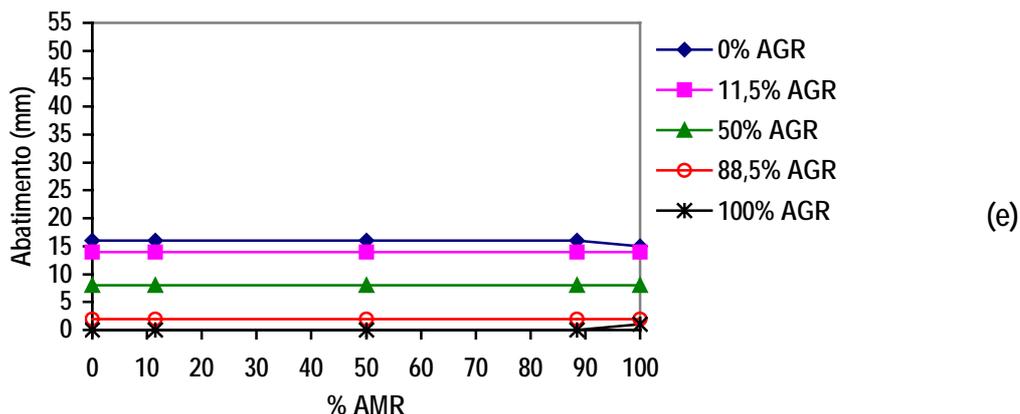


Figura 33 Abatimento do concreto em função do efeito da interação $a/c \times AGR \times AMR$: a) $a/c = 0,40$; b) $a/c = 0,45$; c) $a/c = 0,60$; d) $a/c = 0,75$; e) $a/c = 0,80$

Como foi visto no item 5.2.1.2, quanto maior a relação a/c , menor é quantidade de cimento presente nas misturas, o que torna as misturas mais ásperas e, desta forma, mais propensas a diminuir o abatimento do concreto, pois há escassez de pasta para lubrificar as partículas de agregado. Foi visto também no item 5.2.1.4 que o uso do agregado miúdo sozinho pode contribuir aumentando a quantidade de finos na mistura, o que pode aumentar o efeito de lubrificação das partículas maiores, favorecendo o aumento do abatimento. Por outro lado, à medida em que se incorpora agregado graúdo reciclado, e quanto maior o seu teor, as características das partículas de agregado graúdo tem sua influência negativa muito maior que o benefício trazido pelo aumento do teor de finos proporcionado pelo agregado miúdo e assim, a diminuição do abatimento do concreto é inevitável. Além disso, a incorporação de maior quantidade de agregados reciclados nas misturas de concreto tende a diminuir a quantidade de água livre nas misturas, o que também reduz o abatimento. Quando os três fatores estão relacionados, ou seja, o aumento do teor de AGR, cujas características físicas influenciam muito o abatimento, a alta relação a/c que possui baixo consumo de cimento, e o alto teor de finos, o abatimento do concreto desce a níveis muito baixos.

5.2.1.6 Considerações gerais

Para avaliar a influência das variáveis utilizadas sobre o abatimento dos concretos, a partir da equação 5.6 foram calculados os valores de abatimento do concreto de referência e de concretos com 50 % e 100 % de substituição das frações de agregados reciclados combinados entre si. A Tabela 44 apresenta estes resultados.

Tabela 44 Efeito combinado das variáveis a/c, AGR e AMR sobre o abatimento dos concretos

Agregado miúdo reciclado	Relação a/c	Agregado graúdo reciclado		
		0 %	50 %	100 %
0 %	0,40	30	25	15
	0,45	30	20	15
	0,60	25	15	10
	0,75	20	10	0
	0,80	15	10	0
50 %	0,40	40	25	5
	0,45	40	20	5
	0,60	30	15	0
	0,75	20	10	0
	0,80	15	10	0
100 %	0,40	55	25	0
	0,45	50	20	0
	0,60	35	15	0
	0,75	20	10	0
	0,80	15	10	0

A partir dos resultados da Tabela 44 foram montados os gráficos da Figura 34.

Os concretos com 0 % de AGR e 100 % de AMR apresentaram os maiores valores de abatimento. É interessante salientar que o abatimento para este traço foi cerca de 74 % maior para a relação a/c = 0,40, e à medida que a relação a/c aumentou, o abatimento do concreto reciclado foi se aproximando do concreto de referência, chegando a ser 6 % menor para o traço com a/c = 0,80. O mesmo comportamento foi observado para os traços com 0 % de AGR e 50 % de AMR. No caso da introdução do agregado graúdo reciclado, quanto maior o teor deste material presente nas misturas, menor é o abatimento obtido.

Um fator interessante que deve ser observado nos resultados apresentados anteriormente é que todos os traços de concreto apresentam abatimento menor que 70 ± 10 mm, parâmetro utilizado como controle na dosagem dos concretos, apresentado no item 4.8.1. Como foi visto na Tabela 43, e através do coeficiente de determinação do modelo matemático apresentado ($r^2 = 0,748$), a variabilidade inerente a este ensaio é bastante elevada.

Com base nas características do agregado miúdo reciclado, a quantidade de finos nos concretos com baixas relações a/c e altos teores desta fração deve ter aumentado significativamente contribuindo para que houvesse maior abatimento destas misturas de concreto reciclado. Contudo, o aumento da quantidade de materiais secos presente nas misturas pode ser apontada como uma das causas para a redução do abatimento nos traços com maior relação a/c. Ou seja, à medida que a relação a/c aumenta, a relação cimento/materiais inertes diminui, o que quer dizer que há maior

quantidade de inertes para menor quantidade de cimento, dificultando a lubrificação das partículas de agregado. Além disso, à medida que a quantidade de inertes reciclados aumenta na mistura, a quantidade de água livre também diminui, uma vez que somente parte da água de absorção do material reciclado foi compensada.

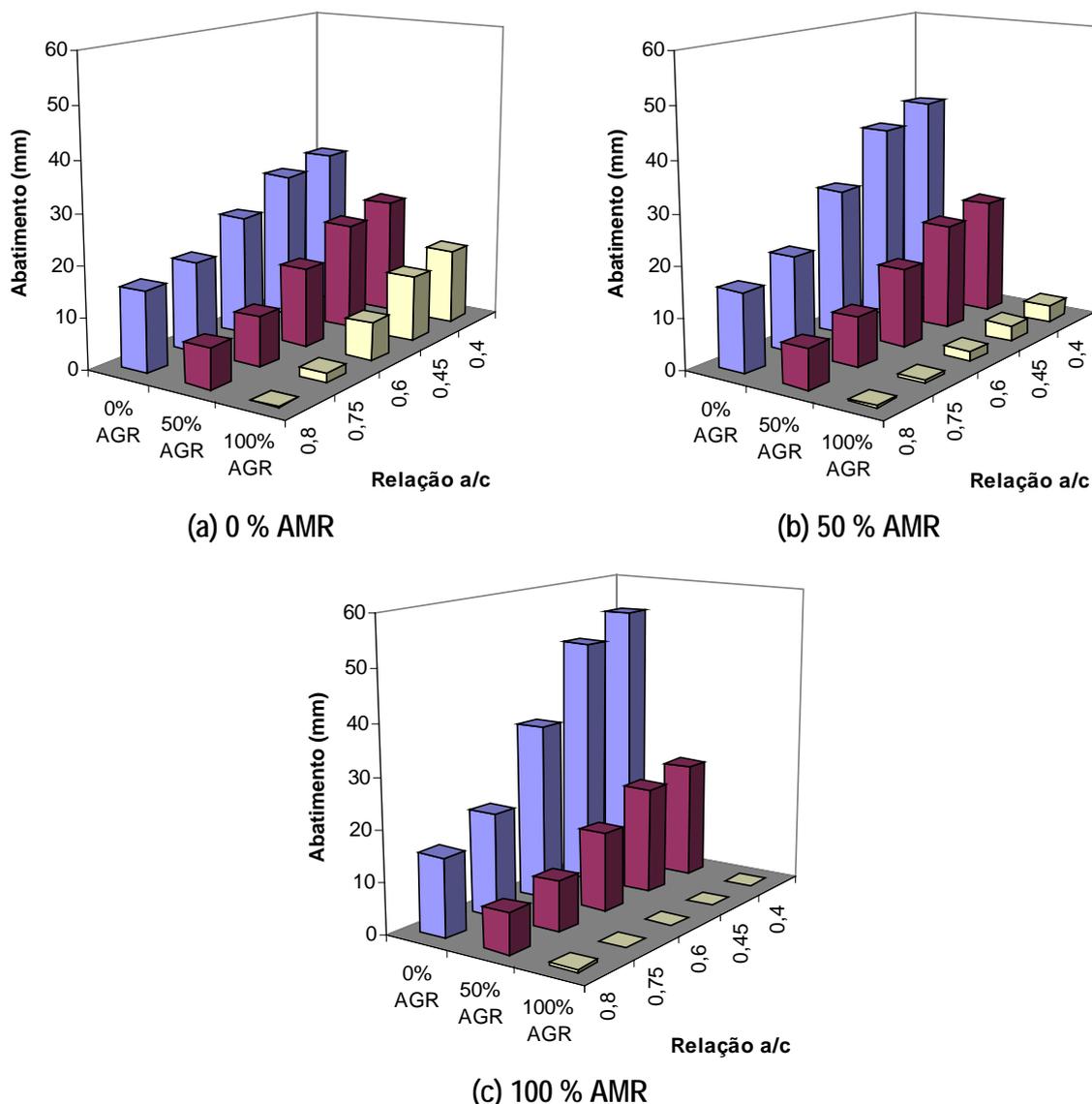


Figura 34 Gráficos de abatimento em função da relação a/c e dos teores de AMR e AGR

NEVILLE (1995) menciona que o teor de água das misturas é o principal fator de influência sobre a trabalhabilidade, e ele independe da relação a/c e do teor de cimento, para um determinado tipo e granulometria de agregado. O autor salienta que a trabalhabilidade depende tão somente da granulometria, textura e forma dos agregados, quando o teor de água e outras proporções da mistura estão fixadas. Quanto menor e mais anguloso for o agregado, maior será o teor de água necessário para alcançar o abatimento desejado. Isso é o que pode ser visualizado nos resultados. O teor de água de cada traço de referência estava fixo e variou-se o tipo e granulometria dos agregados, entre outras

variáveis. O teor fixo de água das misturas acarretou uma variabilidade na medida do abatimento devido a variações inerentes ao agregado utilizado. Contudo, no caso do agregado reciclado, a taxa de absorção também pode ser apontada como outra causa desta variabilidade.

A granulometria mais contínua, a forma mais irregular e a textura mais áspera dos agregados graúdos reciclados também contribuem para que os concretos reciclados apresentem menores valores de abatimento, devido ao maior travamento e empacotamento existente entre as partículas de agregado graúdo nas misturas de concreto reciclado, quando comparado ao concreto com agregados naturais. Conforme NEVILLE (1995), a influência das propriedades do agregado podem ser reduzidas com o aumento do consumo de cimento, chegando a ser quase nula com teores de agregado/cimento entre 2,5 e 3.

Durante a produção dos concretos com agregados reciclados, apesar dos mesmos possuírem valores reais de abatimento muito mais baixos que os concretos de referência, notou-se que, ao serem vibrados, os concretos adquiriam aspecto satisfatório, e, com exceção dos concretos com grandes teores de substituição de ambas frações granulométricas (misturas com 88,5 % de substituição do agregado graúdo e miúdo), as demais misturas de concreto apresentavam-se bem moldáveis. Segundo NEVILLE (1995), o concreto deve apresentar uma trabalhabilidade tal que possibilite adensamento até um máximo de compacidade com uma quantidade de energia razoável, e, que o abatimento não mede a facilidade de adensamento do concreto, não refletindo seu comportamento em condições dinâmicas. Assim, pode ser considerado que, independente dos valores de abatimento obtidos para os concretos com agregados reciclados, na verdade a maior ou menor facilidade com que os mesmos podem ser adensados é que pode ser considerado como parâmetro para limitar o seu uso.

De acordo com NEVILLE(1995), o concreto ao ser adensado oferece uma resistência a esse processo e esta resistência está intimamente ligada à quantidade de ar aprisionado na mistura de concreto. Quanto maior a quantidade de ar aprisionado, menor é a resistência ao adensamento. Isso pode explicar a maior facilidade para ser adensado do concreto reciclado, comparado ao seu menor valor de abatimento. O agregado mais poroso incorpora uma quantidade maior de ar às misturas de concreto e, apesar da maior aspereza conferida ao concreto, e das propriedades físicas do agregado, que favorecem o travamento das misturas, ao serem vibrados, essas barreiras são rompidas e o concreto torna-se mais trabalhável. É certo que o nível de substituição do agregado natural pelo reciclado apresenta-se como um ponto que deve ser levado em consideração quando se analisa a possibilidade de uso deste material para produção de concretos, mas também deve ser considerado

que a medida de consistência pelo abatimento do tronco de cone não se apresenta como bom parâmetro para avaliar a trabalhabilidade do concreto reciclado.

Foi observado durante a produção dos concretos que as misturas com agregados reciclados apresentaram menor exsudação que as misturas com agregados naturais, talvez porque o agregado reciclado retêm maior quantidade de água que o agregado natural, devido à sua alta taxa de absorção. Além disso como há uma grande quantidade de finos na composição do agregado miúdo reciclado, isso também pode contribuir com a menor exsudação nas misturas de reciclado. Da mesma forma, existe uma menor tendência à segregação entre o agregado reciclado e a argamassa de concreto produzido devido sua maior coesão.

Os resultados demonstram que cuidados especiais devem ser tomados em relação ao abatimento das misturas quando se produz concretos reciclados. Todavia, é possível afirmar que embora o agregado reciclado apresente características físicas bastante desfavoráveis a esta propriedade, é possível produzir concretos trabalháveis do ponto de vista da moldabilidade das misturas.

5.2.2 Perda de abatimento do concreto

Apesar de ser possível afirmar que concretos reciclados com baixos valores de abatimento podem apresentar trabalhabilidade satisfatória do ponto de vista de adensamento, existe uma grande preocupação com a perda de trabalhabilidade das misturas em geral, e principalmente, de misturas que incorporem materiais com altas taxas de absorção, como é o caso do agregado reciclado.

Assim, decidiu-se avaliar, a perda de abatimento de três traços de concreto: um traço de referência, um traço com 50 % de substituição do agregado miúdo natural pelo reciclado e um traço com 50 % de substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado, como está descrito no item 4.2.2.2. Os resultados destes ensaios estão apresentados na Tabela 45. A partir destes resultados foram calculados os percentuais de abatimento de cada leitura em relação ao abatimento inicial medido no instante zero, para cada traço de concreto avaliado. Os resultados podem ser visualizados na Figura 35.

Foi possível observar que a perda de abatimento nos primeiros 15 minutos de ensaio foi maior para os concretos com agregados reciclados que para o concreto de referência. Isso deve ocorrer em virtude da maior taxa de absorção do agregado reciclado, que absorveu maior quantidade de água da

mistura, variando, assim, o seu teor de água livre, fazendo com que o abatimento dos traços de concreto reciclado fosse menor que o do concreto de referência nos instantes iniciais.

Tabela 45 Resultados do ensaio de perda de abatimento do concreto

	Referência		50% AMR – 0% AGR ¹		0% AMR – 50% AGR ²	
Temperatura ambiente	23,4°C		23,5°C		23,7°C	
Umidade Relativa	67%		64%		64%	
Temperatura da água	21,5°C		21,5°C		21,5°C	
Temperatura do cimento	21°C		21°C		21°C	
Temperatura do concreto	23°C		24°C		23°C	
Determinações durante o ensaio	Abatimento (mm)	Temperatura (°C)	Abatimento (mm)	Temperatura (°C)	Abatimento (mm)	Temperatura (°C)
Instante inicial	80	23,4	80	23,5	65	23,7
Após 15 minutos	75	23,4	70	23,6	40	23,8
Após 30 minutos	55	23,4	55	23,6	30	23,8
Após 45 minutos	30	23,4	40	23,7	-	-
Após 60 minutos	-	-	25	23,7	-	-

1 – Foram adicionados 1041,5 g de água à mistura até atingir o abatimento desejado de 70 ± 10 mm

2 – Foram adicionados 929,7 g de água à mistura até atingir o abatimento desejado de 70 ± 10 mm

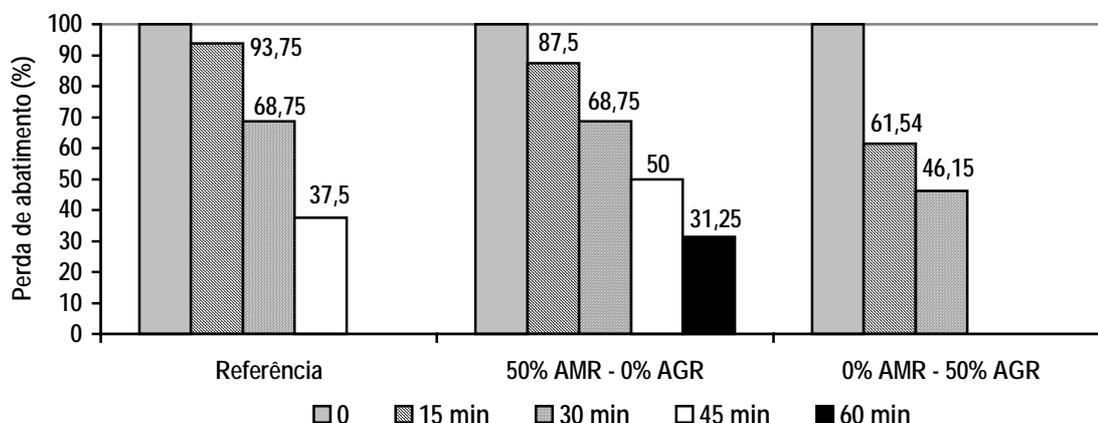


Figura 35 Percentuais de abatimento em relação à leitura inicial de cada traço

Contudo, passados os primeiros 15 minutos de ensaio, o concreto com agregado miúdo reciclado apresentou perda de abatimento mais lenta que o concreto de referência, obtendo inclusive percentuais de perda de abatimento menores para as leituras subsequentes. Isso pode ser explicado pelo comportamento da absorção neste tipo de material. De acordo com o que foi visto no item 4.7.2.1.3, o material reciclado absorve mais de 50 % de água nos primeiros 10 minutos de contato com a água e, por se tratar de partículas de pequenas dimensões, deve ter ocorrido saturação quase que

completa dos grãos do agregado. Passados os 15 minutos iniciais do ensaio, deve ter sido reduzida a absorção de água pelo agregado miúdo e, como foi necessário colocar maior quantidade de água nesta mistura para atingir o abatimento desejado, ocorreu um abrandamento da perda de abatimento no concreto com agregado miúdo reciclado havendo, possivelmente, uma inversão do transporte de água na mistura. Ou seja, inicialmente houve o transporte no sentido pasta – agregado, e depois dos 15 minutos iniciais, começou a haver o transporte no sentido agregado - pasta.

Por outro lado, o mesmo não aconteceu com o agregado graúdo reciclado. O concreto produzido com este agregado chegou ao limite de perda de abatimento estabelecido pela norma, 20 ± 10 mm, decorridos 30 minutos da primeira leitura. Esse fato denota que, quanto maior a granulometria do agregado reciclado utilizado, mais rápida é a perda de abatimento observada. Isso demonstra que, apesar do agregado graúdo reciclado apresentar uma taxa de absorção menor que a do agregado miúdo, a fração graúda do material reciclado absorve água mais lentamente, como pode ser confirmado nos gráficos de absorção apresentados na Figura 22 e na Figura 23 do item 4.7.2.1.3. Assim, foi acrescentada à mistura de concreto com agregado graúdo reciclado menor quantidade de água para obtenção do abatimento desejado de 70 ± 10 mm e, como este agregado demora um pouco mais para atingir a saturação completa em relação à fração miúda, é de se esperar que a perda de abatimento da mistura com agregado graúdo reciclado tenha sido maior.

É interessante mencionar que os índices de perda de abatimento dos concretos reciclados em relação ao concreto de referência foram cerca de 33 % maior para o concreto com agregado graúdo e cerca de 33 % menor para o concreto com agregado miúdo reciclado. Esses valores foram calculados para os tempos de ensaio de 30 e 45 minutos, respectivamente. Se fosse executado um traço de concreto usando 50 % de cada uma das frações do agregado reciclado talvez os efeitos pudessem se compensar e a perda de abatimento do concreto reciclado poderia estar mais próxima da perda de abatimento do concreto de referência.

Com base nos resultados é possível comprovar que existe uma tendência dos concretos com agregados reciclados apresentarem perdas de abatimento mais elevadas que concretos convencionais, principalmente nos instantes iniciais. Uma boa alternativa para tentar minimizar este efeito é trabalhar com índices de abatimento um pouco maiores para concretos com agregados reciclados. Adicionalmente, de acordo com MEHTA e MONTEIRO (1994), devem ser tomados cuidados com o uso de aditivos redutores de água, principalmente os superplastificantes de alta eficiência, e aceleradores de pega, bem como ser evitado o uso de cimentos com altos teores de álcalis e C_3A e de C_3S . O

cimento com alto teor de C_3A tem pega instantânea e desenvolve alto calor de hidratação e o C_3S também libera alto calor de hidratação nos instantes iniciais, devido à alta resistência.

5.2.3 Avaliação da trabalhabilidade e da perda de trabalhabilidade dos concretos reciclados através do abatimento do tronco de cone e do ensaio VeBe

Como foi mencionado no item 4.2.2.3, foram realizados os ensaios de abatimento e tempo de vibração VeBe de algumas misturas de concreto para avaliar sua trabalhabilidade e perda de trabalhabilidade como está descrito em 4.2.2.3.1. A seguir estão apresentados os resultados obtidos com este estudo exploratório.

5.2.3.1 Relação a/c e resistência à compressão

Na Tabela 46 estão apresentados os resultados do abatimento e do tempo de vibração VeBe antes e depois do acréscimo de água nas misturas de concreto reciclado para que os mesmos apresentassem o mesmo tempo de vibração VeBe dos concretos de referência. Observa-se através dos resultados que, de forma geral, mesmo o tempo de vibração VeBe ficando o mais semelhante possível para todas as misturas de concreto, o abatimento dos concretos reciclados não obedeceu um comportamento uniforme. Apresenta-se ainda nesta tabela a relação a/c final das misturas de concreto, bem como a relação entre o a/c do concreto reciclado e do concreto de referência.

Tabela 46 Resultados do abatimento, do tempo VeBe e relações a/c antes e depois do acréscimo de água às misturas de concreto reciclado

	Antes do acréscimo de água			Depois do acréscimo de água			real	ref
	a/C _{inicial}	Abat. (mm)	VeBe (s)	a/C _{final}	Abat. (mm)	VeBe (s)		
Referência		15,00	6,47	-	-	-	-	-
50 % AMR / 0 % AGR	0,40	0,00	19,19	0,49	65,00	4,78	1,23	
0 % AMR / 50 % AGR		0,00	28,47	0,48	35,00	4,39	1,20	
50 % AMR / 50 % AGR		-	-	0,54	43,00	6,15	1,35	
100 % AMR / 100 % AGR		-	-	0,71	70,00	3,12	1,78	
Referência			40,00	4,64	-	-	-	-
50 % AMR / 0 % AGR	0,60	6,00	13,38	0,69	40,00	4,16	1,15	
0 % AMR / 50 % AGR		1,00	12,90	0,70	30,00	4,82	1,17	
50 % AMR / 50 % AGR		6,00	47,44	0,79	25,00	4,42	1,32	
100 % AMR / 100 % AGR		-	-	0,99	30,00	5,31	1,65	
Referência			20,00	5,27	-	-	-	-
50 % AMR / 0 % AGR	0,80	3,00	10,91	0,90	20,00	3,73	1,13	
0 % AMR / 50 % AGR		1,00	13,59	0,92	10,00	6,66	1,15	
50 % AMR / 50 % AGR		-	-	1,07	30,00	3,69	1,34	
100 % AMR / 100 % AGR		-	-	1,30	25,00	5,55	1,63	

$a/C_{real} / a/C_{ref}$ – relação a/c final em relação a relação a/c do concreto de referência

É possível observar que a quantidade de água nas misturas aumentou de entre 13 e 78 % a depender do tipo de substituição utilizado nas misturas de concreto reciclado. É importante salientar que o ajuste de água durante a produção das misturas de concreto não é uma tarefa muito fácil. Uma vez que se trabalhou com três faixas bem distintas de concreto, ou seja, uma mistura muito rica, uma mistura média e outra muito pobre em cimento, ajustar a água, dadas as características físicas dos agregados reciclados, implica, em alguns casos, em adicionar água a mais ou até água a menos. É lógico que esta consideração tem mais sentido para os traços extremos. Por exemplo, para o traço com relação a/c inicial 0,80, e 50 % de AMR e 0 % de AGR deveria ter sido acrescentado um pouco menos de água, enquanto para o outro traço com 0 % de AMR e 50 % AGR deveria haver um pouco mais de água. Nestes dois traços, para a relação a/c 0,40 foi acrescentado mais água que o necessário para que as misturas atingissem o mesmo tempo VeBe do traço de referência.

Também nesta fase da investigação da trabalhabilidade das misturas de concreto com agregados reciclados observou-se que os resultados do ensaio de abatimento são bastante variáveis, se desviando muito do abatimento de 70 ± 10 mm adotado como parâmetro de dosagem.

Salienta-se, ainda, no exame dos resultados apresentados na Tabela 46, que foi realizada a determinação do abatimento e do tempo de vibração VeBe antes e depois da adição de água para o traço com 50 % de AMR e 50 % de AGR e relação a/c 0,60. Observa-se que para um abatimento de 6 mm, este concreto apresentou um tempo de vibração VeBe de cerca de 50 segundos. Esta mistura, como foi mencionado anteriormente, era bastante áspera e sem coesão. Com o acréscimo de cerca de 30 % de água, a mistura de concreto reciclado alcançou o mesmo tempo VeBe do concreto de referência, todavia o abatimento do concreto reciclado foi 37 % inferior ao abatimento do concreto de referência, a resistência (como pode ser observada na Tabela 47) caiu apenas 2 % em relação à resistência calculada e 10 % em relação à resistência do referência. Deste modo, é possível dizer que, para alcançar o mesmo abatimento do concreto de referência, deveria ser acrescentada ainda mais água à mistura de concreto reciclado, o que reduziria ainda mais a resistência do concreto.

A Tabela 47 apresenta os consumos de cimento para os traços estudados, bem como as resistências à compressão axial calculadas a partir do modelo matemático apresentado no item 6.1 e a resistência obtida com a ruptura dos corpos-de-prova moldados durante a execução das misturas de concreto para avaliação da trabalhabilidade.

Através da avaliação dos resultados da Tabela 47, observa-se que, o aumento das relações a/c do concreto reciclado, teve como consequência reduções de até 40 % na resistência dos concretos. No

entanto vale salientar que o consumo de cimento nestas misturas de concreto diminuiu com o aumento da relação a/c. Estas reduções no consumo de cimento chegaram a um máximo de 12 %.

Tabela 47 Consumo de cimento e resistência à compressão axial dos concretos produzidos

a/c	Tipo de traço	a/c _{real}	C (kg/m ³)	C _{rec} / C _{ref}	f _{C_{real}} (MPa)	f _{C_{calculado}} (MPa)	f _{C_{real}} / f _{C_{calculado}}
0,40	Referência	0,40	449	-	41,0	39,6	1,04
	50 % AMR / 0 % AGR	0,49	431	0,96	33,4	40,5	0,82
	0 % AMR / 50 % AGR	0,48	433	0,96	29,3	34,6	0,85
	50 % AMR / 50 % AGR	0,54	422	0,94	28,9	35,6	0,81
	100 % AMR / 100 % AGR	0,71	394	0,88	21,6	31,6	0,68
0,60	Referência	0,60	299	-	22,1	19,6	1,13
	50 % AMR / 0 % AGR	0,69	291	0,97	20,1	20,6	0,98
	0 % AMR / 50 % AGR	0,70	290	0,97	18,4	19,4	0,95
	50 % AMR / 50 % AGR	0,79	283	0,94	19,9	20,4	0,98
	100 % AMR / 100 % AGR	0,99	268	0,90	15,8	21,1	0,75
0,80	Referência	0,80	224	-	14,3	13,0	1,10
	50 % AMR / 0 % AGR	0,90	219	0,98	15,3	13,9	1,10
	0 % AMR / 50 % AGR	0,92	219	0,97	12,4	14,4	0,86
	50 % AMR / 50 % AGR	1,07	212	0,94	10,2	15,3	0,67
	100 % AMR / 100 % AGR	1,30	202	0,90	10,7	17,7	0,60

a/c_{real} – relação a/c final de cada traço de concreto produzido

C – consumo de cimento por m³ de concreto

C_{rec} / C_{ref} – consumo de cimento do concreto reciclado em relação ao concreto de referência

f_{C_{real}} – resultado de resistência à compressão obtido para os traços de concreto produzidos durante os ensaios de abatimento e VeBe

f_{C_{calculado}} – resultado de resistência à compressão obtido através do modelo matemático apresentado no item 6.1

Com base nestes resultados é possível comprovar que, quando se deseja produzir concretos reciclados a partir de traços de concretos convencionais, utilizando como parâmetro de controle das misturas a trabalhabilidade medida pelo abatimento, o aumento da relação a/c das misturas de concreto reciclado leva à redução da resistência à compressão dos mesmos. Como alternativa para minimizar este efeito poderia ser feito o aumento do consumo de cimento das misturas de concreto reciclado, tentando deixá-lo mais próximo do consumo de cimento do concreto de referência. Todavia, não se sabe ao certo qual seria o efeito do aumento tanto do consumo de água quanto de cimento sobre o abatimento dos concretos. Adicionalmente, a adoção deste procedimento poderia tornar a utilização do material reciclado inviável, pelo possível aumento do custo dos concretos, em virtude do aumento do consumo de cimento.

Além disso, pode-se afirmar que as reduções na resistência à compressão dos concretos reciclados apontadas pela bibliografia não se deve somente ao uso do agregado reciclado, mas também aos procedimentos de dosagem até agora utilizados para produção de concretos. O simples aumento da quantidade de água das misturas para tornar o abatimento do concreto reciclado igual à do

concreto de referência pode ser um importante fator de redução das resistências. Com os resultados apresentados neste trabalho é possível salientar que o abatimento dos concretos reciclados não precisa necessariamente ser igual ao dos concretos de referência para que se possa trabalhar com os primeiros e obter concretos com propriedades mecânicas compatíveis às do concreto convencional. Esta afirmação se baseia no fato de que os resultados de resistência dos concretos reciclados foram em muitos casos semelhantes, ou até melhores que os do concreto de referência, como está apresentado no item 6.1. Se assim não o fosse, seriam observadas reduções de resistência, na maioria dos traços de concreto reciclado produzidos, em função de problemas com o adensamento das misturas, além de problemas com as características físicas dos agregados.

Seria interessante realizar um estudo em vários traços de concreto reciclado nos quais a relação a/c aumentasse gradativamente, sendo determinados o abatimento, o tempo $VeBe$ e a resistência à compressão de cada mistura. Desta maneira seria possível avaliar a relação a/c a partir da qual o concreto reciclado perderia a sua capacidade de ser moldado, avaliado pela perda de resistência por falta de compacidade das misturas, e também o inverso, o momento a partir do qual a quantidade de água da mistura se tornaria excessiva, causando deste modo redução da resistência. Ou seja, talvez seja possível desta forma encontrar a quantidade ótima de água e o abatimento e tempo de vibração correspondentes, descrevendo, se possível, uma correlação entre os fatores.

5.2.3.2 Ensaio de abatimento do tronco de cone e ensaio para medida do tempo $VeBe$

Na Tabela 48 estão apresentados os resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 48 foram obtidos os gráficos da Figura 36.

Observa-se que os concretos com agregados reciclados não apresentaram um comportamento padrão. Para cada relação a/c avaliada, as diferentes combinações de substituição apresentaram resultados distintos, principalmente no caso da relação a/c baixa (0,40) (Figura 36a).

Analisando os resultados da relação a/c 0,60 (Figura 36b) verifica-se que a realização da pré-umidificação dos agregados, antes da mistura do concreto, fez com que estes resultados fossem um pouco diferentes dos resultados dos mesmos traços apresentados na Figura 35. Desta vez o concreto com 0 % de AMR e 50 % AGR não perdeu abatimento tão bruscamente quanto na primeira etapa deste estudo (item 5.2.2). Na primeira fase do estudo de perda de abatimento dos concretos também foi mencionado que talvez se as duas frações de agregados reciclados fossem utilizadas, os efeitos da perda de abatimento do traço só com AMR e do traço só com AGR poderiam se compensar. Este

comportamento realmente pode ser observado na Figura 36b. A perda de abatimento para os traços com 50 % e 100 % de substituição de ambas frações de agregados reciclados não foi brusca, com exceção do caso da relação a/c 0,40. Este comportamento pode estar relacionado com o mecanismo de transporte interno da água dentro das misturas de concreto. Pode ser que a água absorvida pelos agregados reciclados num instante inicial esteja disponível após um certo tempo, contribuindo para que a perda de abatimento não seja tão brusca. Além disso o fato de pré-umidificar os agregados antes da mistura de concreto reduz a probabilidade de perda de trabalhabilidade brusca observada no concreto reciclado, principalmente nos instantes iniciais.

Tabela 48 Resultados de abatimento das misturas de concreto e suas respectivas relações unitárias de perda de abatimento

a/c	Tipo de traço	Abatimento (mm)					Relação unitária (A_n/A_0) ⁽¹⁾				
		Instante de determinação (min) ⁽²⁾					Instante de determinação (min) ⁽²⁾				
		12	25	44	63	83	12	25	44	63	83
0,40	Referência	15	20	20	12	6	1,00	1,33	1,33	0,80	0,40
	50 % AMR / 0 % AGR	65	35	20	15	10	1,00	0,54	0,31	0,23	0,15
	0 % AMR / 50 % AGR	35	26	22	10	5	1,00	0,74	0,63	0,29	0,14
	50 % AMR / 50 % AGR	43	30	20	15	8	1,00	0,70	0,47	0,35	0,19
	100 % AMR / 100 % AGR	70	30	25	15	15	1,00	0,43	0,36	0,21	0,21
0,60	Referência	40	30	25	20	10	1,00	0,75	0,63	0,50	0,25
	50 % AMR / 0 % AGR	40	40	20	15	10	1,00	1,00	0,50	0,38	0,25
	0 % AMR / 50 % AGR	30	20	15	10	6	1,00	0,67	0,50	0,33	0,20
	50 % AMR / 50 % AGR	25	20	15	10	6	1,00	0,80	0,60	0,40	0,24
	100 % AMR / 100 % AGR	30	30	20	15	5	1,00	1,00	0,67	0,50	0,17
0,80	Referência	20	15	10	6	3	1,00	0,75	0,50	0,30	0,15
	50 % AMR / 0 % AGR	20	25	20	10	10	1,00	1,25	1,00	0,50	0,50
	0 % AMR / 50 % AGR	10	10	8	5	5	1,00	1,00	0,80	0,50	0,50
	50 % AMR / 50 % AGR	30	30	20	15	10	1,00	1,00	0,67	0,50	0,33
	100 % AMR / 100 % AGR	25	25	20	10	10	1,00	1,00	0,80	0,40	0,40

(1) A_n = Abatimento no instante n / A_0 = Abatimento no instante inicial

(2) Instante médio de determinação do ensaio em relação ao instante de adição do cimento à mistura de concreto

Na Tabela 49 estão apresentados os resultados do ensaio do tempo de vibração VeBe.

A partir dos resultados da Tabela 49 foram obtidos os gráficos da Figura 37.

O ganho de tempo VeBe expressa a perda de trabalhabilidade dos concretos. Quanto maior o tempo de vibração necessário para compactar a massa de concreto fresco, menor é a trabalhabilidade da mistura.

Pelos gráficos da Figura 37 observa-se que há muita semelhança entre os resultados obtidos para os concretos reciclados e os concretos de referência no tocante ao ganho no tempo de vibração VeBe. Pode-se dizer então que a introdução de uma componente dinâmica ao sistema de medição da

trabalhabilidade dos concretos reciclados permite uma melhor avaliação do comportamento dos concretos com agregados reciclados. Não foi possível contudo, com este estudo, encontrar uma correlação entre o abatimento dos concretos com agregados reciclados e o seu respectivo tempo de vibração VeBe.

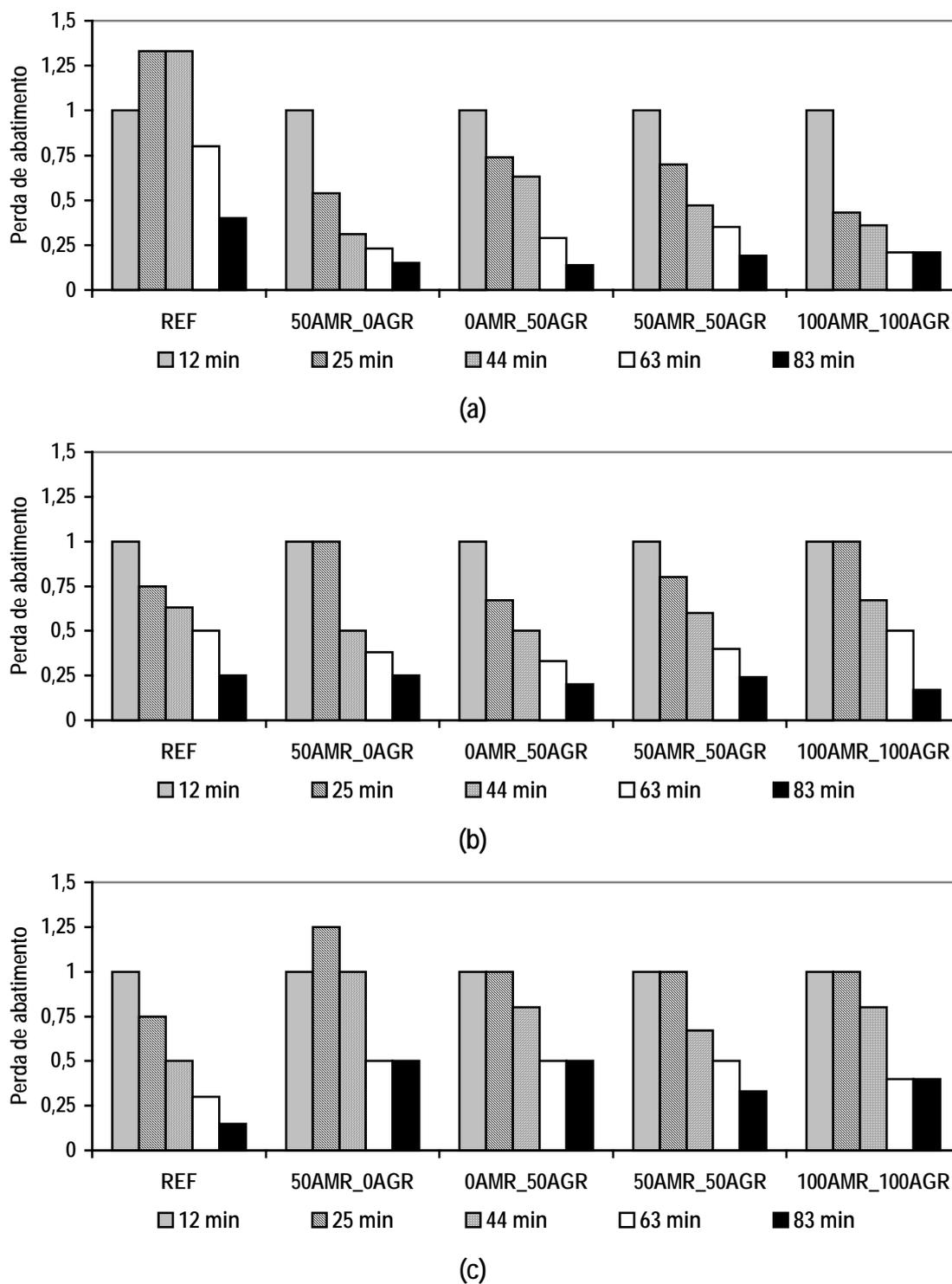


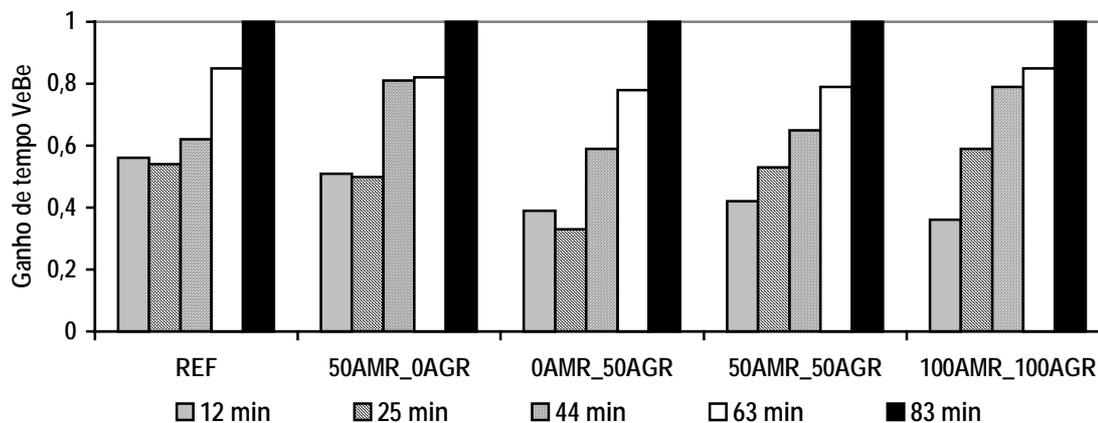
Figura 36 Índice de perda de abatimento dos concretos em relação à leitura inicial: a) $a/c = 0,40$; b) $a/c = 0,60$; c) $a/c = 0,80$

Tabela 49 Resultados de tempo de vibração VeBe das misturas de concreto e suas respectivas relações unitárias de ganho de tempo de vibração

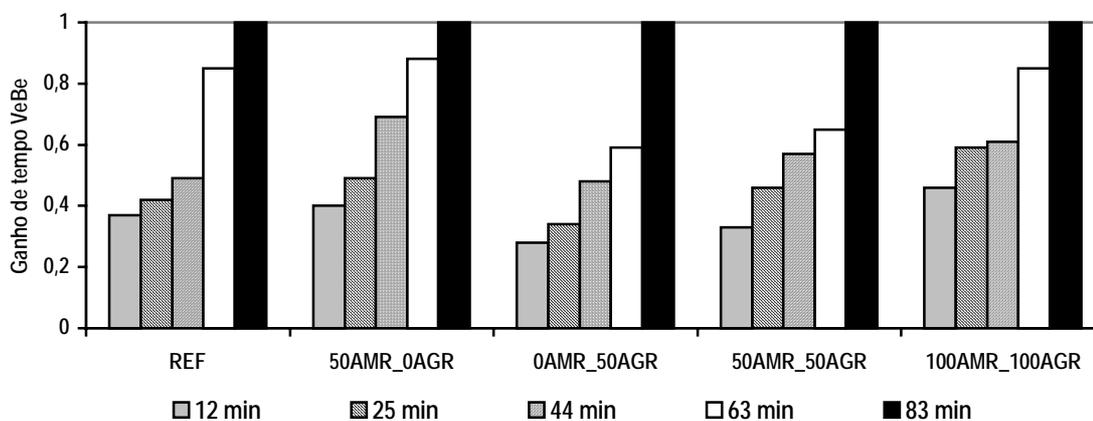
a/c	Tipo de traço	Tempo VeBe (s)					Relação unitária (T_n/T_f) ⁽¹⁾				
		Instante de determinação (min) ⁽²⁾					Instante de determinação (min) ⁽²⁾				
		12	25	44	63	83	12	25	44	63	83
0,40	Referência	6,47	6,28	7,16	9,87	11,62	0,56	0,54	0,62	0,85	1,00
	50 % AMR / 0 % AGR	4,78	4,72	7,65	7,74	9,44	0,51	0,50	0,81	0,82	1,00
	0 % AMR / 50 % AGR	4,39	3,75	6,68	8,87	11,35	0,39	0,33	0,59	0,78	1,00
	50 % AMR / 50 % AGR	6,15	7,81	9,44	11,62	14,63	0,42	0,53	0,65	0,79	1,00
	100 % AMR / 100 % AGR	3,12	5,13	6,78	7,32	8,63	0,36	0,59	0,79	0,85	1,00
0,60	Referência	4,64	5,28	6,21	10,69	12,62	0,37	0,42	0,49	0,85	1,00
	50 % AMR / 0 % AGR	4,16	5,12	7,25	9,22	10,53	0,40	0,49	0,69	0,88	1,00
	0 % AMR / 50 % AGR	4,82	5,87	8,13	10,09	17,06	0,28	0,34	0,48	0,59	1,00
	50 % AMR / 50 % AGR	4,42	6,19	7,66	8,78	13,5	0,33	0,46	0,57	0,65	1,00
	100 % AMR / 100 % AGR	5,31	6,78	7,06	9,72	11,5	0,46	0,59	0,61	0,85	1,00
0,80	Referência	5,27	7,84	11,1	13,91	19,25	0,27	0,41	0,58	0,72	1,00
	50 % AMR / 0 % AGR	3,73	5,19	7,87	11,5	13,94	0,27	0,37	0,56	0,82	1,00
	0 % AMR / 50 % AGR	6,66	11,32	13,75	16,53	25,09	0,27	0,45	0,55	0,66	1,00
	50 % AMR / 50 % AGR	3,69	3,84	5,31	8,25	11,91	0,31	0,32	0,45	0,69	1,00
	100 % AMR / 100 % AGR	5,55	6,75	6,88	9,59	11,56	0,48	0,58	0,60	0,83	1,00

(1) T_n = Tempo de vibração no instante n / T_f = Tempo de vibração no instante final

(2) Instante médio de determinação do ensaio em relação ao instante de adição do cimento à mistura de concreto



(a)



(b)

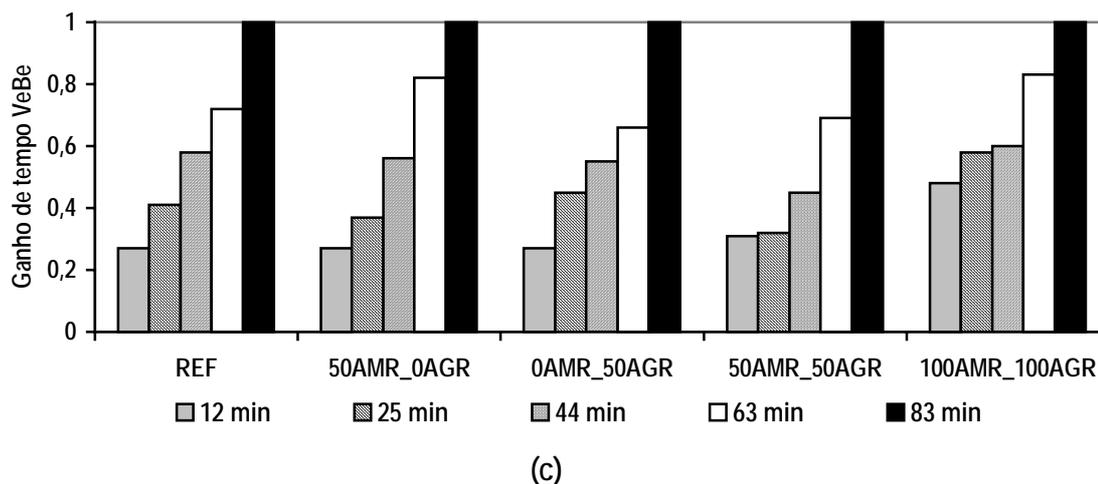


Figura 37 Índice de ganho no tempo VeBe dos concretos em relação à leitura final: a) $a/c = 0,40$; b) $a/c = 0,60$; c) $a/c = 0,80$

5.2.4 Considerações gerais

A partir do estudo realizado é possível concluir que o ensaio do tempo de vibração VeBe fornece melhor parâmetro para avaliar a trabalhabilidade das misturas de agregados reciclados, principalmente quando a trabalhabilidade for considerada como fator de controle da produção de concretos reciclados. O uso do abatimento do tronco de cone como fator de controle da produção dos concretos reciclados se mostrou um tanto ineficiente. Uma vez que a quantidade de água adicionada às misturas, para que se obtenha o abatimento do concreto reciclado igual ao do concreto de referência, tende a ser maior que a necessária para que se produza misturas com o mesmo tempo de vibração VeBe, por exemplo. Contudo, poderia ser testado outro método para avaliação da trabalhabilidade dos concretos reciclados e tentar sua correlação com os métodos mais conhecidos como o de abatimento, ou o próprio VeBe.

DACZKO (2000) menciona o estudo da reologia dos concretos de acordo com o modelo de Bingham, que define esta propriedade a partir da tensão de escoamento e da viscosidade plástica dos materiais. De forma sucinta, este modelo é aplicado a materiais que necessitam da imposição de uma certa quantidade de energia para escoar. Segundo SZWABOWSKI, citado por WALLEVIK et al. (1995), estes dois parâmetros são fortemente influenciados pelo tipo de agregado utilizado. Talvez para o caso dos concretos reciclados seria interessante que se introduzisse estes conceitos para medir a sua trabalhabilidade.

6 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA O CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

Para a análise estatística dos resultados dos ensaios de propriedades mecânicas do concreto no estado endurecido foram utilizados os mesmos parâmetros e equações descritos no início do capítulo 5.

6.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

É sabido que a resistência à compressão axial do concreto é uma das propriedades mais importantes quando se avalia o desempenho de uma estrutura. A resistência está ligada à capacidade dos materiais de resistir a tensões sem que haja ruptura. De uma forma ampla, a resistência está intimamente relacionada à porosidade dos materiais. Quanto mais porosos estes se apresentam, menor tende a ser sua resistência. No concreto, além da porosidade da matriz de cimento e do agregado graúdo, deve ser considerada a porosidade da zona de transição entre a matriz e o agregado. No estudo da resistência do concreto com agregados naturais, geralmente o uso de agregados densos e resistentes fazem com que esta propriedade seja influenciada basicamente pela porosidade da matriz e da zona de transição. Contudo, quando se estuda a resistência de concretos com material reciclado, acredita-se que a porosidade do agregado passe a ter um papel importante na determinação da resistência do concreto. Com base nesta premissa é que este estudo foi desenvolvido e através da equação 6.1 pode-se constatar a influência, entre outras variáveis, do agregado reciclado na resistência à compressão do concreto.

$$f_c = 7,104 + \frac{15,594}{a/c} + 4,531 * AGR + 1,178 * AMR + 4,453 * Idade - \frac{5,149 * AGR}{a/c} + \frac{0,923 * Idade}{a/c} + 0,502 * AMR * Idade - \frac{0,970 * AGR * Idade}{a/c} \quad [6.1]$$

A equação 6.1 foi obtida a partir da análise de regressão dos resultados experimentais (ANEXO 1, Tabela 67 e Tabela 68) e descreve o modelo ajustado de resistência à compressão dos concretos com agregados reciclados. Como foi mencionado no início deste capítulo, para análise da resistência à compressão dos concretos, além do efeito das variáveis a/c , AGR, AMR e suas combinações, foi analisado também o efeito da variável idade, isolado e combinado com as demais variáveis, sobre os resultados desta propriedade.

Pela equação 6.1 é possível observar que os efeitos significativos, em ordem de importância, são: as variáveis a/c , AGR, Idade e AMR isoladamente, as combinações $AGR \times a/c$, $Idade \times a/c$ e $AMR \times Idade$ e a combinação $AGR \times Idade \times a/c$. O modelo possui um coeficiente de determinação r^2 igual a 0,919. É importante lembrar que a equação foi ajustada para os níveis codificados das variáveis apresentados na Tabela 42.

6.1.1 Efeito isolado da relação a/c sobre a resistência à compressão axial do concreto

A Figura 38 apresenta o gráfico de tendência do comportamento do efeito isolado da relação a/c sobre a resistência à compressão do concreto. O gráfico foi obtido variando os valores codificados de a/c e mantendo as demais variáveis no ponto médio do intervalo codificado de cada uma delas.

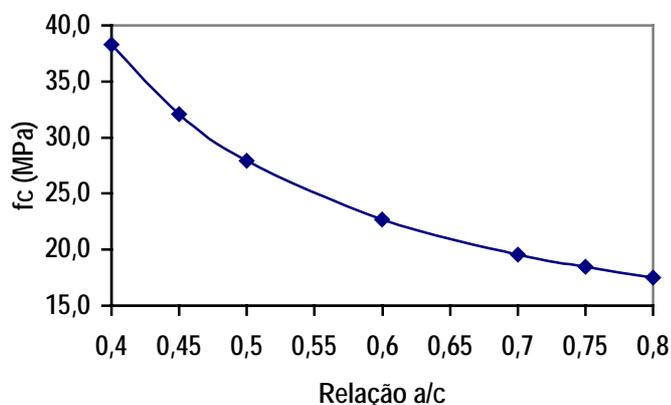


Figura 38 Resistência à compressão axial em função do efeito isolado da relação a/c

Através do gráfico é possível observar que a resistência à compressão do concreto tende a reduzir à medida que o valor de a/c aumenta. Isso apenas comprova as leis de comportamento amplamente difundidas no meio técnico de que a resistência à compressão é inversamente proporcional à relação a/c . Com o aumento da relação a/c ocorre um enfraquecimento progressivo da matriz de concreto devido ao aumento da porosidade, e, assim, ocorre a diminuição da resistência. Porém, como foi dito, esta é apenas uma tendência do comportamento, não se pode concluir, por exemplo, em que nível ocorre a redução da resistência somente com a análise deste gráfico, visto que a relação a/c apresentou interações significativas com AGR, Idade e as duas variáveis combinadas, como será visto adiante.

6.1.2 Efeito isolado do teor de substituição do agregado graúdo reciclado (%AGR) e do agregado miúdo reciclado (%AMR) sobre a resistência à compressão axial do concreto

Como foi dito anteriormente, a maior resistência e maior densidade dos agregados naturais utilizados para produção de concretos convencionais fazem com que estes apresentem menor influência sobre a resistência à compressão, uma vez que a sua resistência supera a resistência da matriz. O inverso ocorre com o uso do agregado reciclado. Os efeitos isolados dos teores de substituição de AGR e AMR foram calculados a partir da equação 6.1 considerando os pontos médios dos níveis codificados das demais variáveis e variando os níveis codificados de AGR e AMR separadamente. A tendência de comportamento da resistência à compressão do concreto, sob a influência da substituição do agregado natural pelo reciclado, pode ser visualizada na Figura 39.

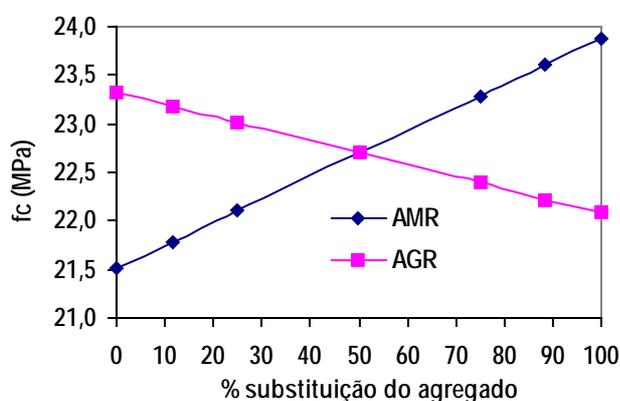


Figura 39 Resistência à compressão em função do efeito isolado do teor de substituição do agregado

Como pode ser observado no gráfico da Figura 39, o aumento do teor de substituição de AGR tende a diminuir a resistência, enquanto o aumento do teor de AMR tende a aumentar a resistência à compressão.

Em relação ao agregado graúdo, sua maior porosidade e menor resistência são fatores preponderantes para redução de f_c . Entretanto, é importante considerar também a influência da forma, textura e granulometria dos agregados sobre a resistência à compressão dos concretos produzidos, e o aumento da resistência com o aumento de AMR talvez possa ser explicado a partir destes fatores. O agregado reciclado apresenta maior rugosidade, o que contribui para melhorar a aderência; granulometria mais contínua e maior quantidade de finos, que diminuem a segregação, ajudam no efeito empacotamento e contribuem para o fechamento dos vazios. Como o agregado reciclado também possui maior absorção, pode haver, ainda, maior aderência entre a pasta e o agregado através da absorção da pasta e precipitação dos cristais de hidratação nos poros do agregado. No caso do uso

do agregado miúdo reciclado todos estes fatores podem ser considerados benéficos à resistência do concreto, pois além da melhoria na zona de transição, o agregado miúdo contribui também para o aumento da rigidez da matriz. Todavia, com o agregado graúdo, apesar de também ocorrer uma melhoria na zona de transição, o grão do agregado é mais frágil em relação ao restante do sistema e a falha pode ocorrer no agregado devido a sua maior dimensão, assim, quanto maior o seu teor na mistura, a resistência tende a ser menor para relações a/c médias, dentro do intervalo de a/c analisado nesta pesquisa.

Contudo, algumas variações de comportamento podem ocorrer quando estas variáveis estão combinadas com as demais variáveis utilizadas no estudo. A variável AMR, quando combinada com a idade apresentou efeito significativo, e como pode ser visto no item 6.1.6, variações na taxa de crescimento das resistências são percebidas quando se varia idade e AMR. Também a variável AGR quando combinada com a relação a/c ou a idade, separadamente ou em conjunto, ocasiona, igualmente, mudanças no comportamento do concreto em função do efeito destas interações terem sido apontados como significativos pela análise estatística dos dados (o efeito das interações pode ser observado nos itens 6.1.4 e 6.1.7).

6.1.3 Efeito isolado da Idade sobre a resistência à compressão axial do concreto

A Figura 40 apresenta a tendência de comportamento da resistência à compressão sob o efeito isolado da idade. Os dados para montagem do gráfico foram obtidos a partir do cálculo da resistência variando os níveis codificados da idade e mantendo as demais variáveis no ponto médio codificado.

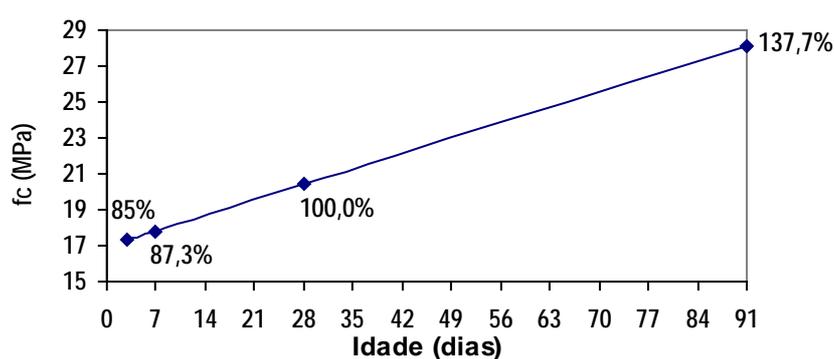


Figura 40 Resistência à compressão em função do efeito isolado da idade

O grau de hidratação do concreto representa, junto com a relação a/c, os fatores determinantes da resistência à compressão de concretos. O aumento da idade de hidratação do concreto também implica na diminuição da sua porosidade. No gráfico da Figura 40 estão apresentados os percentuais de tendência de crescimento da resistência à compressão. Observa-se que cerca de 87 % da

resistência total a 28 dias é alcançada aos 7 dias. Isso demonstra uma tendência à rápida evolução da hidratação do concreto com agregado reciclado, que deve ser resultado da taxa de absorção mais alta do agregado, que diminui a quantidade de água da mistura, fazendo com que os cristais de etringita e de hidróxido de cálcio formados cresçam menos, tornando a pasta mais densa. E ainda, é possível observar que até, os 91 dias, a resistência do concreto tende a aumentar cerca de 38 % em relação aos 28 dias. Isso demonstra que existe um possível efeito retardado de hidratação no concreto com agregado reciclado. É possível supor que a alta absorção do agregado reciclado pode contribuir para que haja um efeito de cura interna tardia no concreto. Quando boa parte da água da mistura foi combinada, existe ainda a água presente no agregado, que pode estar disponível para que as reações de hidratação continuem acontecendo. Além disso, existe o efeito do agregado miúdo reciclado, como será visto adiante, que pode levar ao crescimento da resistência com o grau de hidratação do concreto (item 6.1.6, Figura 43). Todavia, além desta interação, as interações $a/c \times Idade$ e $a/c \times Idade \times AGR$ apresentaram efeito significativo e podem ocasionar variações da tendência de crescimento da resistência com o grau de hidratação do concreto (itens 6.1.5 e 6.1.7).

6.1.4 Efeito da interação $a/c \times AGR$ sobre a resistência à compressão axial do concreto

O gráfico que representa a resistência à compressão em função de AGR (%) foi obtido a partir da equação 6.1 variando os valores codificados de AGR para cada relação a/c , também codificada e mantendo as demais variáveis no ponto médio. O mesmo foi feito para obtenção do gráfico da resistência à compressão em função da relação a/c . Os respectivos gráficos podem ser visualizados na Figura 41.

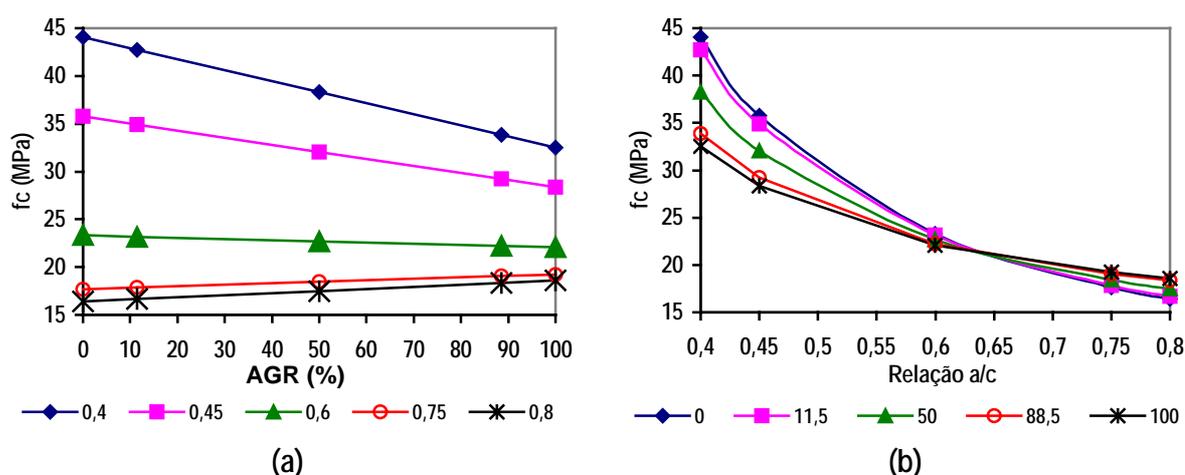


Figura 41 Resistência à compressão em função do efeito da interação $a/c \times AGR$: a) Gráfico de $f_c(\%AGR)$; b) Gráfico $f_c(a/c)$

Através dos gráficos pode-se observar que, quanto menor a relação a/c , menor é a resistência à compressão, para teores elevados de substituição do agregado graúdo. Em contrapartida, para relações a/c maiores que cerca de 0,65 o comportamento se inverte, quanto maior o teor de substituição do agregado graúdo, maior a resistência obtida (Figura 41b). Na verdade, pode-se dividir o gráfico da Figura 41b em três faixas distintas:

- **faixa 1** - valores de a/c menores que aproximadamente 0,60, na qual quanto menor o teor de substituição de AGR, maior a resistência à compressão;
- **faixa 2** – valores de a/c compreendidos entre 0,60 e 0,70, aproximadamente, na qual para qualquer teor de substituição de AGR os valores de resistência são aproximadamente iguais;
- **faixa 3** – valores de a/c maiores que aproximadamente 0,70, na qual quanto maior o teor de substituição de AGR, maior é a resistência.

Ainda pode ser observado que a taxa de crescimento da resistência com o aumento do teor de substituição do agregado graúdo para relações a/c maiores que cerca de 0,65 é menor (cerca de 13 %, para $a/c = 0,80$, quando AGR varia de 0 a 100 %) que a taxa de decréscimo da resistência apresentada para valores baixos de relação a/c (cerca de 26 %, para $a/c = 0,40$, quando AGR varia de 0 a 100 %) (Figura 41a).

Quando se analisou a influência do efeito isolado do teor de AGR sobre a resistência, observou-se uma tendência de diminuição desta propriedade à medida que o teor de AGR aumentava e atribuiu-se esse fato ao próprio grão do agregado, devido à sua baixa densidade e resistência. Ao analisar a estrutura da matriz de concretos com relações a/c baixas, observa-se que a porosidade do sistema é altamente reduzida. Em concretos convencionais nos quais os agregados naturais utilizados apresentam resistência e densidade satisfatórios, todo o conjunto passa a contribuir benéficamente para a aumento da resistência. Entretanto, ao analisar-se a estrutura de concretos com agregados reciclados, observa-se que, apesar da matriz e da zona de transição do concreto terem sido igualmente melhoradas, o elo frágil da mistura passa a ser o grão do agregado e, portanto, quanto maior o teor de substituição, maior é a redução observada na resistência. Por outro lado, à medida que a relação a/c aumenta, a porosidade da matriz e da zona de transição do concreto convencional aumentam também e a densidade e resistência do agregado graúdo natural tem a sua influência muito diminuída, diferente do agregado reciclado, que passa a ter os valores destas propriedades semelhantes aos da matriz do concreto, deixando de ser assim o elo frágil do sistema. Neste ponto, as características relacionadas

com o agregado que passam a ter influência são a sua distribuição granulométrica, textura, forma e taxa de absorção. O agregado reciclado, como se sabe, apresenta maior absorção, textura mais rugosa, forma mais irregular e granulometria mais contínua e esses fatores contribuem para o aumento da aderência pasta/agregado, ou seja, a zona de transição de concretos reciclados com relações a/c mais altas é melhor que a zona de transição de concretos convencionais com semelhantes proporções, e todo conjunto passa a atuar na absorção e distribuição das tensões de forma semelhante, ajudando a aumentar a resistência dos concretos reciclados com altas relações a/c .

6.1.5 Efeito da interação a/c idade sobre a resistência à compressão

Na Figura 42 pode ser visualizado o efeito da interação a/c idade sobre a resistência à compressão dos concretos. Os valores para o montagem do gráfico foram obtidos a partir da equação 6.1, variando os valores codificados da Idade para cada valor codificado da relação a/c e mantendo as demais variáveis no seu ponto médio.

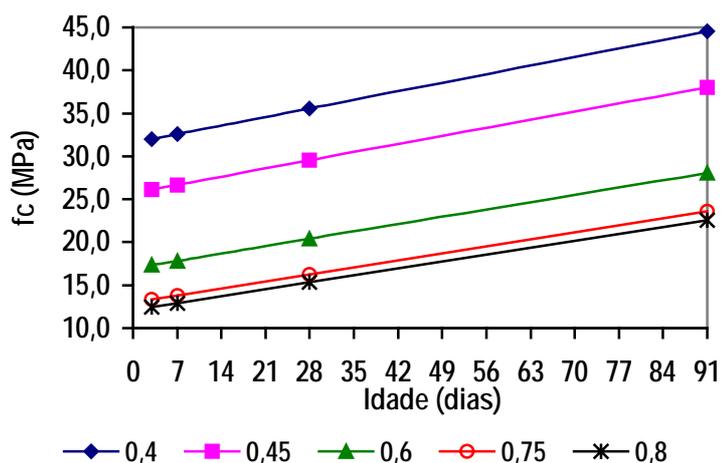


Figura 42 Resistência à compressão do concreto em função do efeito da interação a/c idade

A interação a/c idade confirma a tendência da diminuição da porosidade da matriz de concreto com o aumento do grau de hidratação e a diminuição da relação a/c , como já foi visto na Figura 38 e na Figura 40. A Tabela 50 apresenta o resultado do percentual de crescimento da resistência em relação a resistência aos 28 dias para cada relação a/c .

Observa-se uma tendência de crescimento da resistência mais rápido nas primeiras idades para relações a/c mais baixas e uma pequena redução na taxa de crescimento para valores de a/c mais altos. Em contrapartida, a taxa de crescimento até os 91 dias para os traços com altos valores de a/c é maior que a taxa de crescimento observada nos concretos com baixas relações a/c . De acordo

com NEVILLE (1995), o fato de existir maior proximidade entre os grãos de cimento nos traços mais ricos, nas primeiras idades, contribui para que haja formação mais rápida de um sistema contínuo de gel. O contrário ocorre com traços mais pobres, nos quais os grãos de cimento ficam mais dispersos na mistura. Por outro lado, a medida que o tempo passa e o sistema tende a se densificar mais, os traços com relações a/c baixas disporão de menor quantidade de água e de menor espaço para hidratar os grãos de cimento que permaneceram anidros até esta altura, diferente dos traços com maiores relações a/c que ainda possuem espaço suficiente e água para se combinar com os grãos de cimento e aumentar a taxa de crescimento das resistências. É importante lembrar que o efeito significativo das interações AMR \times Idade e a/c \times AGR \times Idade geram a possibilidade de variações das taxas de crescimento das resistências com o tempo.

Tabela 50 Percentual de hidratação do concreto em relação a resistência à 28 dias

Relação a/c	Grau de hidratação			
	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
0,40	89,9	91,5	100,0	125,3
0,45	88,5	90,4	100,0	128,7
0,60	85,0	87,3	100,0	137,7
0,75	82,0	84,9	100,0	145,1
0,80	81,1	84,1	100,0	147,3

6.1.6 Efeito da interação AMR \times Idade sobre a resistência à compressão dos concretos

O gráfico da resistência em função da idade, variando os teores de substituição de AMR, está representado na Figura 43. Os resultados do gráfico foram obtidos variando os valores codificados da Idade para cada valor codificado de AMR e considerando os pontos médios das demais variáveis da equação 6.1.

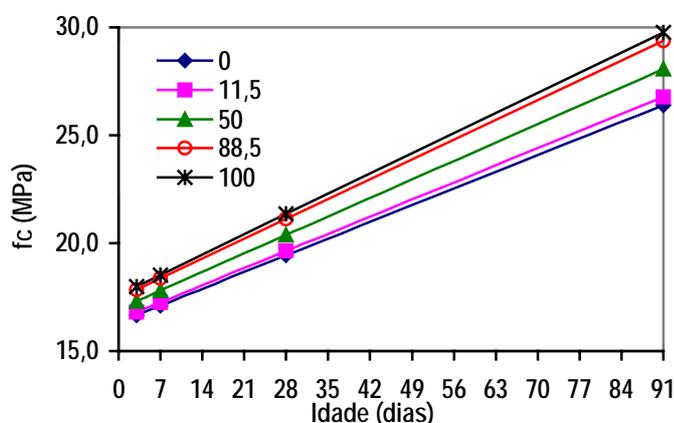


Figura 43 Resistência à compressão do concreto em função do efeito da interação AMR \times Idade

Observa-se que, para qualquer idade, quanto maior o teor de substituição do agregado miúdo, maior é o resultado de resistência alcançado. Como foi considerado na análise da influência isolada de AMR (item 6.1.2, Figura 39), o agregado miúdo reciclado aumenta a rigidez da matriz do concreto produzido com o mesmo, seja pela melhor aderência existente entre o agregado e a pasta, seja pelo efeito físico de preenchimento dos espaços vazios que torna a matriz mais densa, ou ainda por uma redução da relação água/cimento da mistura, pois como foi visto no item 4.7.2.1.3, somente 50 % da absorção total da fração fina reciclada foi compensada. Além disso, com a análise da Figura 43 pode ser considerado agora o efeito do aumento da resistência do concreto com agregado miúdo reciclado com o grau de hidratação do concreto. A Tabela 51 mostra o percentual de crescimento da resistência em relação a resistência aos 28 dias para cada teor de AMR avaliado.

Tabela 51 Percentual de hidratação do concreto em relação a resistência à 28 dias, na análise da interação AMR x Idade

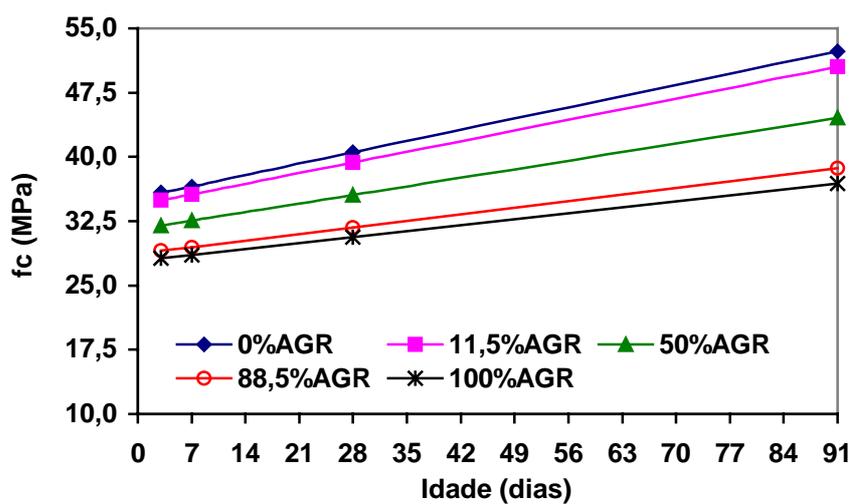
% AMR	Grau de hidratação			
	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
0	85,7	88,0	100,0	135,9
11,5	85,5	87,8	100,0	136,3
50	85,0	87,3	100,0	137,7
88,5	84,5	86,9	100,0	139,0
100	84,3	86,8	100,0	139,4

É possível observar que a tendência de crescimento da resistência para pequenas idades é um pouco maior para os traços com pequeno teor de substituição de AMR. Em compensação, dos 28 aos 91 dias, o crescimento da resistência é maior para os traços com grandes percentuais de substituição de AMR. Algumas hipóteses podem ser levantadas na tentativa de explicar este comportamento. Primeiro, pode ocorrer o fenômeno do efeito retardado de cura em decorrência da água absorvida pelo agregado, que pode disponibilizar a água para hidratação do concreto em idades mais avançadas, porém não se pode afirmar com certeza que esse comportamento existe, nem como se dá o mecanismo de transporte interno da água no concreto. Segundo, existe a possibilidade de que haja um efeito pozolânico no material reciclado, por menor que possa ser, que contribui para que haja um pequeno aumento das resistências de concretos com altos teores de AMR em idades mais avançadas. O efeito pozolânico pode ocorrer devido à existência de partículas muito finas de argilas pobremente calcinadas dos componentes de material cerâmico utilizados nas obras, e que, eventualmente, podem fazer parte da composição do resíduo de construção e demolição.

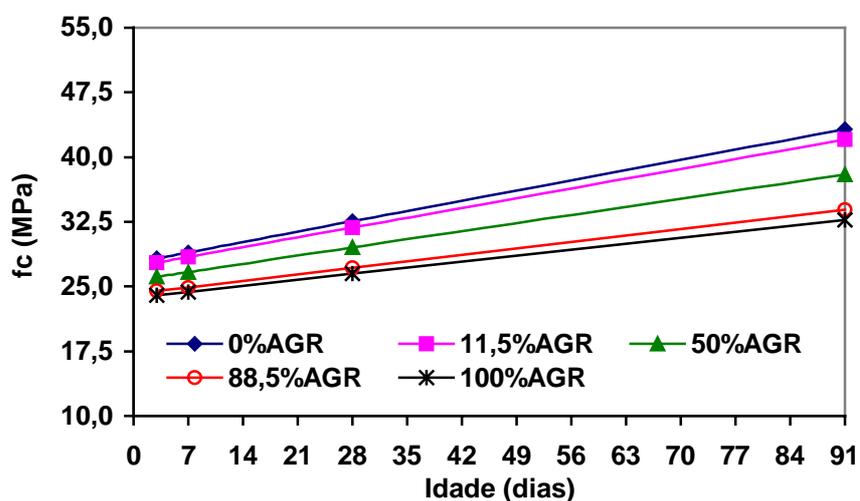
Além disso, não se devem considerar os efeitos significativos das interações a/c x Idade, a/c x AGR x Idade para eventuais variações das taxas de crescimento das resistências dos concretos com agregados reciclados.

6.1.7 Efeito da interação a/cxAGRxIdade sobre a resistência à compressão do concreto

A interação tripla a/cxAGRxIdade foi calculada a partir da equação 6.1, como resultado obtiveram-se gráficos de resistência em função da idade variando os valores codificados de AGR para cada valor de a/c codificado, a variável restante foi mantida no ponto médio codificado (gráficos da Figura 44). Foram montados ainda os gráficos de resistência em função da relação a/c variando o teor de substituição de AGR para cada idade avaliada (gráficos da Figura 45).



(a)



(b)

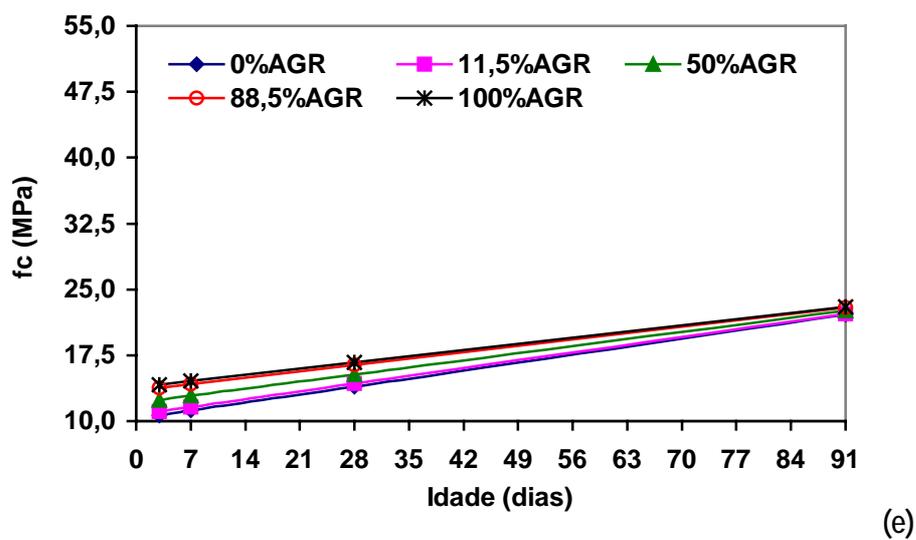
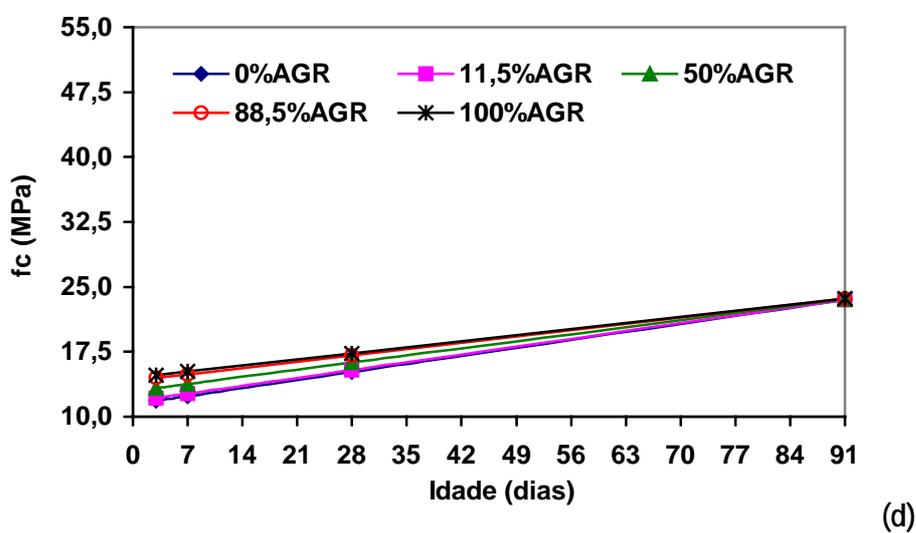
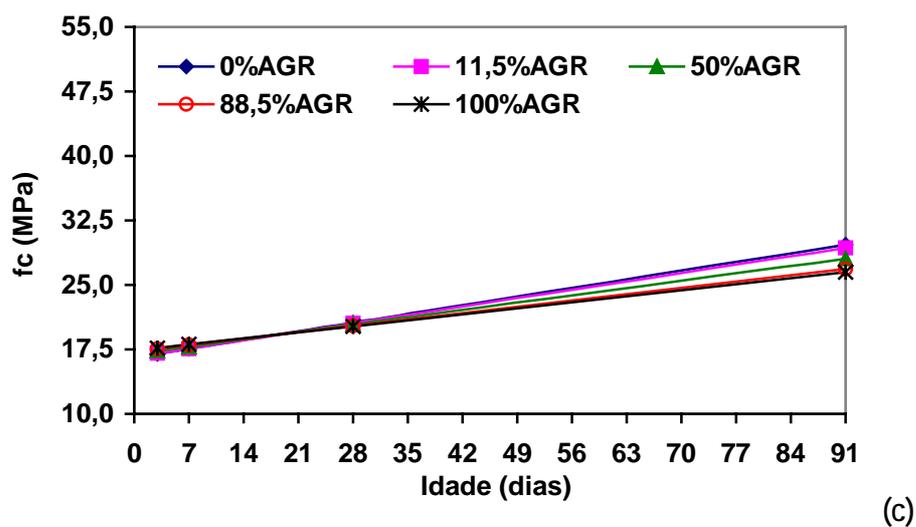


Figura 44 Resistência à compressão do concreto em função do efeito da interação $a/c \times AGR \times Idade$: a) $a/c = 0,40$; b) $a/c = 0,45$; c) $a/c = 0,60$; d) $a/c = 0,75$; e) $a/c = 0,80$

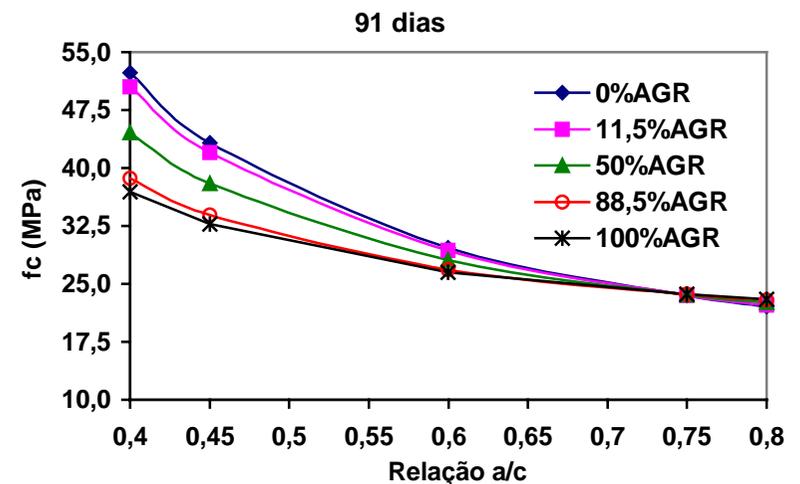
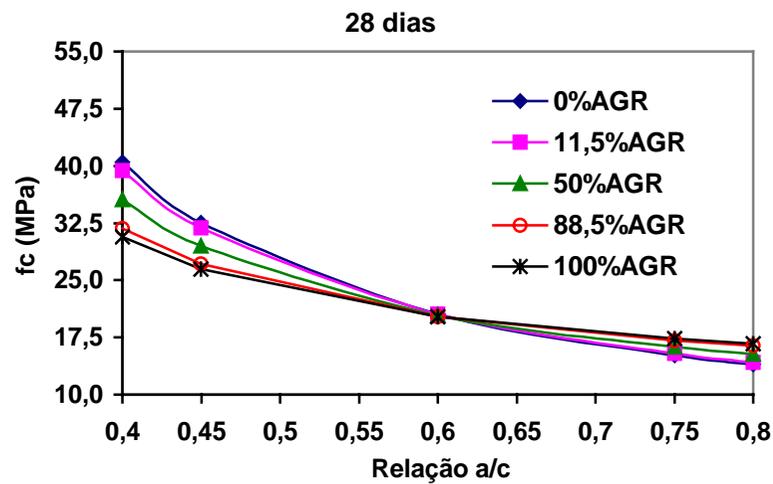
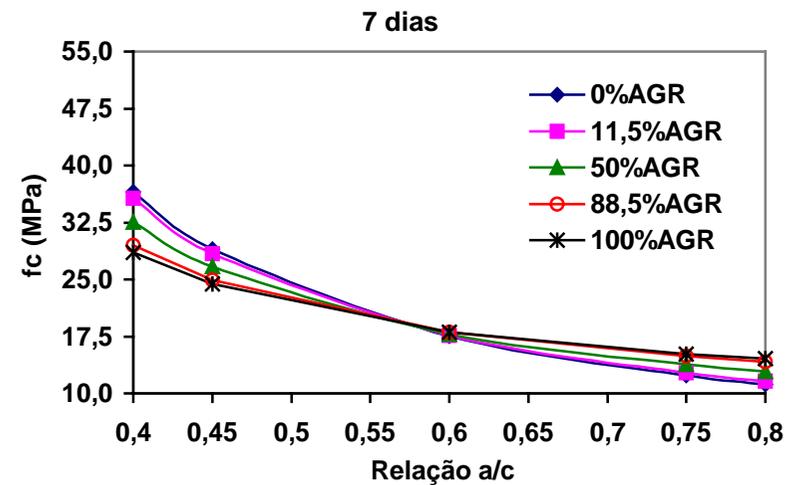
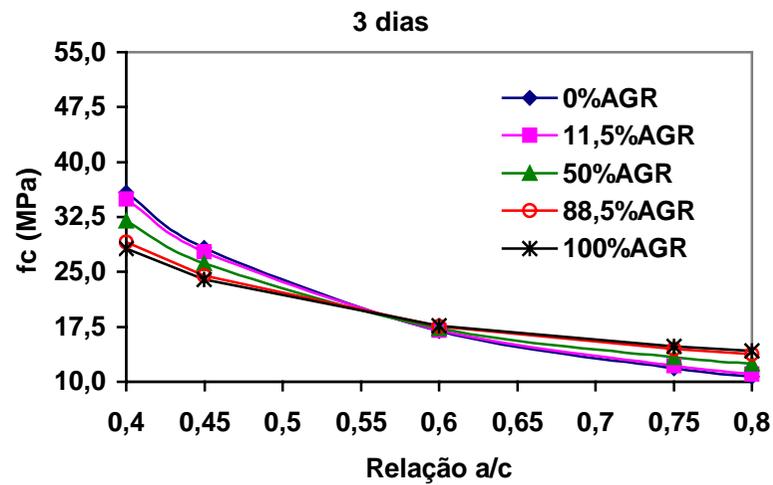


Figura 45 Efeito da interação a/cxAGRxlidade sobre a resistência à compressão dos concretos.

Fazendo a análise conjunta dos gráficos da Figura 44 e da Figura 45, percebe-se que para relações a/c baixas, a resistência à compressão é maior para traços de concreto com baixo teor de substituição de AGR, para qualquer idade avaliada, e também que a taxa de crescimento da resistência após 28 dias é mais alta para estes traços, o que pode ser visualizado na inclinação das retas da Figura 44. Porém, para relações a/c intermediárias (a/c entre cerca de 0,55 e 0,65), o comportamento do concreto começa a mudar, até aproximadamente os 28 dias de idade as resistências de qualquer dos traços têm valores mais ou menos próximos e somente a partir desta idade o crescimento do grau de hidratação começa a ser diferente com maiores vantagens, ainda, para os traços com pequeno teor de substituição de AGR. Para relações a/c maiores que 0,75, o comportamento do concreto muda, os traços com maior teor de AGR apresentam resistências mais elevadas e apenas em idades mais avançadas, maiores ou iguais a 91 dias, tendem a se aproximar novamente.

Através dos gráficos da Figura 45, observa-se que quanto maior o grau de hidratação do concreto, maior é o valor da relação a/c para a qual o comportamento da resistência muda. Isso pode estar relacionado com a porosidade da matriz. Para as primeiras idades, a matriz não é ainda tão rígida e a baixa resistência do agregado reciclado afeta pouco os resultados de resistência para relações a/c em torno de 0,56. A medida que a idade de cura do concreto avança e a matriz do concreto vai se tornando mais densa, a baixa resistência do agregado reciclado começa a fazer maior diferença e o ponto de mudança do comportamento passa para valores de relação a/c em torno de 0,75. O agregado graúdo reciclado é realmente o elo mais frágil da estrutura do concreto, à medida que se diminui as relações a/c e aumenta o grau de hidratação do concreto, ou seja, à medida que a porosidade do material se torna menor, a baixa resistência do agregado reciclado começa a diminuir a resistência do concreto.

No concreto, mesmo sem aplicação de algum tipo de carregamento, existem fissuras muito pequenas na interface pasta/agregado. Estas fissuras são provavelmente geradas pelas diferenças das propriedades do agregado e da pasta, combinadas com a retração e com variações térmicas (NEVILLE, 1995). Segundo o autor, enquanto tais fissuras são estáveis, não há qualquer tipo de prejuízo para o concreto. Por outro lado, à medida que começam a atuar solicitações nas estruturas de concreto, estas fissuras podem começar a se propagar. Entretanto, assim como a descontinuidade do concreto é maior devido à presença de agregados graúdos, são eles que funcionam como bloqueadores da propagação das fissuras existentes na interface entre estes e a matriz do concreto. Toda essa discussão está baseada, é claro, no uso de agregados naturais, cuja densidade e resistência são capazes de absorver estas solicitações.

No entanto, quando se trata de agregado reciclado, para o qual a densidade e a resistência não são assim tão altos, o comportamento frente à microfissuração pode ser um pouco diferenciado. E talvez este comportamento possa explicar o efeito da interação $a/c \times AGR \times Idade$ observada nos gráficos da Figura 44 e da Figura 45.

Como já foi mencionado anteriormente, a diminuição da relação a/c e o aumento do grau de hidratação do concreto levam à diminuição da porosidade. Entretanto, diferente da pasta de cimento, ou da argamassa, o concreto possui os agregados graúdos que contribuem para que a resistência deste seja menor que a resistência somente da pasta, ou da argamassa, pois o agregado graúdo introduz na mistura de concreto maior descontinuidade, além da presença da zona de interface de maior espessura devido ao tamanho do grão. Na zona de transição pasta/agregado graúdo, existe uma tendência à maior porosidade, pois, segundo NEVILLE (1995), as partículas de cimento anidro são incapazes de se dispor densamente junto das partículas relativamente grandes dos agregados comumente utilizados para produção dos concretos e, assim, uma quantidade menor de grãos de cimento está presente para se hidratar e preencher os vazios iniciais existentes neste local. Todo o cimento que chega à zona de transição se hidrata, pois existe aí maior relação a/c , em função do filme de água formado sob os agregados graúdos quando da exsudação interna da água. Além disso, há um espaço microestrutural relativamente grande na interface pasta/agregado, onde cristais de hidróxido de cálcio, que tem baixa resistência, crescem muito mais e de forma orientada, e assim, a resistência da zona de transição é menor. Por outro lado, quando se introduz no concreto um agregado poroso e de textura mais rugosa, como o agregado reciclado, ocorre uma melhoria da zona de transição pasta/agregado, pois o agregado poroso atrai a migração de íons que tornam a zona de transição mais densa e melhoram o intertravamento mecânico do agregado com a matriz. Além disso, existe maior absorção de água pelo agregado devido à sua porosidade. Mesmo que haja compensação parcial da taxa de absorção do agregado, este ainda possui uma certa capacidade de absorver, além da água da mistura, a pasta de cimento que irá hidratar nos poros do agregado, ajudando também a melhorar a zona de transição.

Uma vez que a zona de transição deixa de ser o problema no concreto reciclado, o próprio agregado passa a ser este problema. Com o agregado natural existiam microfissuras na zona de transição que eram bloqueadas pelo agregado denso e resistente quando o concreto era solicitado. Agora, as microfissuras da zona de transição tornam-se muito menores ou inexistentes, mas o próprio agregado possui microfissuras internas, devido ao processo de britagem que fragiliza o material, ou ainda, possui uma porosidade que diminui a sua resistência em relação ao restante do sistema, levando à redução da resistência à compressão do concreto.

Assim, a pequenas idades, a densidade da matriz do concreto ainda não é muito alta e o teor de substituição do agregado, mesmo para concretos com relação a/c em torno de 0,55, não gera muitos problemas para a resistência do concreto. Mas, para idades mais avançadas, nas quais a densidade da matriz já está muito melhorada, o agregado reciclado passa a fazer grande diferença, mesmo para relações a/c próximas de 0,70, que para concretos convencionais pode ser considerada alta.

6.1.8 Considerações gerais

Para uma análise mais geral do comportamento da resistência à compressão de concretos com agregados reciclados, apresenta-se na Tabela 52 os resultados de resistência para as relações a/c estudadas e alguns teores de substituição típicos encontrados na bibliografia e os respectivos valores de resistência para os traços de referência. Todos os resultados foram calculados a partir da equação 6.1 e substituindo os valores das variáveis pelos seus respectivos valores codificados apresentados na Tabela 42.

Pela análise dos resultados apresentados na Tabela 52 é possível concluir que:

- as resistências para os concretos reciclados variaram de 15 para 41 MPa aos 28 dias, a depender da relação a/c e dos tipos e teores de substituição de agregado natural por agregado reciclado avaliados;
- para relações a/c baixas (0,40 e 0,45), o melhor desempenho foi conseguido pelos traços com 100 % de AMR e agregado graúdo natural. Em contrapartida, os traços com substituição de 100 % de AGR e agregado miúdo natural apresentaram o pior desempenho, em razão dos motivos amplamente discutidos anteriormente nos itens 6.1.2, 6.1.4, 6.1.7;
- para relações a/c altas ($a/c > 0,60$), todos os concretos com pelo menos algum tipo de substituição do agregado natural pelo reciclado obtiveram desempenho melhor ou muito semelhante aos dos concretos de referência;
- para as relações a/c altas ($a/c > 0,60$), a combinação da substituição de AMR e AGR apresentou-se como viável, e quanto mais alto o valor de a/c, melhor foi o desempenho do concreto quando as duas frações foram combinadas;

Tabela 52 Comparação geral das resistências à compressão dos concretos com diferentes teores de substituição do agregado natural pelo reciclado e evolução do grau de hidratação

a/c	Traço	fc (MPa)				Grau de hidratação (%)				Variação da resistência em função do concreto de referência			
		3	7	28	91	fc3/fc28	fc7/fc28	fc28/fc28	fc91/fc28				
0,40	Referência	35,1	35,8	39,6	50,6	89	91	100	128	-	-	-	-
	100%AMR - 0%AGR	36,5	37,3	41,5	54,0	88	90	100	130	1,04	1,04	1,05	1,07
	50%AMR - 50%AGR	32,0	32,6	35,6	44,6	90	92	100	125	0,91	0,91	0,90	0,88
	0%AMR - 100%AGR	27,5	27,8	29,7	35,2	93	94	100	119	0,78	0,78	0,75	0,70
	100%AMR - 100%AGR	28,8	29,3	31,6	38,6	91	93	100	122	0,82	0,82	0,80	0,76
0,45	Referência	27,6	28,2	31,6	41,6	87	89	100	132	-	-	-	-
	100%AMR - 0%AGR	29,0	29,7	33,5	44,9	86	89	100	134	1,05	1,05	1,06	1,08
	50%AMR - 50%AGR	26,1	26,7	29,5	38,0	89	90	100	129	0,95	0,94	0,93	0,91
	0%AMR - 100%AGR	23,3	23,6	25,5	31,0	91	93	100	122	0,84	0,84	0,81	0,75
	100%AMR - 100%AGR	24,6	25,1	27,4	34,4	90	91	100	125	0,89	0,89	0,87	0,83
0,60	Referência	16,3	16,8	19,6	28,0	83	86	100	143	-	-	-	-
	100%AMR - 0%AGR	17,6	18,3	21,6	31,3	82	85	100	145	1,08	1,09	1,10	1,12
	50%AMR - 50%AGR	17,3	17,8	20,4	28,1	85	87	100	138	1,06	1,06	1,04	1,00
	0%AMR - 100%AGR	17,0	17,4	19,2	24,8	88	90	100	129	1,04	1,03	0,98	0,89
	100%AMR - 100%AGR	18,4	18,8	21,1	28,2	87	89	100	133	1,13	1,12	1,08	1,01
0,75	Referência	11,2	11,6	14,2	21,8	79	82	100	154	-	-	-	-
	100%AMR - 0%AGR	12,5	13,1	16,1	25,2	78	81	100	156	1,12	1,12	1,14	1,15
	50%AMR - 50%AGR	13,3	13,8	16,2	23,6	82	85	100	145	1,19	1,18	1,14	1,08
	0%AMR - 100%AGR	14,1	14,5	16,4	22,0	86	89	100	134	1,27	1,25	1,15	1,01
	100%AMR - 100%AGR	15,5	15,9	18,3	25,3	85	87	100	138	1,39	1,37	1,29	1,16
0,80	Referência	10,0	10,5	13,0	20,4	77	81	100	157	-	-	-	-
	100%AMR - 0%AGR	11,4	11,9	14,9	23,8	76	80	100	160	1,14	1,14	1,15	1,16
	50%AMR - 50%AGR	12,4	12,9	15,3	22,6	81	84	100	147	1,24	1,23	1,18	1,10
	0%AMR - 100%AGR	13,5	13,9	15,7	21,3	86	88	100	136	1,35	1,32	1,21	1,04
	100%AMR - 100%AGR	14,9	15,3	17,7	24,7	84	87	100	140	1,48	1,46	1,36	1,21

- os concretos com 100 % de AMR apresentaram, para todas as relações a/c, as maiores taxas de crescimento de resistência dos 28 aos 91 dias, o que leva a crer que a suposição sobre a probabilidade de existência de um efeito pozolânico da fração fina de material reciclado pode ser verdadeira;
- para todas as relações a/c, os traços com algum teor de AGR apresentaram maior taxa de crescimento da resistência nas primeiras idades, e quanto maior o teor de AGR sozinho, maiores foram as taxas de crescimento verificadas;
- a maior taxa de redução obtida entre o concreto reciclado e o concreto de referência foi de 25 % para o traço com 100 % de AGR e 0 % de AMR e relação a/c 0,40. Porém, o traço com 100 % de AMR e 100 % de AGR e relação a/c 0,80 apresentou aumento de resistência, em relação ao traço de referência, de cerca de 36 %;
- como foi citado no item 3.2.2.3, BAZUCO (1999) apontou que quanto menores os níveis de resistência com os quais se trabalha, menores são as diferenças entre as resistências de concretos convencionais e concretos reciclados. Os resultados encontrados nesta pesquisa estão em consonância com esta constatação feita pelo autor. Entretanto, vale ressaltar que neste estudo foram encontrados valores até melhores para os concretos reciclados com altas relações a/c;
- WAINWRIGHT et al. (1993) apontaram que o uso combinado do agregado miúdo reciclado com o gráudo reciclado podem levar a reduções de resistência de até 20 %. RANVIDRARAJAH et al. (1987) também concluíram que esta combinação é mais prejudicial à resistência do concreto que o uso do agregado gráudo reciclado sozinho. O índice de redução apontado na bibliografia foi observado neste trabalho apenas no traço com 100 % das duas frações de material reciclado e relação a/c 0,40. Para as demais relações a/c e combinações, os resultados apresentaram reduções um pouco menores, ou aumentos de resistência para os traços com reciclado e relações a/c altas. Assim, pode-se dizer que o uso combinado do agregado miúdo e gráudo reciclado não é tão prejudicial ao concreto, a menos que relações a/c muito baixas sejam utilizadas. E também que o uso do agregado miúdo reciclado apresenta-se muito viável, ao menos no que diz respeito à resistência à compressão do concreto;

- BARRA (1996) concluiu que os concretos com agregados reciclados seguem uma tendência de comportamento semelhante a da Lei de Abrams. Este tendência também foi observada nesta pesquisa e para os valores aqui encontrados, também o incremento de resistência dos concretos reciclados tendeu, de forma geral, a diminuir com a redução da relação a/c , como pode ser visto nas curvas do gráfico da Figura 46.

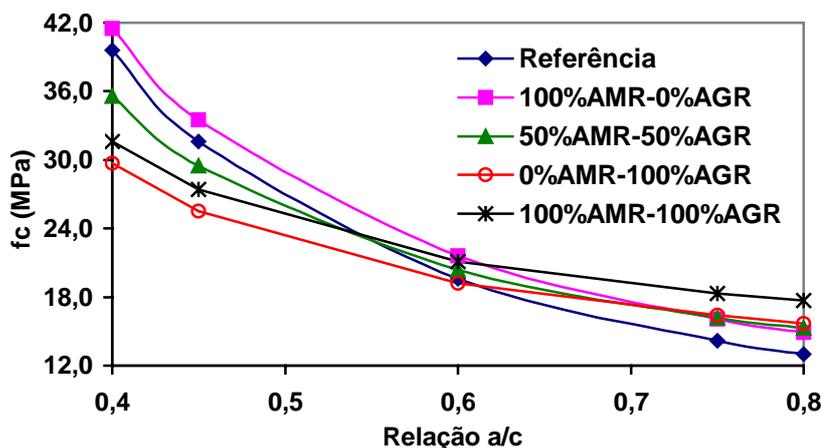


Figura 46 Curvas de resistência à compressão em função da relação a/c

Pelo que foi exposto, diferente do que aponta a bibliografia sobre o uso do agregado miúdo reciclado, neste trabalho substituir o agregado miúdo natural para produção de concreto é plenamente viável do ponto de vista da resistência à compressão. Assim como utilizar a fração miúda do agregado reciclado combinada com a graúda, principalmente para relações a/c mais altas. Durante a substituição de ambas frações de agregados naturais por reciclados, devem ser tomados cuidados apenas com a trabalhabilidade das misturas, para que as mesmas não se tornem excessivamente ásperas e sem coesão, o que pode dificultar o adensamento e resultar em queda de resistência. Observou-se também que a pré-umidificação do agregado reciclado, compensando apenas parte da taxa de absorção do agregado, é uma técnica satisfatório para produção de concretos com boa resistência, uma vez que a compensação total da absorção poderia levar à saturação da mistura de concreto e redução brusca da resistência do concreto reciclado em relação ao mesmo traço de referência.

6.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Na Tabela 53 estão apresentadas as equações que descrevem os modelos ajustados para resistência à tração por compressão diametral ($ft'D$) e resistência à tração na flexão ($ft'F$) dos concretos com agregados reciclados. Os modelos matemáticos foram obtidos através da análise de regressão múltipla ponderada dos resultados de cada ensaio do programa experimental (ANEXO 1, Tabela 69). É

importante mencionar que as equações foram ajustadas para os níveis codificados de cada variável que estão apresentados na Tabela 42.

Tabela 53 Modelos ajustados para estimativa das resistências à tração dos concretos reciclados

Equações	r ²	Eq. N°
$f_t' D = 1,721 + \frac{1,431}{a/c} + 0,697 * AMR - \frac{0,494 * AMR}{a/c} - \frac{0,099 * AGR}{a/c}$	0,843	6.2
$f_t' F = 3,12 + \frac{1,021}{a/c} + 0,299 * AMR - \frac{0,702 * AGR}{a/c}$	0,549	6.3

ft'D: Resistência à tração por compressão diametral
ft'F: Resistência à tração na flexão

Na análise de regressão dos resultados de resistência à tração alguns dados experimentais não foram considerados em virtude da alta variabilidade inerente aos métodos de ensaio disponíveis, tanto para tração por compressão diametral, quanto para tração na flexão. Para análise de dados de resistência à tração por compressão diametral foram moldados e ensaiados 2 corpos-de-prova para cada traço, mas somente o maior resultado de cada par de CP's foi considerado. Nos ensaios de resistência à tração na flexão alguns dos resultados da 1ª repetição foram desprezados em virtude de alguns problemas ocorridos com a prensa na qual os corpos-de-prova estavam sendo ensaiados, apesar de haver apenas um exemplar de cada traço, para cada repetição. Porém o fato de existirem três repetições dentro do projeto de experimentos facilitou a tomada destas decisões. Mesmo desprezando alguns dos resultados do ensaio de resistência à tração na flexão, a variabilidade encontrada para o ensaio foi muito alta. Esta constatação pode ser feita pela análise do coeficiente de determinação do ensaio, r², que ilustra a porcentagem da variabilidade total que é explicada pela regressão (NANNI e RIBEIRO, 1992). Este coeficiente é bem mais baixo que, por exemplo, o r² do ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Além disso, foi admitido o nível de 10 % de significância para o teste F, também devido à variabilidade do ensaio. Segundo COUTINHO e GONÇALVES (1994), os ensaios de resistência à tração por compressão diametral oferecem resultados mais uniformes que o ensaio de tração na flexão, o que foi comprovado nesta pesquisa.

De acordo com a análise de regressão, é possível observar que os efeitos que resultaram significativos para resistência à tração por compressão diametral não são completamente os mesmos efeitos significativos para tração na flexão. Além disso, a influência que cada variável comum aos dois ensaios exerce sobre as respostas do experimento é diferenciada. Na Tabela 54 pode ser visualizada a influência dos diferentes fatores e suas interações, em ordem de importância, sobre os dois tipos de resistência à tração estudados, e ainda sobre a resistência à compressão analisada apenas aos 28 dias, pois esta é a idade de referência para os ensaios de resistência à tração.

Tabela 54 Resumo dos fatores significativos sobre a resistência à compressão aos 28 dias, à tração por compressão diametral e tração na flexão, em ordem de importância

Resistência à compressão (28 dias)		Resistência à tração por compressão diametral		Resistência à tração na flexão	
Fatores significativos	F	Fatores significativos	F	Fatores significativos	F
a/c	34,57	a/c	14,24	a/cxAGR	5,04
a/cxAGR	8,61	AMR	3,84	a/c	4,15
AGR	6,97	a/cxAMR	3,16	AMR	1,83
AMR	3,99	a/cxAGR	1,95	-	-
a/cxAMR	3,00	-	-	-	-

Existe uma completa inversão na ordem dos fatores de maior efeito significativo sobre as variáveis dependentes estudadas. Na resistência à tração por compressão diametral a interação a/cxAGR teve um papel pouco significativo em relação aos demais, enquanto para a tração na flexão o seu efeito foi o mais significativo. Com relação à compressão axial, esta interação também foi a mais significativa, depois, é claro, da relação a/c que, junto com a idade, que não foi avaliada desta vez, são os fatores mais importantes na análise desta propriedade, como foi visto no item 6.1. Como no ensaio de resistência à tração na flexão parte do corpo-de-prova está submetido à tração e parte está submetido à compressão, é mais aceitável que na análise de f_c e f_t' os efeitos significativos tenham efeito de importância mais semelhante. Contudo, é importante salientar que em virtude do r^2 de 0,549 para o ensaio de resistência à tração na flexão, a baixa confiabilidade dos resultados obtidos com este modelo dificulta a generalização dos resultados. Pode-se observar também que em nenhum dos dois tipos de ensaio de resistência à tração ocorreu a influência do efeito isolado do agregado graúdo reciclado (AGR).

6.2.1 Efeito isolado de a/c sobre a resistência à tração

Na Figura 47 pode ser visualizado o efeito isolado da variável a/c sobre a resistência à tração na flexão e por compressão diametral. Os resultados para montagem das curvas foram obtidos a partir das equações 6.2 e 6.3 para resistência à tração por compressão diametral e na flexão, respectivamente, nas quais variou-se os valores codificados de a/c e manteve-se as demais variáveis nos seus respectivos pontos médios codificados.

Para ambas as curvas o comportamento do concreto obedeceu a lei de proporcionalidade inversa entre a resistência e a relação a/c. Os resultados de resistência à tração por compressão diametral apresentaram uma tendência de redução em relação às resistências à tração na flexão variando de 11 até 30 %. Quanto maior a relação a/c, maior a taxa de redução da resistência a tração por compressão diametral em relação à flexão. Esse aumento na taxa de redução de f_t' em relação a

$f_t'F$ pode ser função do efeito bastante significativo da interação $a/cxAGR$ sobre esta última propriedade. Contudo, como existe uma interação significativa entre a/c e AMR para a resistência à tração por compressão diametral, essa taxa de redução de $f_t'D$ em função de $f_t'F$ pode ser variável.

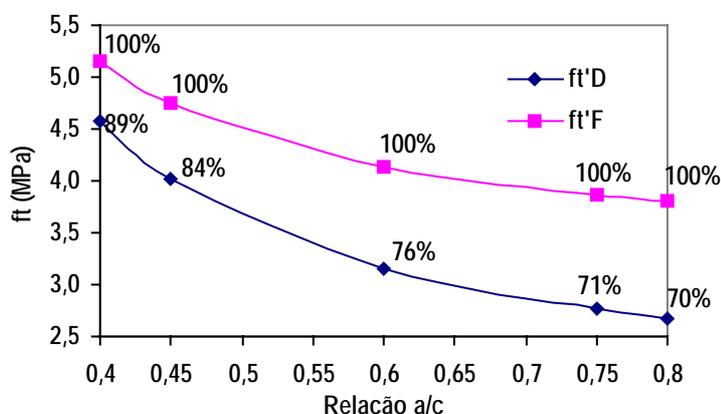


Figura 47 Resistência à tração na flexão ($f_t'F$) e por compressão diametral ($f_t'D$) em função do efeito isolado da relação a/c

Além disso, dentro de cada ensaio a taxa de redução da resistência com o aumento da relação a/c , de 0,40 a 0,80, tendeu a valores mais altos para a tração por compressão diametral (42 %), que para tração na flexão (26 %). Também nesta análise a interação significativa $a/cxAMR$ pode fazer variar a taxa de redução da resistência com a variação do teor de AMR dentro do ensaio de $f_t'D$. Entretanto, uma baixíssima variação pode ocorrer nos valores de $f_t'F$ quando se varia o teor de AMR, visto que a interação $a/cxAMR$ não foi significativa neste caso. Todavia, o contrário ocorre quando se avalia a influência da interação $a/cxAGR$ sobre $f_t'D$ e $f_t'F$. O nível de significância desta interação sobre $f_t'D$ é muito menor que o observado para $f_t'F$.

6.2.2 Efeito isolado de AMR sobre a resistência à tração

A partir das equações 6.2 e 6.3 apresentadas na Tabela 53 para estimativa das resistências à tração por compressão diametral e tração na flexão, respectivamente, calculou-se os valores de resistência sob o efeito isolado de AMR para cada valor codificado desta variável, sendo as demais variáveis mantidas nos seus respectivos pontos médios codificados. De posse destes resultados, obteve-se as retas de tendência de comportamento da resistência à tração do concreto, para cada tipo de ensaio realizado, que estão apresentadas na Figura 48.

A partir da análise do gráfico observa-se que, quanto maior é o teor de substituição de AMR, a resistência à tração, nos dois casos, cresce. Este crescimento é da ordem de 16 e 14 % para resistência à tração na flexão e tração por compressão diametral, respectivamente. Entretanto, essa

taxa de crescimento pode oscilar com a variação da relação a/c e, no caso da resistência à tração por compressão diametral, ao invés de acréscimo da resistência, pode haver até o seu decréscimo, em função da interação significativa $a/c \times AMR$ para esta propriedade, como será discutido no item 6.2.3. E a resistência à tração por compressão diametral tende a ser menor que a resistência à tração na flexão cerca de 24 %, em média, sendo esse valor também variável com a relação a/c , devido à interação significativa $a/c \times AMR$ para $f_t'D$.

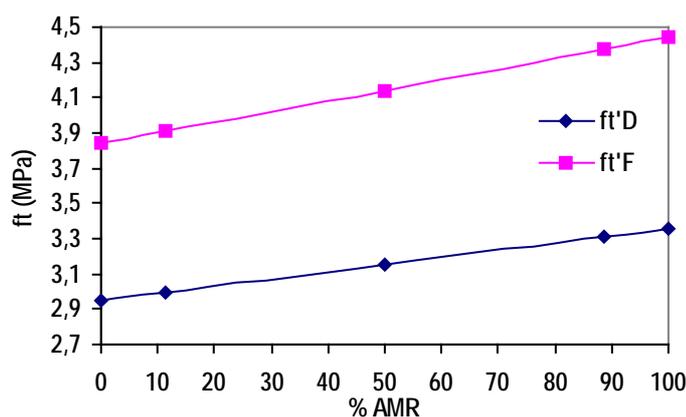


Figura 48 Resistência à tração na flexão ($f_t'F$) e por compressão diametral ($f_t'D$) em função do efeito isolado de AMR

De acordo com NEVILLE (2000b), a zona de transição entre os agregados e a pasta de cimento hidratada deve ser cuidadosamente considerada. E ainda que esta interface aparece não só entre a pasta e o agregado graúdo, mas também, com o agregado miúdo. NEVILLE (1995) salienta que no caso do agregado miúdo esta zona de interface é bem menor que a zona de transição formada com o agregado graúdo. O autor menciona ainda que as características mineralógicas do agregado miúdo têm grande influência sobre a microestrutura da zona de transição, podendo até contribuir para a sua densificação. Como foi discutido no item 6.1.2, quando se considerou o efeito de AMR sobre o aumento da resistência à compressão, é possível que o agregado miúdo contribua para aumentar a rigidez da matriz de concreto, diminuindo as microfissurações que, por ventura, se formariam na zona de transição pasta/agregado, ou mesmo na própria matriz do concreto, seja pela sua maior rugosidade que melhora a aderência pasta/agregado, ou pelo maior fechamento dos poros proporcionado pelas frações de menor dimensões, entre outros. De acordo com MEHTA e MONTEIRO (1994), a resistência à tração parece ser muito mais afetada pelas características da zona de transição, que a resistência à compressão. Na resistência à compressão, quando o concreto chega ao estágio de ruptura, observa-se um estado de fissuração completa, ou seja, existem numerosas fissuras espalhadas por todo o corpo-de-prova. Na resistência à tração, as fissuras se propagam em direção transversal à aplicação da tensão e a ruptura é função da união apenas de algumas fissuras. Se a zona de transição é melhorada

por algum motivo, existem menos fissuras passíveis de propagação e é então necessária uma tensão de ruptura à tração um pouco maior; talvez seja esse o caso no concreto com agregado miúdo reciclado.

6.2.3 Efeito da interação a/cxAMR sobre a resistência à tração

O gráfico que representa a resistência à tração em função de AMR (%) foi obtido a partir das equações definidas na Tabela 53, para cada um dos tipos de ensaio de resistência à tração realizados, variando os valores codificados de AMR para cada relação a/c, também codificada, e mantendo as demais variáveis no ponto médio. O mesmo foi feito para obtenção do gráfico da resistência à tração em função da relação a/c. Os respectivos gráficos podem ser visualizados na Figura 49, para tração por compressão diametral.

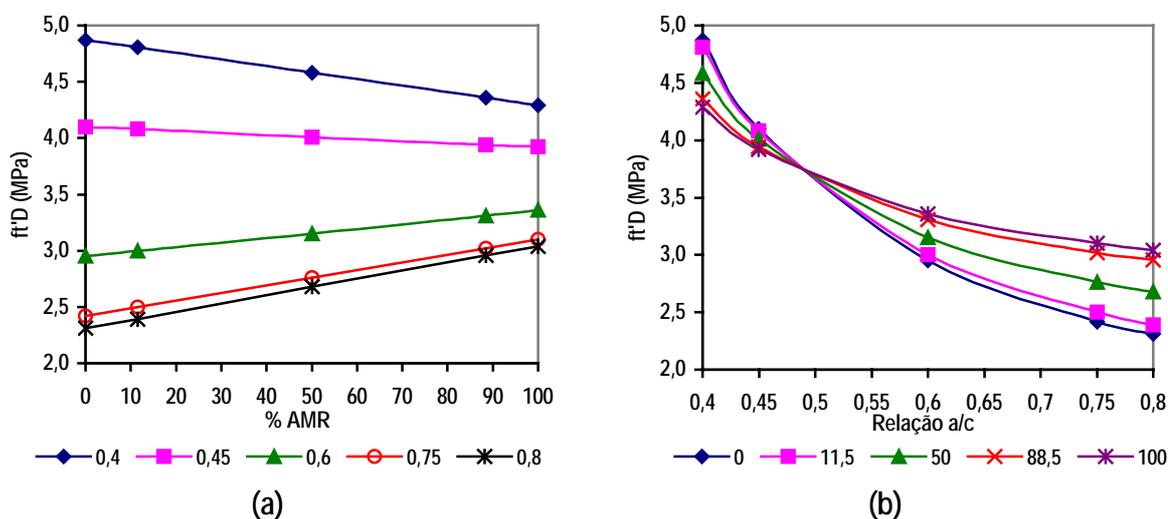


Figura 49 Resistência à tração por compressão diametral: a) $f_t'D$ em função do efeito de AMR; b) $f_t'D$ em função do efeito de a/c

Na tração por compressão diametral para relações a/c menores que valores em torno de 0,47, as resistências diminuem à medida que aumenta-se o teor de substituição de AMR. Para relações a/c maiores que cerca de 0,47, quanto maior o teor de substituição de AMR, maiores são os valores de resistência alcançados. Quando se avalia a relação a/c 0,80, a taxa de crescimento de $f_t'D$ chega a 32 %, quando AMR passa de 0 a 100 %, enquanto para relação a/c 0,40 há uma diminuição de $f_t'D$ da ordem de 12 %. Os aumentos na taxa de acréscimo de resistência quando os valores de a/c aumentam e na taxa de decréscimo das resistências quando os valores de a/c diminuem, podem ser percebidos através da inclinação das retas do gráfico de $f_t'D$ em função de AMR na Figura 49a.

A redução da resistência à tração por compressão diametral para os concretos reciclados com baixas relações a/c pode ter ocorrido por dificuldades com o adensamento das misturas no estado no

estado fresco. É sabido que, para concretos com relações a/c muito baixas, ao invés de aumento das resistências, algumas reduções são percebidas em virtude da dificuldade de adensamento do concreto, devido à maior coesão das misturas, o que gera maior porosidade do concreto obtido, fazendo cair a resistência do material. Nos concretos com alto teor de agregado miúdo reciclado e baixas relações a/c pode ter ocorrido uma diminuição excessiva da quantidade de água livre, devido à alta taxa de absorção do material, que foi apenas parcialmente compensada, o que pode contribuir para o aumento da coesão das misturas, dificultando, assim, o seu adensamento, e ocasionando aumento da porosidade do concreto e consequente diminuição da resistência. A medida que a relação a/c aumenta as dificuldades com adensamento podem deixar de ocorrer e as resistências do concreto reciclado aumentam. Outra possibilidade, é que talvez o agregado miúdo reciclado represente uma descontinuidade no concreto. Independente da quantidade de material reciclado, que parece melhorar a matriz das misturas, para relações a/c muito baixas, originalmente, a zona de transição e a pasta são normalmente melhoradas e a introdução de agregados porosos, mesmo que com pequenas dimensões, pode levar à introdução de pontos frágeis na estrutura do concreto que podem reduzir a resistência, principalmente no caso da tração, cujo estágio de propagação de fissuras necessário à ruptura é muito menor. No entanto, à medida que a relação a/c aumenta, as diferenças no concreto em termos de melhoria na zona de transição e na matriz do concreto, provocadas pelo agregado reciclado, começam a ser sentidas e as resistências dos concretos com altos teores de AMR passam a ser maiores que a dos concretos com baixo teor.

Pela análise estatística deste trabalho, se concluiu que a interação a/cxAMR não resultou significativa para resistência à tração na flexão, no entanto deve ser considerado o baixo valor do coeficiente de determinação obtido ($r^2 = 0,549$). Ou seja, pode ser que a obtenção de resultados mais confiáveis para esta propriedade resulte em efeitos significativos diferenciados.

6.2.4 Efeito da interação entre a/cxAGR sobre a resistência à tração

A partir das equações definidas na Tabela 53 para estimativa das resistências à tração por compressão diametral (equação 6.2) e tração na flexão (equação 6.3), foram obtidos os gráficos de resistência à tração em função de AGR (%) e de resistência à tração em função da relação a/c. Variou-se os valores codificados de AGR para cada relação a/c, também codificada, e manteve-se as demais variáveis no ponto médio; o inverso foi feito no segundo caso. Os respectivos gráficos podem ser visualizados na Figura 50, para tração por compressão diametral, e na Figura 51, para tração na flexão.

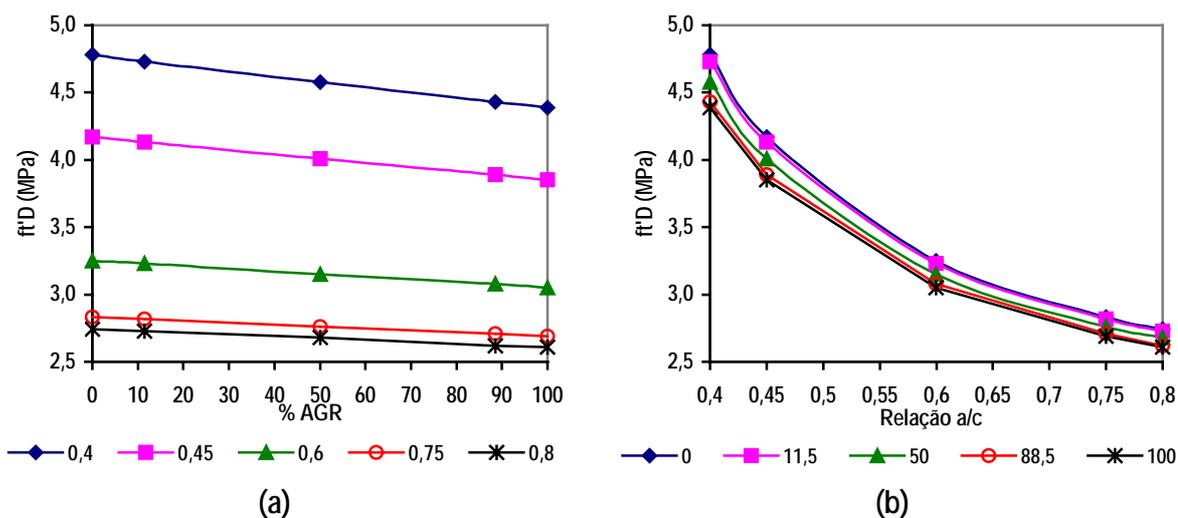


Figura 50 Resistência à tração por compressão diametral: a) $f_t'D$ em função do efeito de AGR; b) $f_t'D$ em função do efeito de a/c

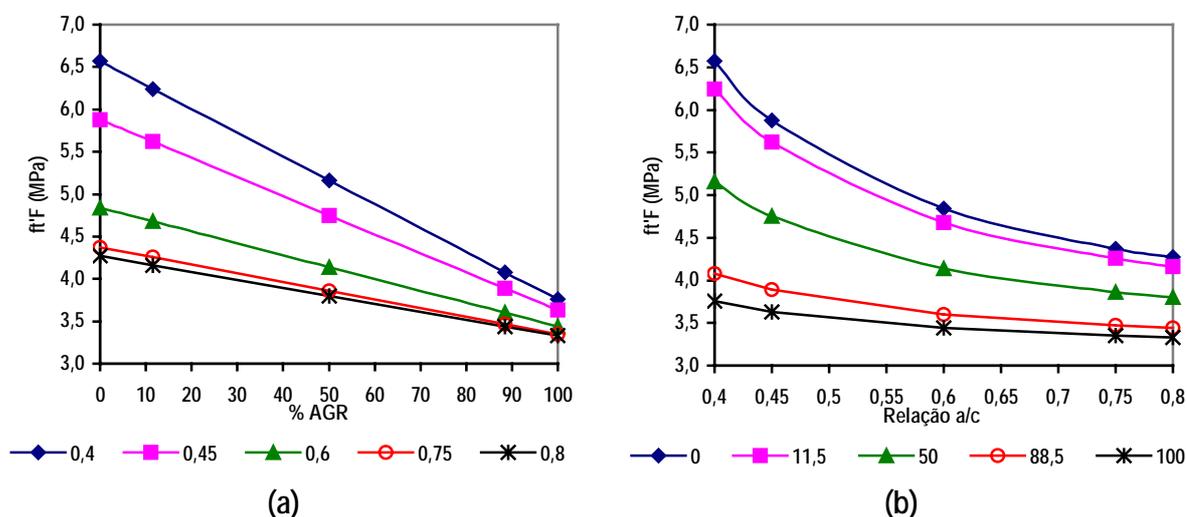


Figura 51 Resistência à tração na flexão: a) $f_t'F$ em função do efeito de AGR; b) $f_t'F$ em função do efeito de a/c

Observa-se, pela análise dos gráficos, que o fraco efeito significativo da interação $a/c \times AGR$ sobre a resistência à tração por compressão diametral faz a resistência variar muito pouco quando se analisa $f_t'D$ em função tanto de AGR quanto de a/c . Os valores da resistência à tração tendem sempre a diminuir à medida que aumenta-se o teor de AGR para qualquer das relações a/c avaliadas. Entretanto, a taxa de decréscimo da resistência quando AGR passa de 0 a 100 % diminui com o aumento da relação a/c de 8 % para 5 %, quando a/c varia de 0,40 para 0,80, respectivamente. Observa-se por isso variações muito sutis nos resultados de $f_t'D$ (Figura 50 a e b).

Por outro lado, as variações observadas nos gráficos da Figura 51 são bem acentuadas em virtude do forte efeito gerado pela interação $a/c \times AGR$ sobre a resistência à tração na flexão. O aumento do teor de substituição de AGR faz diminuir o resultado da resistência à tração na flexão para qualquer

das relações a/c avaliadas. Existe uma tendência também em diminuir a taxa de decréscimo de f_t/F quanto maior for o teor de substituição de AGR, quando a relação a/c passa de 0,40 a 0,80. Esta mesma tendência foi observada para resistência à compressão axial quando se analisou o efeito da interação $a/cxAGR$ sobre esta propriedade (item 6.1.4).

Análise similar àquela feita no item 6.2.3 a respeito do efeito da interação $a/cxAMR$ sobre f_t/D , na qual, para baixas relações a/c , o aumento de AMR reduz a resistência à tração, pode ser usado para explicar o efeito negativo do teor de AGR para qualquer valor de a/c . E este efeito negativo é tanto pior quanto menor for a relação a/c avaliada. Como foi dito anteriormente, para baixos valores de a/c , a introdução de agregados porosos aumenta o nível de descontinuidade nas misturas de concreto. Se isso pode ocorrer com agregado miúdo, cuja dimensão é muito menor em relação ao agregado graúdo, a introdução deste último nas misturas de concreto tende a piorar ainda mais os resultados de resistência. Esse fato pode ser comprovado pela taxa de 43 % de decréscimo de f_t/F quando AGR passa de 0 a 100 % na relação a/c 0,40. O decréscimo de f_t/D , na mesma situação, foi de 8 %. No entanto, como foi visto quando se analisou o efeito da interação $a/cxAMR$ sobre f_t/D , a redução foi de 12 % quando AMR passou de 0 a 100 %, para relação a/c 0,40. É importante lembrar que pretende-se, com essa comparação, apenas observar o efeito da dimensão do agregado poroso na redução da resistência à tração para baixos valores de a/c . Deste modo, é possível concluir que à medida que a dimensão do agregado reciclado aumenta e a relação a/c diminui, a resistência à tração na flexão diminui muito com o aumento do teor de AGR presente nas misturas, pois introduz-se, desta forma, maior fragilidade ao sistema, e esta fragilidade é inerente ao agregado graúdo reciclado.

Por outro lado, à medida que o valor de a/c aumenta, esse efeito é reduzido, pois a matriz do concreto também tem sua porosidade intrínseca aumentada. Entretanto, diferentemente do comportamento observado na resistência à compressão, no qual o aumento da relação a/c leva ao aumento da resistência dos concretos à medida que o teor de AGR também aumenta, na resistência à tração ocorre apenas a redução da taxa de decréscimo da resistência com o aumento de a/c . Neste ponto, também, tudo leva a crer que a influência da dimensão do agregado continua sendo maior mesmo que a relação a/c da matriz aumente.

6.2.5 Relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão axial do concreto

Quando se pensa em estrutura de concreto, geralmente maior importância é dada à resistência à compressão, mas em alguns casos é muito importante a determinação da resistência à tração do concreto, como por exemplo para os projetos de placas de rodovias e aeroportos. Além disso, são as tensões de tração que controlam a fissuração do concreto. Merece interesse, por exemplo, a fissuração

devido à retração ocasionada pelas diferenças de temperatura e umidade, ou ainda mais importante, a fissuração do concreto submetido aos esforços de compressão (NEVILLE, 1995; MEHTA e MONTEIRO, 1994; COUTINHO e GONÇALVES, 1994). Existe, assim, uma interrelação entre a resistência à tração do concreto e a sua resistência à compressão. Todavia, existe um consenso em afirmar que não há uma proporcionalidade direta entre a relação f_t/f_c . Na Tabela 55 estão apresentadas as relações entre resistência à tração na flexão e compressão axial, e resistência à tração por compressão diametral e compressão axial. Os dados foram obtidos a partir das equações 6.2, para tração por compressão diametral, 6.3, para tração na flexão, e 6.1, para compressão axial aos 28 dias. É importante lembrar que foram substituídos nas equações os respectivos valores codificados de cada variável utilizada e que os mesmos estão apresentados na Tabela 42.

Tabela 55 Relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão dos concretos – f_t/f_c 28 (%)

a/c	% AGR	$f_t'F/f_c$ 28 (%)					$f_t'D/f_c$ 28 (%)				
		% AMR					% AMR				
		0	11,5	50	88,5	100	0	11,5	50	88,5	100
0,40	0	16	16	16	16	17	13	13	12	11	11
	11,5	15	16	16	16	16	13	13	12	11	11
	50	14	14	15	15	15	14	14	13	12	12
	88,5	12	12	13	13	13	15	15	14	13	13
	100	12	12	12	13	13	16	15	14	13	13
0,45	0	18	18	18	18	18	13	13	13	12	12
	11,5	17	17	18	18	18	14	14	13	12	12
	50	16	16	16	16	17	14	14	14	13	13
	88,5	14	14	14	15	15	15	15	14	14	13
	100	13	13	14	14	14	15	15	15	14	14
0,60	0	23	23	24	24	24	16	16	16	16	16
	11,5	22	22	23	23	23	15	16	16	16	16
	50	20	20	20	21	21	15	15	15	16	16
	88,5	17	17	18	18	18	15	15	15	15	15
	100	16	17	17	18	18	15	15	15	15	15
0,75	0	29	29	29	29	29	18	18	19	19	20
	11,5	27	27	28	28	28	17	17	18	19	19
	50	23	23	24	24	24	16	16	17	18	18
	88,5	20	20	20	21	21	15	15	16	17	17
	100	19	19	19	20	20	14	15	16	16	17
0,80	0	31	31	31	31	31	18	19	20	21	21
	11,5	29	29	29	29	29	18	18	19	20	20
	50	24	24	25	25	25	16	16	17	18	19
	88,5	20	21	21	21	22	15	15	16	17	17
	100	19	19	20	20	21	14	15	16	17	17

Pelos resultados apresentados pode ser visualizado que também para o concreto reciclado ocorre uma diminuição da relação f_t/f_c à medida que a resistência à compressão do concreto aumenta.

Contudo, os resultados apresentados apontam maiores resultados desta relação para os concretos reciclados, que os índices apontados comumente na bibliografia para os concretos convencionais. MEHTA e MONTEIRO (1994), por exemplo, relatam relações que variam entre 11 e 7 % para concretos cujas resistências à compressão variam entre 7 e 62 MPa. Os resultados também apontam que as relações entre $f_t'F/f_c$ são maiores que as relações $f_t'D/f_c$.

A partir dos dados das resistências à tração e compressão usados na elaboração da Tabela 55, foram definidos também os modelos que relacionam resistência à tração com resistência à compressão. Foram calculados os 125 resultados de resistência à tração e resistência à compressão correspondentes às 125 combinações possíveis das variáveis independentes definidas para o projeto experimental. De posse destes resultados, foram então definidas as equações que relacionam a resistência à tração e a resistência à compressão, que são válidas para o intervalo de resistência à compressão $12 < f_c < 42$ MPa.

Para resistência à tração na flexão (MPa):

$$f_t' F = 2,421 + 0,082f_c \quad [6.4]$$

$$r^2 = 0,522$$

Para resistência à tração por compressão diametral (MPa):

$$f_t' D = 1,325 + 0,09f_c \quad [6.5]$$

$$r^2 = 0,899$$

O coeficiente de determinação, r^2 , obtido para o modelo de resistência a tração na flexão pode ser considerado baixo. Deste modo, é necessário muito cuidado na utilização deste modelo, pois os resultados obtidos com o mesmo podem não representar exatamente o comportamento da resistência a tração na flexão dos concretos reciclados.

6.2.6 Considerações gerais

Objetivando fazer uma comparação mais genérica da resistência à tração dos concretos com agregados reciclados com os concretos de referência, na Figura 52 a e b estão apresentadas curvas de resistência à tração na flexão em função de a/c , e de resistência à tração por compressão diametral em função de a/c , respectivamente.

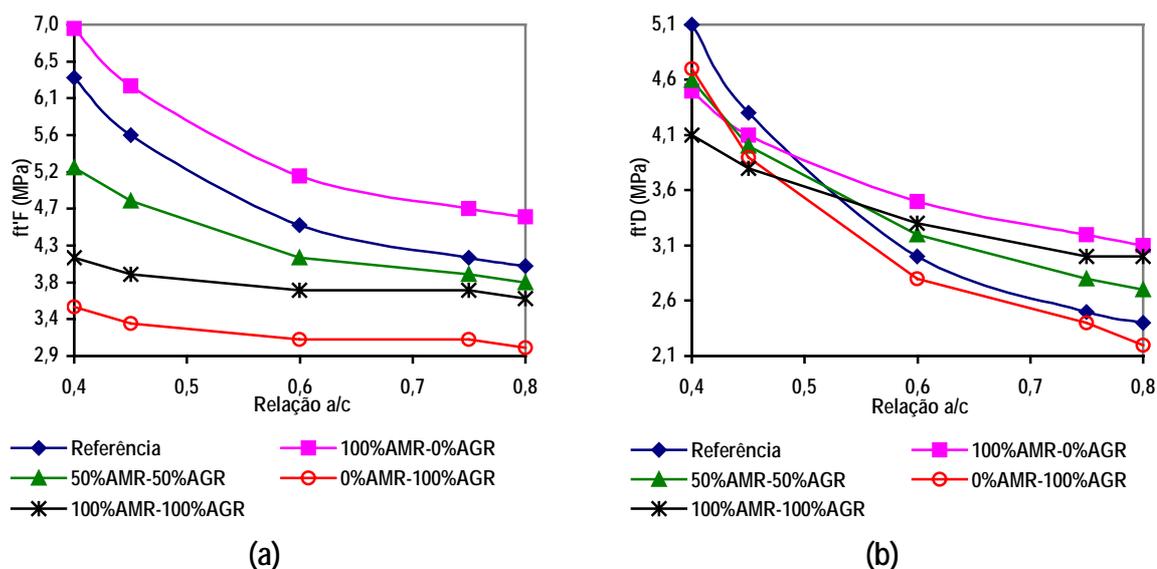


Figura 52 Curvas de resistência à tração em função de a/c . a) Resistência à tração na flexão; b) Resistência à tração por compressão diametral

Na resistência à tração na flexão todos os traços com teores de AGR diferentes de 0 % apresentaram redução de $ft'F$ quando comparados ao traço de referência; por outro lado, o traço com 100 % de AMR e 0 % de AGR teve resultados de $ft'F$ maiores que os do concreto de referência.

A Tabela 56 apresenta os resultados de resistência à tração na flexão e tração por compressão diametral para os traços apresentados na Figura 52, e as respectivas relações entre a resistência à tração do concreto reciclado e a resistência à tração do concreto de referência.

Observa-se que existe uma redução da resistência à tração na flexão do concreto com 100 % de AGR e 0 % de AMR para a relação a/c 0,40 da ordem de 45 % e que, apesar da taxa de redução diminuir com o aumento de a/c , demonstra-se que o agregado graúdo reciclado reduz muito a resistência à tração do concreto, ao contrário dos resultados apontados pela bibliografia. No entanto, é importante salientar que os resultados obtidos em relação à resistência à tração na flexão devem ser utilizados com ressalva, uma vez que houve alta variabilidade nos resultados, o que foi evidenciado pelo r^2 de 0,549 obtido para o modelo correspondente.

Também diferentemente do que foi mencionado na revisão bibliográfica sobre a influência negativa do agregado miúdo reciclado, os resultados demonstram que o uso da fração miúda nas misturas ajudou a aumentar a resistência à tração dos concretos reciclados quando comparados aos concretos de referência, principalmente para relações a/c mais altas no caso de $ft'D$, ou diminuir a redução de $ft_{\text{reciclado}}$ em relação a $ft_{\text{referência}}$ no caso de $ft'F$.

Tabela 56 Relação entre a resistência à tração do concreto reciclado em relação ao de referência

Resistência à tração na flexão										
Tipo de traço	Ft'F (MPa)					Relação ft'F _{reciclado} /ft'F _{referência}				
	Relação a/c					Relação a/c				
	0,40	0,45	0,60	0,75	0,80	0,40	0,45	0,60	0,75	0,80
Referência	6,3	5,6	4,5	4,1	4,0	-	-	-	-	-
100% AMR - 0% AGR	6,9	6,2	5,1	4,7	4,6	1,10	1,11	1,13	1,15	1,15
50% AMR - 50% AGR	5,2	4,8	4,1	3,9	3,8	0,82	0,85	0,91	0,95	0,96
0% AMR - 100% AGR	3,5	3,3	3,1	3,1	3,0	0,55	0,60	0,69	0,75	0,76
100%AMR - 100%AGR	4,1	3,9	3,7	3,7	3,6	0,65	0,70	0,82	0,90	0,91

Resistência à tração por compressão diametral										
Tipo de traço	Ft'D (MPa)					Relação ft'D _{reciclado} /ft'D _{referência}				
	Relação a/c					Relação a/c				
	0,4	0,45	0,6	0,75	0,8	0,4	0,45	0,6	0,75	0,8
Referência	5,1	4,3	3,0	2,5	2,4	-	-	-	-	-
100% AMR - 0% AGR	4,5	4,1	3,5	3,2	3,1	0,89	0,96	1,13	1,27	1,31
50% AMR - 50% AGR	4,6	4,0	3,2	2,8	2,7	0,90	0,94	1,03	1,11	1,13
0% AMR - 100% AGR	4,7	3,9	2,8	2,4	2,2	0,92	0,93	0,94	0,94	0,94
100%AMR - 100%AGR	4,1	3,8	3,3	3,0	3,0	0,81	0,88	1,07	1,21	1,25

Segundo TAVAKOLI e SOROUSHIAN (1996b), os concretos com agregados de maior dimensão apresentam melhores resultados de resistência à tração, como foi mencionado no item 3.2.2.4. Contudo, este estudo demonstrou que, quanto maior a dimensão do agregado, maior é a fragilidade incorporada às misturas e menores são as resistências à tração do concreto reciclado.

6.3 MÓDULO DE DEFORMAÇÃO

Cada mistura de concreto apresenta uma deformação característica, assim como acontece com a tensão, diferente do que ocorre, por exemplo, com materiais como o aço que, independente do tipo e da resistência, apresenta sempre o mesmo módulo de deformação. O módulo de deformação do concreto, por sua vez, depende da pasta de cimento hidratada, que nem sempre possui a mesma estrutura cristalina, da ligação pasta/agregado, que também pode variar muito de um traço de concreto para outro, e do agregado utilizado, cujo módulo de deformação está ligado principalmente à sua porosidade e é quem controla a capacidade de restrição da deformação da matriz de concreto. A granulometria, a dimensão máxima, a textura, a forma e a composição mineralógica dos agregados também exercem influência sobre o módulo de deformação dos concretos. Além disso, os diferentes tipos de cimento e agregados utilizados na produção do concreto também contribuem para que não haja um único módulo de deformação para o concreto. Com os concretos com agregados reciclados não poderia, então, ser diferente. Entre outras características, o agregado reciclado possui alta

porosidade e proporciona, no concreto reciclado, melhorias na zona de transição, assim, o seu comportamento no concreto frente às deformações pode ser bastante variado, como apresenta-se a seguir.

Os modelos matemáticos ajustados para o módulo de deformação de concretos com agregados reciclados estão apresentados na Tabela 57. Os modelos foram obtidos a partir da análise de regressão múltipla ponderada dos resultados de cada um dos tipos de ensaio de módulo realizados no desenvolvimento do programa experimental (ANEXO 1, Tabela 70). As equações apresentadas a seguir foram ajustadas para os níveis codificados de cada uma das variáveis independentes que estão apresentados na Tabela 42.

Tabela 57 Modelos ajustados para estimativa de módulo de deformação dos concretos

Equações	r ²	Eq. N°
$Ec(em) = 11,495 + \frac{5,27}{a/c} - 3,161 * AGR - 3,258 * AMR + 3,968 * AGR * AMR$	0,555	6.6
$Ec(lvdt) = 9,024 + \frac{6,212}{a/c} - 4,582 * AGR - 3,037 * AGR * AMR$	0,564	6.7
$Ec(ee) = 11,156 + \frac{6,992}{a/c} - 3,163 * AGR - 1,248 * AGR * AMR$	0,782	6.8

Ec(em): Módulo de elasticidade do concreto – extensômetro mecânico
 Ec(lvdt): Módulo de elasticidade do concreto – LVDT (Transformador Diferencial Variável Linear)
 Ec(ee): Módulo de elasticidade do concreto – extensômetro elétrico

Observa-se que as equações apresentam os fatores que resultaram significativos na análise estatística para cada um dos métodos utilizados na medição do módulo de deformação. Em todas as equações, os efeitos das variáveis isoladas *a/c* e *AGR* e o efeito da interação *AGR*×*AMR* foram significativos, embora a magnitude destes efeitos comuns as três equações seja um pouco diferenciado. Somente na equação 6.6, que descreve o modelo matemático para o módulo de deformação do concreto medido com auxílio de extensômetro mecânico, além dos efeitos significativos que também aparecem nas outras equações, igualmente a variável isolada *AMR* resultou significativa. Um outro fator importante para a comparação dos modelos matemáticos apresentados é o fator de determinação, *r*², alcançado por cada uma delas. Constatou-se um nível de variabilidade muito alto no módulo de deformação dos concretos medidos com auxílio do extensômetro mecânico e do LVDT, cujos valores de *r*² foram de 0,55 e 0,56, respectivamente, adotando para os testes estatísticos um nível de 10 % de significância. Baseado nos valores de *r*², optou-se por considerar neste trabalho apenas o modelo matemático do módulo ajustado para os resultados do ensaio realizado com o extensômetro elétrico, em vista da maior confiabilidade obtida com este ensaio. É importante salientar que um dos objetivos deste trabalho é avaliar o comportamento das deformações de concretos

produzidos com agregados reciclados e não realizar uma discussão a respeito da confiabilidade oferecida por cada método de determinação da propriedade em questão.

6.3.1 Efeito isolado da relação a/c sobre o módulo de deformação do concreto

Na Figura 53 visualiza-se o gráfico do módulo de deformação do concreto com agregado reciclado em função do efeito isolado de a/c. A curva foi obtida através da equação 6.8, na qual variou-se os valores codificados de a/c, mantendo-se as demais variáveis nos seus respectivos pontos médios codificados.

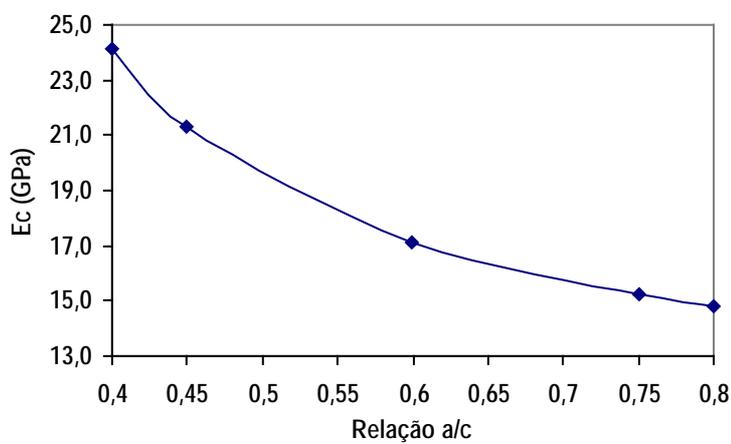


Figura 53 Módulo de deformação em função da relação a/c

Observa-se que, à medida que a relação a/c aumenta, o módulo de deformação do concreto tende a uma diminuição. Isto porque o módulo de deformação está muito ligado à porosidade da pasta de cimento, e esta porosidade aumenta com o aumento da relação a/c. Ocorre em concretos com altas relações a/c, uma maior dispersão entre os grãos de cimento, e desta forma existe uma maior tendência que os cristais de hidróxido de cálcio e etringita cresçam mais e de forma orientada, tornando as ligações da estrutura de concreto endurecido mais frágeis.

6.3.2 Efeito isolado do teor de substituição de AGR sobre o módulo de deformação do concreto

Para análise do efeito isolado do teor de AGR no módulo de deformação, foram variados os valores codificados desta variável na equação 6.8 e as demais variáveis foram mantidas no ponto médio codificado. O gráfico da Figura 54 apresenta os resultados do módulo de deformação em função de AGR.

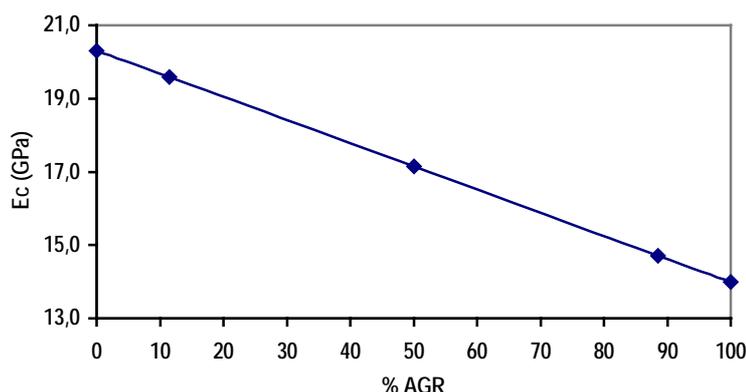


Figura 54 Módulo de deformação em função de AGR

O agregado graúdo reciclado, como era de se esperar, tende a diminuir o valor do módulo de deformação do concreto à medida que o seu teor é aumentado. De acordo com MEHTA e MONTEIRO (1994), quanto maior a quantidade de agregados densos numa mistura de concreto, maiores são os valores de módulo obtidos. Assim, a afirmação de que o aumento da quantidade de agregados porosos nas misturas de concreto diminuem o módulo, também é válida. Então, esse é o comportamento obtido em concretos com agregados reciclados, ou seja, redução nos valores de módulo à medida que a quantidade de agregado reciclado aumenta, devido, principalmente, a sua alta porosidade. Entretanto, a interação significativa AGRxAMR pode resultar em algum tipo de variação deste comportamento, como está descrito no item 6.3.3.

6.3.3 Efeito da interação AGRxAMR sobre o módulo de deformação do concreto

A partir da equação 6.8, definida na Tabela 57 para estimativa do módulo de deformação do concreto, foram obtidos os gráficos de módulo de deformação em função de AMR (%) e de módulo de deformação em função de AGR (%). Variou-se os valores codificados de AMR para cada valor de AGR, também codificado, mantendo a variável restante no ponto médio codificado; o inverso foi feito no segundo caso. Os respectivos gráficos podem ser visualizados na Figura 55.

É possível visualizar, através dos gráficos, que para valores de AGR menores que 50 %, o módulo de deformação dos concretos aumenta à medida que sobe o teor de AMR. Para valores de AGR maiores que 50 %, existe uma inversão no comportamento, ou seja, quanto maior o teor de AMR, menores são os valores de módulo obtidos. Esse comportamento pode ter explicação na melhoria da matriz e da zona de transição do concreto para baixos teores de AGR quando combinados com AMR, e o inverso, é claro, quando o teor de AGR é alto.

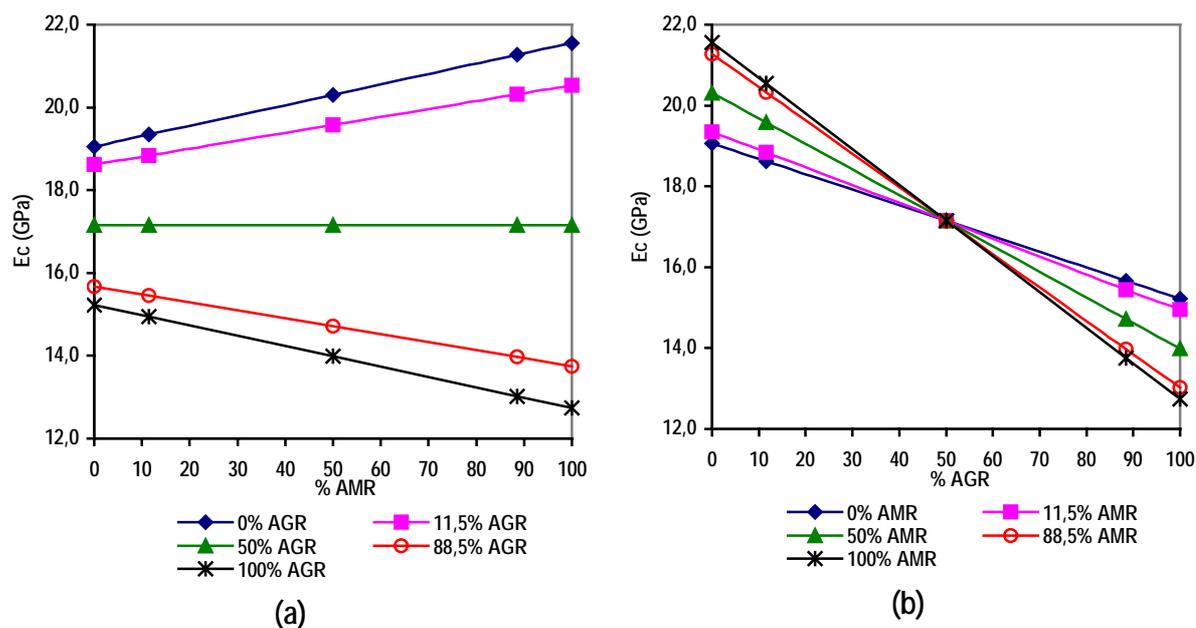


Figura 55 Módulo de deformação em função do efeito da interação AGRxAMR

Os concretos com agregados miúdos reciclados, como foi visto quando se estudou a influência desta fração na resistência à compressão do concreto, no item 6.1.2, e na resistência à tração, no item 6.2.2, pode ter a zona de transição e mesmo a matriz do concreto melhoradas, devido à existência de maior quantidade de finos presentes nesta fração do agregado reciclado que contribuem para o fechamento dos poros, ou ainda, devido à melhor aderência observada entre os grãos do agregado rugoso e poroso com a pasta de cimento, o que pode provocar um aumento do módulo de deformação do concreto pela diminuição da porosidade da matriz e da zona de transição. Contudo, à medida que o teor de agregado graúdo aumenta, o comportamento se inverte. Neste caso, acredita-se que a dimensão do agregado possa ter uma influência muito forte nos resultados, ou seja, existe uma maior quantidade de grãos porosos nas misturas de concreto e o seu malefício, em virtude do seu tamanho, é maior que qualquer melhoria que possa existir na zona de transição ou na matriz do concreto. No item 6.2.4, quando se discutiu o efeito da interação $a/c \times AGR$ sobre a resistência à tração do concreto reciclado, um comportamento semelhante foi observado, ou seja, à medida que o teor de AGR aumentava nas misturas de concreto, independente da relação a/c , a resistência à tração diminuía (Figura 50 e Figura 51). Mesmo para as misturas com relações a/c baixas, nas quais a porosidade é menor, o aumento do teor de AGR, igualmente, provocava diminuição da resistência à tração. A esse comportamento foi atribuída a influência da dimensão do agregado, que introduzia maior fragilidade ao sistema. Provavelmente, o mesmo tipo de comportamento ocorra com o módulo de deformação.

6.3.4 Relação entre o módulo de deformação e a resistência à compressão do concreto

Existe, entre o módulo de deformação e a resistência do concreto, uma relação direta, pois ambas propriedades são afetadas diretamente pela porosidade dos constituintes do concreto, porém de forma diferenciada. Estabelecer esta relação é muito importante do ponto de vista dos projetos estruturais, principalmente para concretos produzidos com novos materiais. Deste modo, foi estabelecida a relação entre o módulo de deformação e a resistência à compressão dos concretos reciclados. Foram calculados os resultados de módulo de deformação, através da equação 6.8, e os resultados de resistência à compressão aos 28 dias, através da equação 6.1, para as 125 combinações possíveis entre os valores codificados das variáveis a/c , AGR e AMR, apresentados na Tabela 42. Com os resultados obtidos foi definida a equação 6.9, que relaciona módulo de deformação, em GPa, e resistência à compressão, em MPa, para o intervalo de resistência $12 < f_c < 42$ MPa.

$$E_c = -3,48 + 4,63 * \sqrt{f_c} \quad [6.9]$$

$$r^2 = 0,804$$

6.3.5 Considerações gerais

Com o objetivo de avaliar o comportamento do módulo de deformação de concretos com agregado reciclado, foram calculados os resultados de módulo a partir da equação 6.8 para concretos com alguns teores usuais de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado observados na bibliografia. A Figura 56 apresenta as curvas de módulo em função da relação a/c para estas misturas.

Observa-se que com exceção do traço com 100 % de AMR e 0 % de AGR, as demais misturas com agregados reciclados apresentaram módulo de deformação mais baixo que o concreto de referência. Esse comportamento era esperado em virtude da porosidade introduzida nos concretos com o uso de agregado graúdo reciclado.

Os concretos com 100 % de agregado miúdo e graúdo reciclado apresentaram taxas de redução do módulo que variaram entre 24 e 38 %. As demais relações entre módulo de deformação do concreto reciclado em relação ao referência podem ser vistas na Tabela 58. É possível visualizar que o módulo de deformação do concreto reciclado, com 100 % de AMR e 0 % de AGR, apresentou um aumento de cerca de 10 a 15 % em relação ao módulo do concreto de referência.

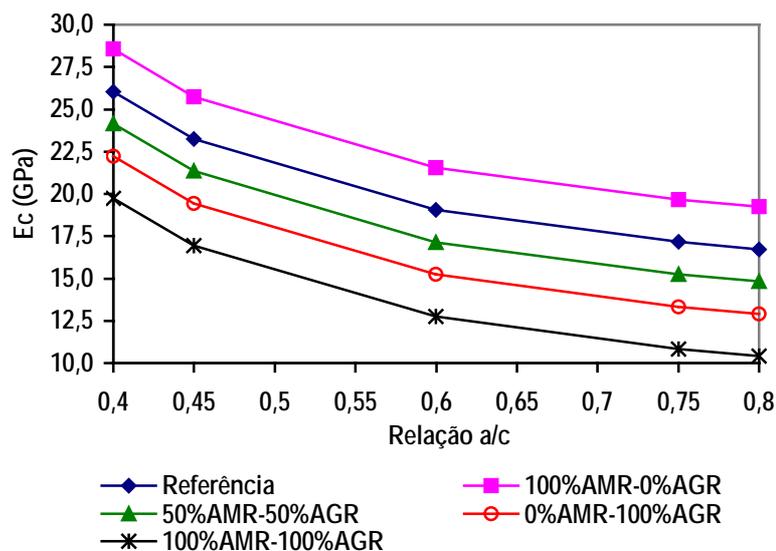


Figura 56 Curvas de módulo de deformação em função da relação a/c

Tabela 58 Relação entre o módulo de deformação do concreto reciclado e o concreto de referência

Tipo de substituição do agregado	Relação $E_{c\text{reciclado}}/E_{c\text{referência}}$				
	Relação a/c				
	0,40	0,45	0,60	0,75	0,80
100%AMR - 0%AGR	1,10	1,11	1,13	1,15	1,15
50%AMR - 50%AGR	0,93	0,92	0,90	0,89	0,89
0%AMR - 100%AGR	0,85	0,84	0,80	0,78	0,77
100%AMR - 100%AGR	0,76	0,73	0,67	0,63	0,62

Os resultados obtidos estão de acordo com os resultados da bibliografia, que aponta reduções de até 40 % para o módulo de deformação de concretos com agregado reciclados. Os resultados obtidos corroboram aqueles apontados pela bibliografia que, quanto maior o teor de substituição do agregado gráúdo natural pelo reciclado, e quanto menor a resistência dos concretos, maiores são as reduções observadas no módulo do concreto reciclado em relação ao de referência. Entretanto, maior diminuição do módulo quando tanto o agregado miúdo quanto gráúdo natural é substituído pelo reciclado apontada na bibliografia não pode ser completamente constatada nesta pesquisa. Os dados revelam que este aspecto depende da quantidade de agregado gráúdo natural substituída pelo reciclado. Para baixos teores de AGR ocorre redução sim, mas a baixos níveis.

6.4 ANÁLISE DA MICROESTRUTURA DO CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO

A estrutura de concreto não é formada somente de cimento e agregados, mas também da zona de contato entre estes dois componentes. Esta zona de contato conhecida como interface pasta/agregado ou zona de transição aparece quando uma película de água se forma ao redor dos

agregados durante o processo de exsudação de água no concreto, o que aumenta a relação a/c desta área. Devido a este aumento da relação a/c os produtos cristalinos formados apresentam tamanho relativamente maior que os mesmos produtos existentes na matriz, o que torna a estrutura da interface mais porosa. Além de possuir maior dimensão, os produtos hidratados, principalmente os cristais de hidróxido de cálcio em forma de placas, tendem a se precipitar de forma orientada (MASO, citado por MONTEIRO, 1993). Considerar a zona de transição no estudo das propriedades do concreto é interessante uma vez que frequentemente esta zona possui propriedades físicas e químicas bem distintas do restante da matriz de cimento. A maior porosidade e alta relação a/c da zona de transição podem permitir, por exemplo, mais facilmente, a passagem de água com agentes agressivos (NEVILLE, 2000b), influenciando na durabilidade dos concretos. O tamanho dos cristais e a sua disposição orientada podem reduzir a resistência de ligação entre a matriz e o agregado, influenciando nas propriedades mecânicas. Todavia, estas observações são válidas para as misturas de concretos convencionais. Quando se incorpora nas misturas as adições minerais como a sílica ativa, a estrutura da zona de transição tende a se modificar. Ou ainda, quando se usa agregados cuja textura e composição são muito distintos em relação aos agregados convencionais, estas características também podem sofrer certas diferenciações.

Para facilitar o estudo da microestrutura dos concretos foram desenvolvidas várias técnicas, dentre elas as de microscopia eletrônica de varredura, que auxiliam no entendimento da microestrutura dos concretos, permitindo maior compreensão do comportamento das propriedades do concreto frente às características dos constituintes das misturas.

Como foi descrito no capítulo 4, item 4.2.7, foram comparadas a interface pasta/agregado dos concretos reciclados e do concreto de referência. No concreto reciclado foram observadas a zona de transição entre os componentes do agregado reciclado - argamassa, concreto e material cerâmico - e a matriz. As análises foram realizadas no Centro de Microscopia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. As amostras analisadas tinham 28 dias de idade, por ser esta a idade de referência das propriedades de resistência à tração e módulo de deformação dos concretos estudados.

6.4.1 Análise em MEV através de elétrons secundários

As análises com elétrons secundários permitiram observar a morfologia da estrutura cristalina das misturas de concreto. A Figura 57 apresenta uma vista geral das amostras ampliadas 200x, na qual constata-se que nos concretos com agregados reciclados não é possível evidenciar as fases matriz e agregado distintamente (Figura 57a, b, c), diferente do concreto convencional (Figura 57d).

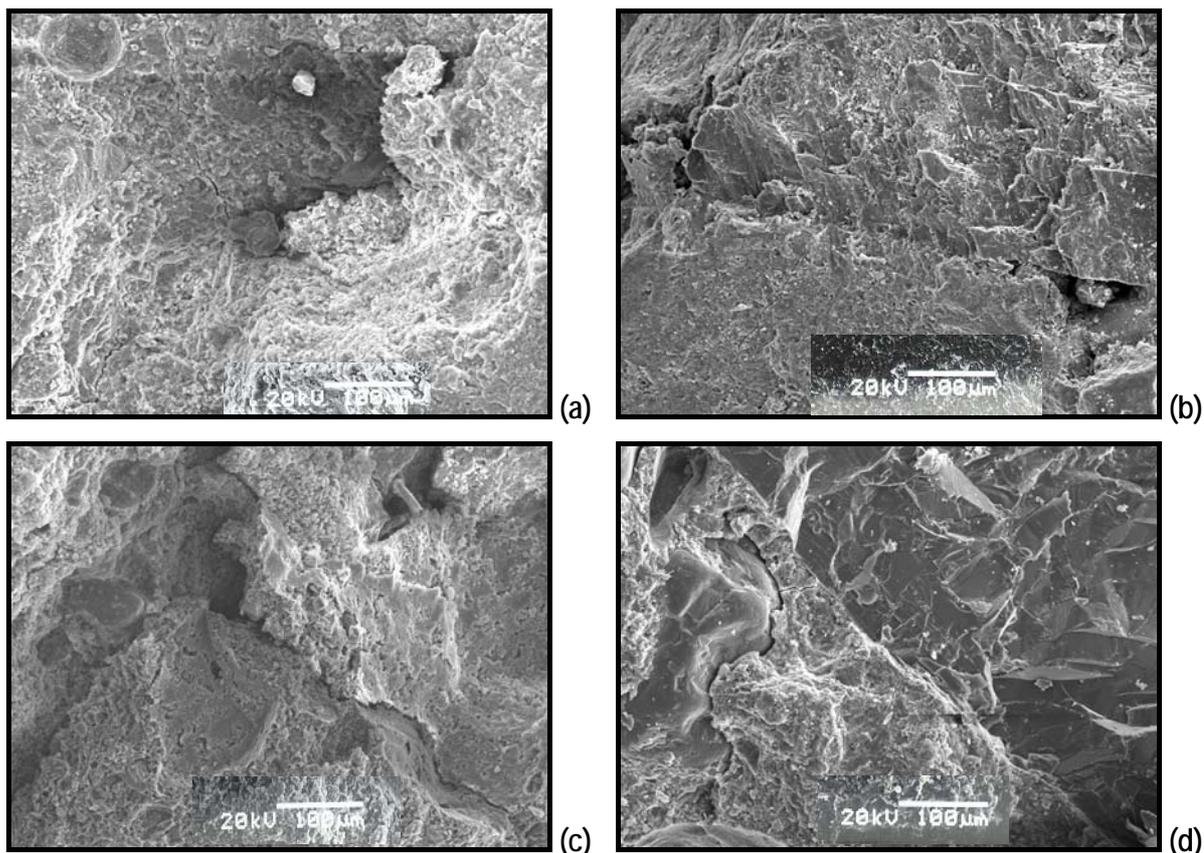


Figura 57 Vista geral da interface pasta/agregado dos concretos ampliadas 200x. a) Agregado de argamassa; b) Agregado de concreto; c) Agregado de material cerâmico; d) Concreto de referência

Na Figura 58 observa-se com maior detalhe a zona de transição entre os componentes do agregado reciclado e a matriz do concreto reciclado (a, b e c) e a zona de transição entre o agregado natural e a pasta do concreto de referência (d). No concreto de referência é possível distinguir um perfeito destacamento entre a pasta e o agregado, enquanto no concreto com agregados reciclados a matriz e a zona de transição praticamente se confundem. Observa-se, também, que os produtos de hidratação cobrem a superfície dos agregados reciclados, densificando a zona de transição, o que comprova o que foi dito durante a discussão dos resultados das propriedades mecânicas do concreto reciclado, que tiveram a aderência pasta/agregado melhoradas. Contata-se que realmente ocorre a formação de produtos de hidratação na superfície porosa e rugosa do agregado devido à absorção da pasta de cimento pelo material reciclado, fato que contribui para aumentar a aderência pasta/agregado.

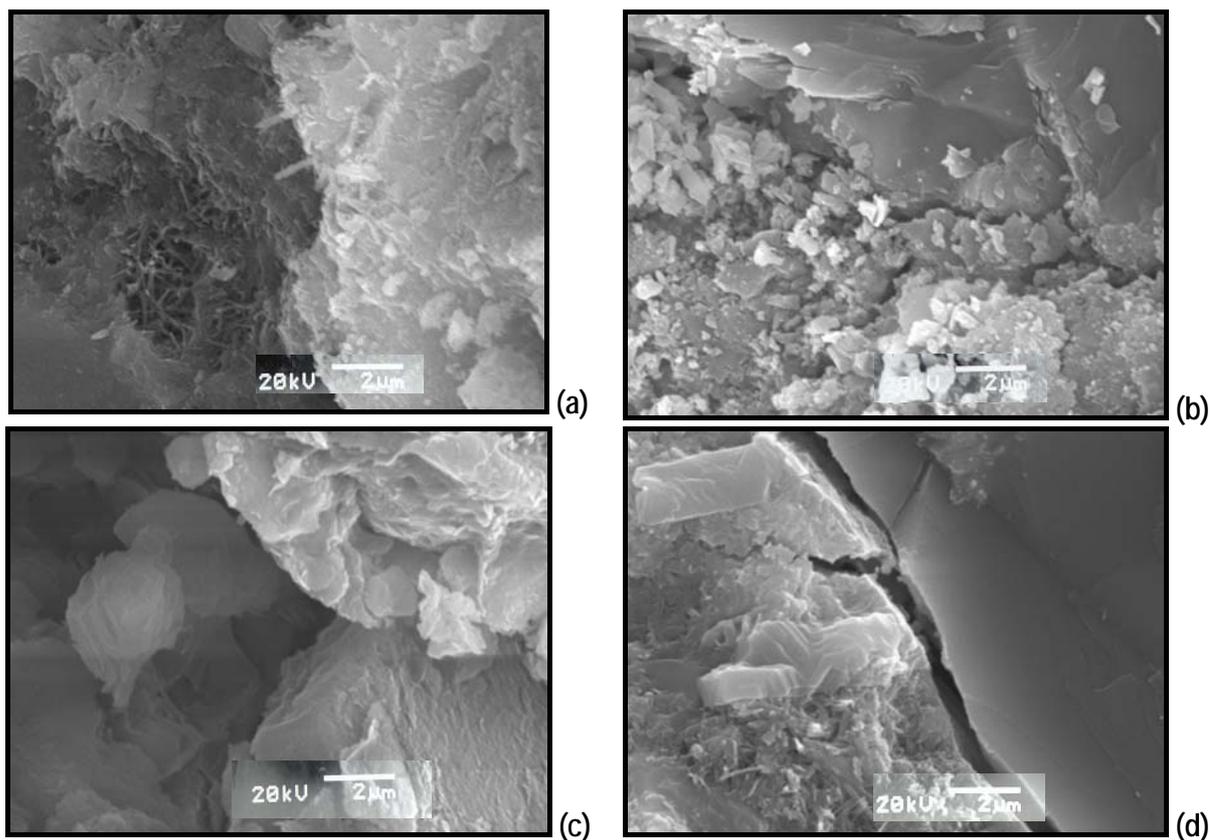


Figura 58 Imagens com magnificação de 8000x das imagens da Figura 57. a) Agregado de argamassa; b) Agregado de concreto; c) Agregado de material cerâmico; d) Concreto de referência

A Figura 59 apresenta um aumento de 20000x para as amostras analisadas, comprovando a densificação da zona de transição entre o agregado reciclado e a pasta (a e b), diferente do concreto convencional, no qual apenas a distância entre o agregado e a pasta ficam mais evidentes (c).

Observando a Figura 60 é possível perceber claramente a diferença entre a zona de transição da matriz/agregado reciclado (a) e da matriz/agregado natural (b). No concreto de referência, não há nenhum tipo de ligação da pasta com a superfície do agregado natural. No concreto reciclado, a zona de transição está interligada por produtos de hidratação, o que diminui o tamanho e a dimensão de fissuras, que podem ainda se formar, mas que, no seu conjunto, prejudicam muito menos a resistência do concreto reciclado.

Em resumo, o uso de elétrons secundários indicaram uma microestrutura, para os concretos reciclados, muito mais densa na superfície de interface pasta-agregado que para o concreto de referência. E mostrou, ainda, que as fases individuais matriz e agregado do concreto reciclado não são perfeitamente identificadas.

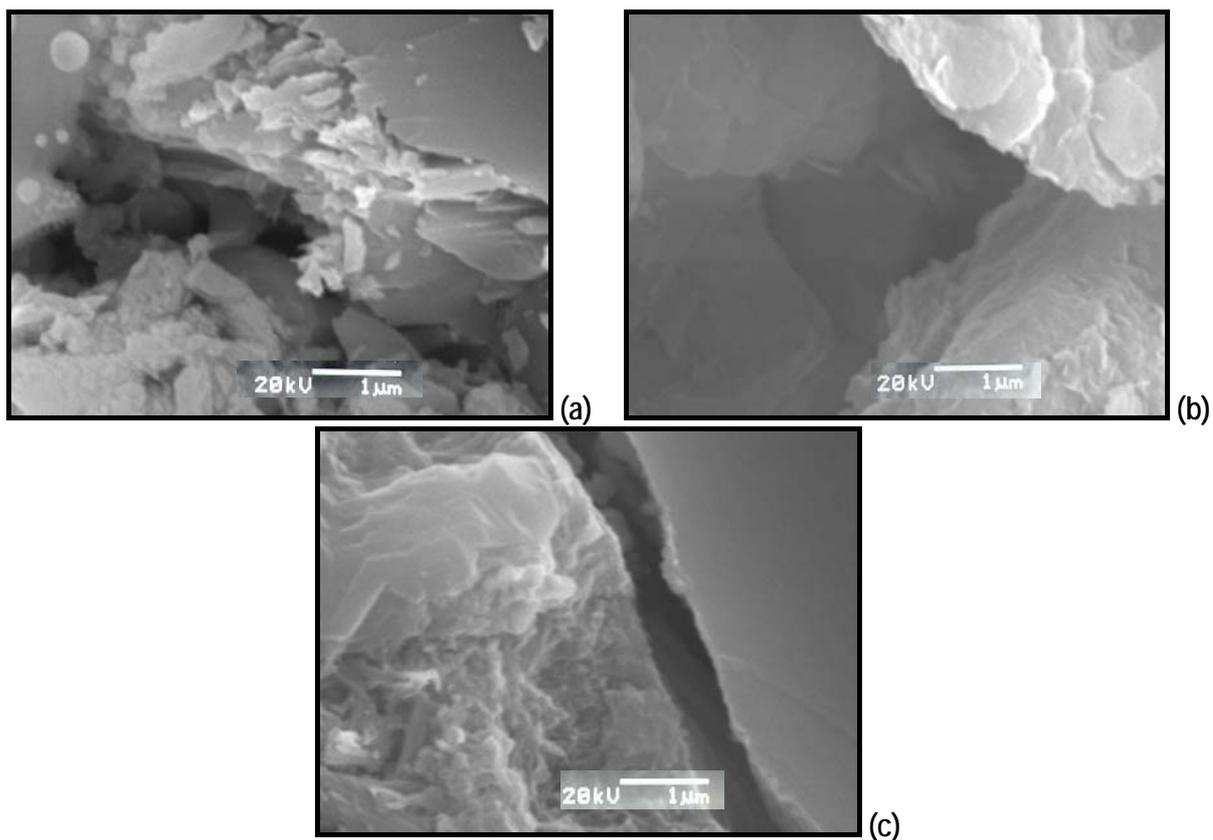


Figura 59 Imagens com magnificação de 20000x da Figura 57. a) Agregado de concreto; b) Agregado de material cerâmico; c) Concreto de referência

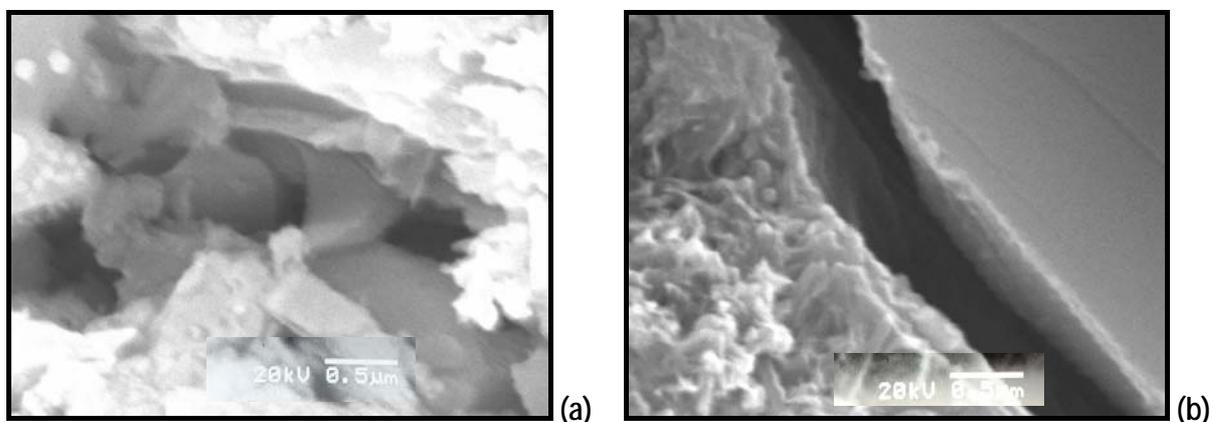


Figura 60 Imagens com magnificação de 33000x da Figura 57. a) Agregado de concreto; b) Concreto de referência

6.4.2 Análise em MEV através de elétrons retroespalhados

O uso de elétrons retroespalhados auxilia na compreensão da estrutura interna do concreto, permitindo a identificação das fases presentes, sua distribuição mineralógica e a existência de vazios. A identificação das fases presentes no concreto pode ser feita pois há um aumento da intensidade dos elétrons retroespalhados com o número atômico dos elementos presentes (MONTEIRO, 1993). Segundo MONTEIRO (1993, p.44), "os grãos anidros de cimento aparecem mais claros, o hidróxido de

cálcio cinza claro, o C-S-H cinza escuro e os vazios pretos". Na Figura 61 observa-se uma vista geral da interface entre os três tipos de agregado reciclado e a matriz, e o agregado natural e a matriz. Com um aumento de 65x as amostras se apresentam, aparentemente, similares, com exceção da amostra com agregado reciclado de argamassa (Figura 61a), na qual visualiza-se uma grande quantidade de vazios no agregado.

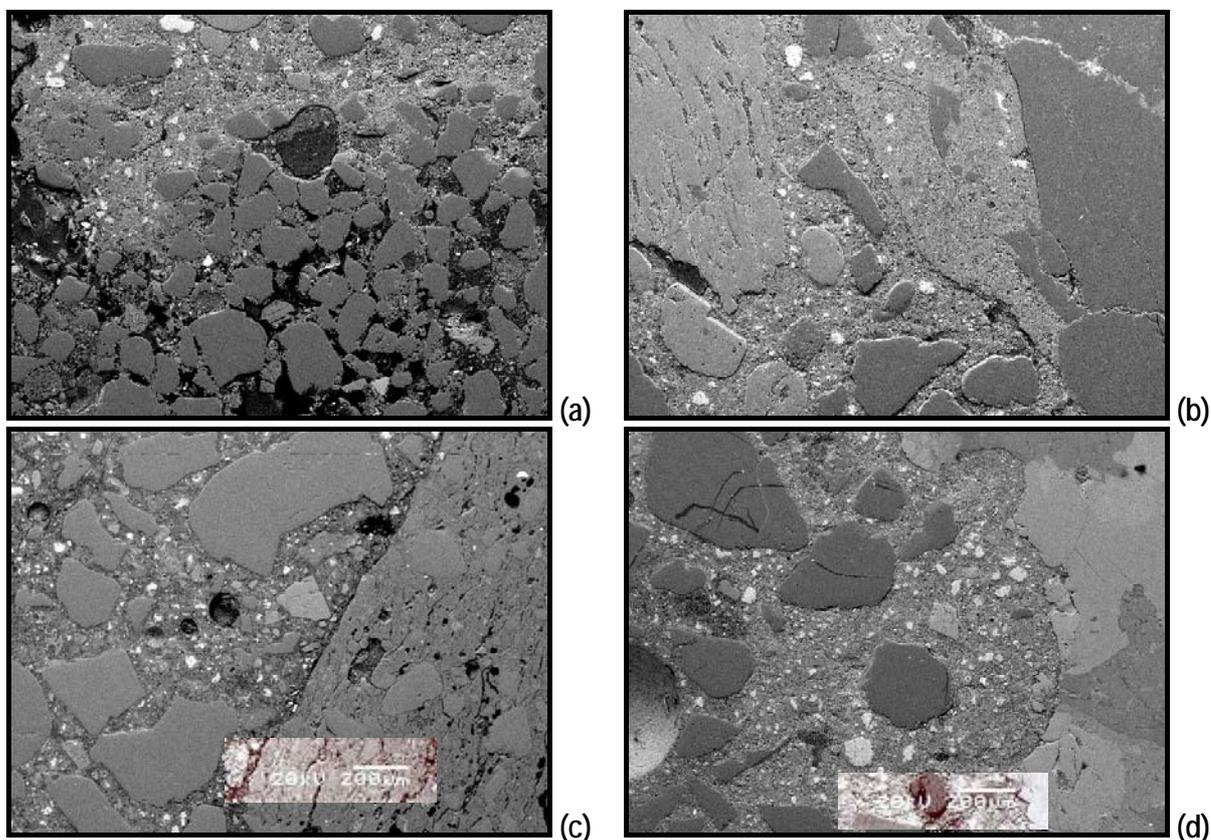


Figura 61 Vista geral das amostras de concreto, aumento de 65x. a) Agregado de argamassa; b) Agregado de concreto; c) Agregado de material cerâmico; d) Concreto de referência

Na Figura 62 é possível visualizar um aumento de 400x das imagens da Figura 61, a partir da qual se chega a mesma constatação feita no item 6.4.1: a zona de transição agregado reciclado/pasta apresenta-se como um bloco único, no caso da argamassa não é mais possível, a esta magnificância, distinguir uma fase da outra (Figura 62a). É possível observar também, na Figura 62b, que a argamassa antiga do agregado de concreto se apresenta bem densa, em relação à argamassa nova. Na Figura 62c pode-se observar que o agregado de material cerâmico possui muitas microfissuras, como foi mencionado no item 6.2, quando se estudou o comportamento do concreto reciclado frente à resistência à tração e se observou que o agregado graúdo reciclado é que poderia introduzir no sistema maior fragilidade, e que apesar da zona de transição ter sido melhorada, o agregado poderia conter fissuras que reduziram a resistência do sistema. Esta imagem mostra justamente isso, a falta de integridade do agregado, que pode ser o ponto falho da microestrutura contribuindo para possível

redução na resistência mecânica. Contudo, é necessário salientar que as fissuras existentes no agregado também podem ter sua origem na preparação da preparação da amostra, uma vez que é necessário serrar a amostra antes de embuti-la.

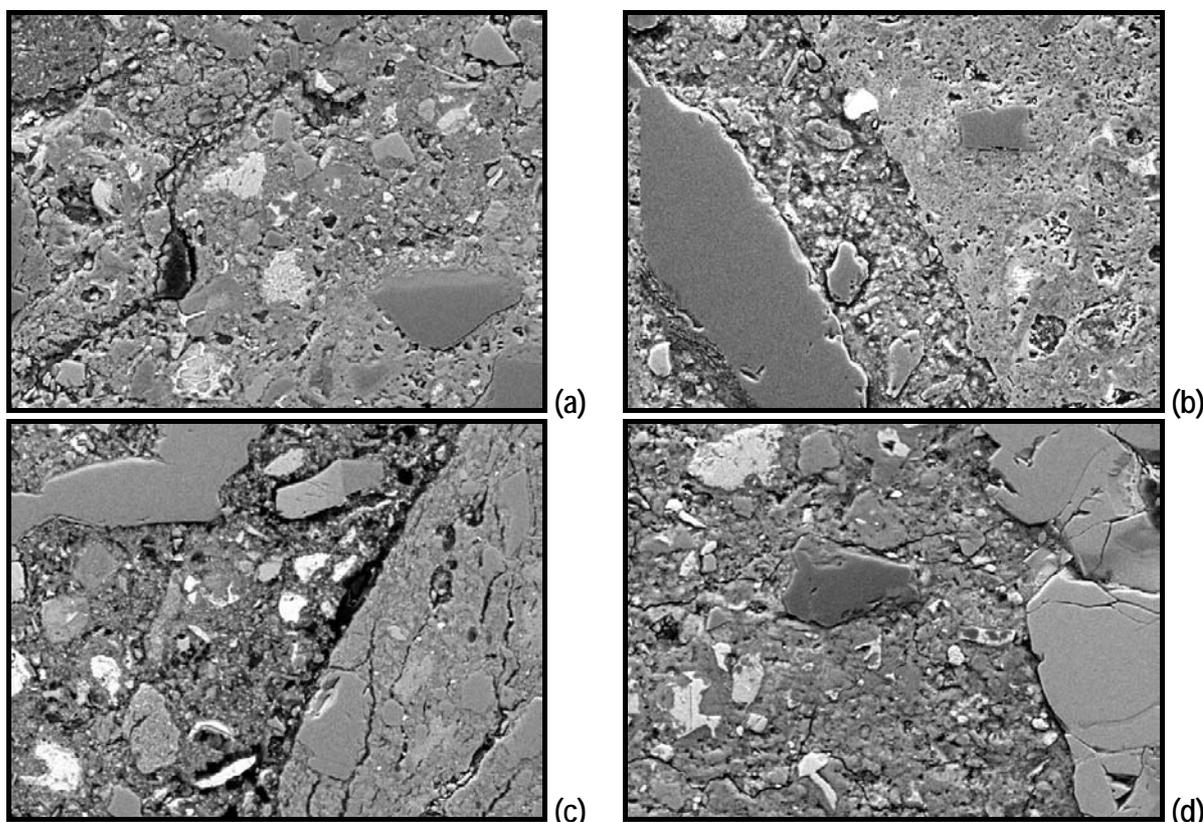


Figura 62 Aumento 400x das imagens da Tabela 61. a) Agregado de argamassa; b) Agregado de concreto; c) Agregado de material cerâmico; d) Concreto de referência

Foi dado um aumento nas imagens da Figura 61, chegou-se à magnificação de 1600x e não foi possível observar nada além daquilo que já havia sido mencionado, ou seja, a interface do agregado reciclado com a matriz do concreto é muito melhor que a interface do agregado natural com a matriz do concreto de referência (Figura 63).

SCIOTTI et al. (1998) realizou análises da interface pasta/agregado de amostras de concreto reciclado de concreto e observou, igualmente, que havia boa aderência entre os componentes das amostras. Os autores observaram, também, microfissuras na interface pasta/agregado, entretanto não salientaram a possível causa das mesmas.

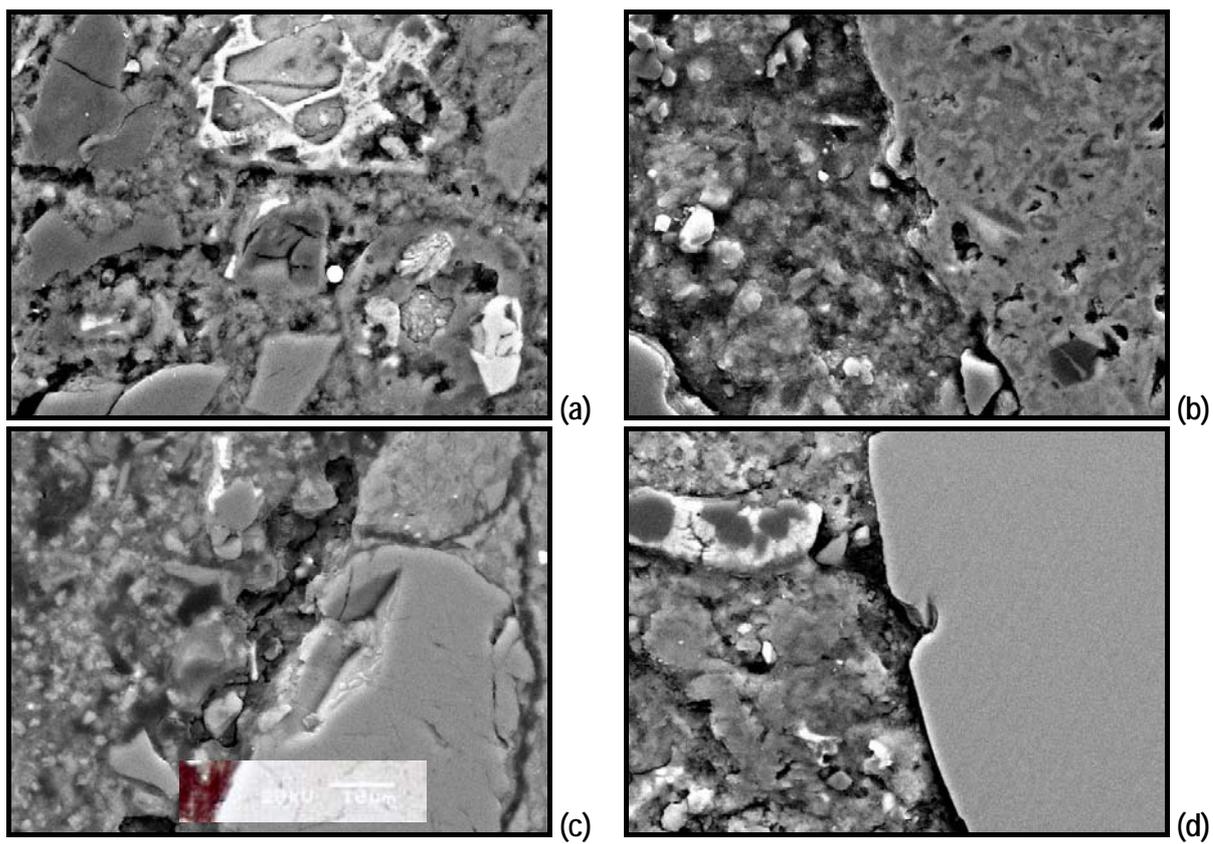


Figura 63 Aumento de 1600x das imagens da Figura 61: a) Agregado de argamassa; b) Agregado de concreto; c) Agregado de material cerâmico; d) Concreto de referência

7 AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DO MATERIAL CERÂMICO PRESENTE NOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO E SUA INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO RECICLADO

Como já foi amplamente discutido neste trabalho, a avaliação da utilização de resíduos de construção e demolição no setor da construção tem sido estimulada em várias partes do mundo e muitos estudos tem sido desenvolvidos no sentido de ampliar o conhecimento sobre o comportamento deste resíduo para produção de novos materiais.

A grande heterogeneidade na composição deste resíduo talvez seja uma das características que apresentem maior influência sobre as propriedades de concretos produzidos com agregados reciclados. Uma vez que cada lote de resíduo apresente uma composição distinta, as propriedades dos agregados e dos materiais por ventura produzidos com o mesmo também apresentarão diferentes resultados. Contudo, é necessário contornar esta limitação, até que sejam implantadas políticas mais rigorosas e restritivas para gestão deste resíduo dentro e fora dos canteiros de obra.

No Brasil, a composição do resíduo de construção e demolição apresenta uma grande quantidade de materiais de base cimentícia e materiais cerâmicos, como foi visto no item 2.5.2. Estes materiais, principalmente os materiais cerâmicos, podem apresentar características que contribuam para a melhoria das propriedades mecânicas de concretos e argamassas produzidos com o agregado miúdo reciclado. Neste sentido, e com base nos resultados apresentados no capítulo 6, observou-se que o material cerâmico finamente moído poderia contribuir com alguma reatividade pozolânica, melhorando o desempenho mecânico dos concretos em idades mais avançadas. Deste modo, foi desenvolvido um estudo piloto para avaliar a atividade pozolânica do material cerâmico finamente moído em argamassas com cal e com cimento.

Serão apresentados a seguir uma breve revisão sobre o assunto e os resultados obtidos com o desenvolvimento do experimento.

7.1 ATIVIDADE POZOLÂNICA E O AGREGADO MIÚDO RECICLADO

As pozolanas são, por definição, substâncias constituídas de sílica e alumina que em presença de água se combinam com o hidróxido de cálcio e com os diferentes componentes do cimento formando compostos estáveis à água e com propriedades aglomerantes. As pozolanas estão classificadas em **naturais**: rochas vulcânicas submetidas à meteorização; **artificiais**: argilas de

qualquer tipo submetidas a altas temperaturas para desidratação, porém a temperaturas abaixo do início da fusão; e por fim **subprodutos industriais**: cinzas volantes, cinza de casca de arroz, sílica ativa, entre outros (COUTINHO, 1997; MEHTA e MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1995; MALHOTRA e MEHTA, 1995?).

Segundo PRICE (1975), o uso de boas pozolanas em quantidade ideais, combinadas com o cimento, têm a capacidade de melhorar várias características dos concretos como, por exemplo, aumentar a trabalhabilidade, reduzir o calor de hidratação e retração térmica, reduzir a permeabilidade e aumentar a resistência ao ataque por sulfatos, entre outros. Por outro lado, o autor salienta também que o uso de quantidades excessivas, ou de pozolanas de qualidade duvidosa, pode levar à redução da taxa de resistência dos concretos, aumento da retração por secagem, aumento das relações água/aglomerante e diminuição da resistência aos ciclos de gelo/degelo.

KIHARA e SHUKUZAWA (1982) recomendam que argilas sem calcinação não devem ser utilizadas como pozolanas pois podem reduzir a resistência das misturas produzidas. E salientam, ainda, que a atividade pozolânica está relacionada, a curto prazo, com a superfície específica do material, e, a longo prazo, com a quantidade de sílica e alumina presente.

As argilas calcinadas pertencentes ao grupo das pozolanas artificiais podem ser obtidas em qualquer lugar e assim apresentam alto potencial de utilização para produção de argamassas e concretos. No seu processo de produção, as pozolanas artificiais são obtidas com a criação da instabilidade da estrutura interna dos minerais argilosos pela ação de temperaturas que variam entre 500 e 900 °C. Este procedimento ajuda a aumentar a porosidade das partículas e assim, sua superfície ativa. Entretanto, a temperatura de queima das argilas deve ser inferior à de fusão. Os materiais cerâmicos utilizados na construção civil são produzidos exatamente com temperaturas de queima que variam dentro desta faixa. Desta forma, podem possuir uma estrutura cristalina tal que apresente certa atividade pozolânica em presença do hidróxido de cálcio e dos demais produtos provenientes da hidratação do cimento Portland quando finamente moídos.

Existem duas teorias sobre a reatividade dos materiais cerâmicos em forma de blocos e tijolos. Uma relaciona as propriedades pozolânicas dos tijolos com uma fase vítrea solúvel que reage com o Ca(OH)_2 , formando C-S-H. Esta fase vítrea só pode ser encontrada em tijolos cerâmicos queimados a temperaturas acima de 950 °C. A segunda diz que apenas os tijolos queimados a baixas temperaturas é que podem apresentar esta reatividade. Esses materiais possuiriam metacaulin altamente reativo ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) numa forma instável (WINKLER e MÜELLER, 1998).

Em face da possibilidade de reatividade pozolânica dos materiais cerâmicos, acredita-se que agregados reciclados com altos teores deste material na sua composição possam contribuir para a melhoria da resistência à compressão de concretos ou argamassas recicladas, principalmente em idades mais avançadas (LIMA, 1999). LEVY (1997) afirma que as argilas calcinadas em temperaturas não muito elevadas, os tijolos e blocos cerâmicos de 2º linha representam os materiais cerâmicos com maior grau de pozolanicidade.

Como foi observado no item 3.2.2.3, não há uma uniformidade dos resultados de resistência à compressão dos concretos reciclados, muito menos um único fator que evidencie a causa de tamanha heterogeneidade nos resultados. Analisando a bibliografia encontrada, pouco se sabe sobre uma possível reação pozolânica advinda dos materiais cerâmicos presentes na composição dos resíduos de C&D, quando finamente moídos, sobre a resistência à compressão do concreto reciclado. Alguns estudos foram encontrados em argamassas utilizando agregados miúdos reciclados de resíduos de material cerâmico, os quais estão descritos a seguir.

HAMASSAKI et al. (1996) estudaram 8 traços diferentes de argamassa incorporando resíduos de blocos cerâmicos, tijolos e blocos de concreto separadamente e avaliaram, além de propriedades mecânicas das argamassas produzidas, o índice de atividade pozolânica dos materiais. Os autores realizaram o ensaio de Chappelle modificado proposto por RAVERDI et al., no qual os resultados são expressos em termos de quantidade de CaO consumidos pela amostra. O material é considerado pozolânico quando apresenta um índice de consumo mínimo de 330 mg de CaO/g da amostra. Os resultados encontrados pelos autores para os materiais utilizados estão apresentados na Tabela 59.

Tabela 59 Resultados do ensaio de pozolanicidade pelo método de Chappelle modificado de agregados reciclados de resíduos de C&D

Material	Consumo de CaO (mg de CaO/g da amostra)
Bloco cerâmico	137,1
Tijolo	255,8
Bloco de concreto	53,6

Fonte: HAMASSAKI et al., 1996

Observa-se pelos resultados que nenhum dos materiais utilizados neste estudo apresentaram índice de consumo de CaO pelo menos igual a 330 mg CaO/g. Isto significa que nenhum dos materiais pode ser classificado como uma pozolana. Entretanto, fica claro através dos resultados que os materiais cerâmicos consomem mais CaO que o bloco de concreto, como era de se esperar. Os autores sugerem que, em vista destes resultados, pode haver uma influência pozolânica dos materiais cerâmicos sobre o desempenho mecânico das argamassas produzidas, ainda que pequena.

LEVY (1997) também realizou estudo da atividade pozolânica dos materiais utilizados em seu trabalho de dissertação através do mesmo método usado por HAMASSAKI et al. (1996). Os resultados estão apresentados na Tabela 60.

Tabela 60 Resultados do ensaio de pozolanicidade pelo método de Chappelle modificado de agregados reciclados de resíduos de material cerâmico

Material	Consumo de CaO (mg de CaO/g da amostra)
Blocos cerâmicos de 1ª linha	242
Blocos cerâmicos de 1ª linha (passante em # 50)	224
Blocos cerâmicos de 2ª linha (passante em # 50) ¹	454
Tijolos maciços (passante em # 50)	565

¹ Material utilizado na pesquisa

Fonte: LEVY, (1997)

Diferente dos resultados encontrados por HAMASSAKI et al. (1996), LEVY (1997) encontrou reatividade pozolânica no material utilizado em sua pesquisa.

WINKLER e MÜELLER (1998) realizaram estudos com pó de tijolos adicionados ao cimento, tendo sua influência analisada também em argamassas. Os autores analisaram a influência de tijolos queimados a baixas e a altas temperaturas. Todos os materiais foram reduzidos a partículas com a mesma finura do cimento utilizado e adicionados às misturas em teores que variaram de 0 a 60 %. A atividade pozolânica foi analisada em função do consumo de Ca(OH)_2 através de difração de raio X, em amostras retiradas aos 28, 91 e 180 dias. Os resultados podem ser observados na Tabela 61.

Tabela 61 Teor de Ca(OH)_2 nas argamassas (avaliação semi-quantitativa)

Tipo de material	Teor de material (%)	Teor de Ca(OH)_2		
		Idade (dias)		
		28	90	180
LB I	10	+++	++++	+++
	20	+++	+++	+++
	30	+++	+++	++
	40	+++	++	+
	60	++	+	+
HB I	20	++++	+++	+++
	40	+++	++	++
	60	+	+	+
Referência	-	++++	++++	+++

+ = Teor mais baixo

++++ = Teor mais alto

LB I = Tijolos queimados a baixas temperaturas

HB I = Tijolos queimados a altas temperaturas

Fonte: WINKLER e MÜELLER (1998)

Observa-se, pelos resultados, que o teor de Ca(OH)_2 diminui com o aumento do teor de pó de tijolos cerâmicos. Todavia, não se observam diferenças nas misturas realizadas com o mesmo teor de adição de pó. Os autores consideram que o pó obtido com os tijolos queimados a altas temperaturas apresentam a maior reatividade pozolânica, pois para este material se conseguiu, também, os maiores resultados de resistência à compressão. Porém, se apenas os resultados de consumo de Ca(OH)_2 fossem avaliados, dir-se-ia que não há diferença em utilizar tijolos cerâmicos queimados a baixas ou altas temperaturas.

Os resultados encontrados na bibliografia não podem ser considerados conclusivos a respeito da influência pozolânica de materiais cerâmicos existentes na composição dos resíduos de C&D. É possível dizer apenas que o efeito pozolânico existe a depender do tipo e quantidade de material que está sendo utilizado, sendo necessário um estudo criterioso em cada caso. Além disso, esta influência no concreto ainda não foi estudada em nenhum caso, isto justificou o estudo descrito abaixo.

7.2 AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DO MATERIAL CERÂMICO PRESENTE NO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Como foi dito no item 7, a atividade pozolânica do material cerâmico finamente moído foi avaliada com a cal e com o cimento de acordo com a prescrição das Norma Brasileiras.

Antes de avaliar o índice de atividade pozolânica do material é interessante que se faça algumas considerações sobre a composição do resíduo utilizado. A composição da amostra de resíduo de construção e demolição utilizada no desenvolvimento da pesquisa está apresentada na Figura 17. Como foi observado, os resultados apontam maior incidência na amostra de argamassas e materiais cerâmicos. Este resultado pode estar relacionado à tipologia construtiva mais utilizada no Brasil, que é de alvenaria com revestimento argamassado.

É importante lembrar que a composição do resíduo de construção e demolição foi determinada após o beneficiamento da amostra, desta forma foi realizada apenas na fração do agregado graúdo, ou seja, nas partículas com dimensão maior que 4,8 mm, visto que, em partículas menores que esta dimensão, efetuar a classificação do material a "olho nu" seria muito difícil. Com base nisto seria interessante levantar algumas suposições. Por exemplo, o percentual que cada material apresenta na composição do agregado miúdo reciclado pode ser um pouco diferente do apresentado para o agregado graúdo. Deste modo, pode ser que os materiais como as rochas naturais ou os concretos, que têm maior resistência, fragmentem-se menos em partículas menores, diferente do que ocorre com as argamassas e os materiais cerâmicos porosos, que possuem maior tendência a se fragmentar. Isto

posto, o agregado miúdo reciclado teria maior probabilidade de possuir ainda mais partículas com potencial pozolânico. Se for avaliada, ainda, a composição granulométrica do agregado miúdo reciclado apresentada na Tabela 34, perceber-se-á que mais de 10 % do material tem dimensão menor que 0,15 mm, o que aumenta as chances deste material contribuir com algum efeito pozolânico.

Com base nos resultados de resistência à compressão dos concretos, principalmente quando se avaliou o efeito da interação significativa do teor de AMR e a idade no item 6.1.6, e nos resultados e suposições levantados anteriormente, é que foi realizada a avaliação da reatividade pozolânica do material cerâmico apresentada a seguir.

O material utilizado para a realização do ensaio foi obtido a partir da britagem do material cerâmico separado na amostra do resíduo de construção e demolição utilizado no desenvolvimento deste trabalho, que foi posteriormente peneirado na peneira de abertura # 0,075 mm.

7.2.1 Atividade pozolânica com a cal

O ensaio de determinação da atividade pozolânica do material cerâmico com a cal (hidróxido de cálcio) foi realizado conforme a prescrição da NBR 5751 (1992).

Este ensaio consiste em preparar uma argamassa com 9 partes em massa de areia normal do IPT, uma parte em massa de hidróxido de cálcio puro - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – e mais uma quantidade de material pozolânico que corresponde ao dobro do volume de hidróxido de cálcio. Para tanto foram determinadas as massas específicas da cal e do material pozolânico a ser testado com base na NBR 6474 (1984). Os resultados de massa específica, bem como as quantidades de material utilizadas, estão apresentados na Tabela 62.

Tabela 62 Massa específica e quantidade de materiais utilizados na determinação da atividade pozolânica com a cal

	Materiais		
	Hidróxido de cálcio	Material cerâmico	Areia normal
Massa específica (kg/dm ³)	2,19	2,58	-
Quantidade de materiais (g)	104,00	245,04	936,00

A quantidade de água da mistura foi determinada para que fosse obtida uma argamassa com índice de consistência de (225 ± 5) mm, de acordo com a prescrição da NBR 7215 (1996). Após a determinação da quantidade ideal de água para a mistura, foram moldados 6 corpos-de-prova para determinação da resistência à compressão, curados como prescreve a NBR 5751 (1992). Aos 7 dias de

idade, os corpos-de-prova foram rompidos à compressão e os resultados estão apresentados na Tabela 63.

Tabela 63 Resultados do ensaio de atividade pozolânica do material cerâmico com a cal

Consistência (mm)							Relação a/agl final	
Resultados individuais				Média	DP	CV (%)		
230	226	225	227	227	2,16	0,95	0,60	
Resistência à compressão axial (MPa)								
fc individual (MPa)						Média	DP	CV (%)
7,6	7,7	7,4	6,8*	7,8	7,8	7,7	0,15	1,97

* Resultado não considerado para o cálculo da média e do desvio padrão
a/agl = água/aglomerante
DP = Desvio Padrão
CV (%) = Coeficiente de variação percentual

A NBR 12653 (1992), que especifica as exigências químicas e físicas para que um material seja considerado como uma pozolana, estabelece que o índice de atividade pozolânica com a cal aos 7 dias deve ser igual ou superior a 6 MPa. Observa-se, assim, que o resultado de resistência média à compressão da argamassa com adição de material cerâmico foi de 7,7 MPa, ou seja, 28 % superior ao mínimo exigido pela referida norma.

7.2.2 Atividade pozolânica com o cimento

Foi realizada, também, a avaliação da atividade pozolânica do material cerâmico com o cimento Portland de acordo com o método prescrito pela NBR 5752 (1992).

Neste ensaio são realizadas duas misturas de argamassa, uma mistura de referência e outra mistura que substitui 35 % do volume absoluto do cimento Portland pelo material a ser avaliado. A atividade pozolânica é dada pela relação entre a resistência à compressão da argamassa com o material em estudo e a resistência à compressão da argamassa de referência.

Também para este ensaio é necessário a determinação da massa específica dos materiais, para realização do cálculo da quantidade material necessária a cada mistura. Os resultados de massa específica, bem como a quantidade de materiais, estão apresentados na Tabela 64.

Foi determinada a quantidade de água necessária para que cada uma das misturas alcançassem o índice de consistência de (225 ± 5) mm, determinado de acordo com a NBR 7215 (1996). Neste ensaio também foram moldados 6 corpos-de-prova por traço, com os quais foi determinada a resistência à compressão das argamassas após 28 dias de cura, de acordo com a

prescrição da NBR 5752 (1992). Os resultados do ensaio de determinação do índice de consistência, bem como da resistência à compressão, estão apresentados na Tabela 65.

Tabela 64 Massa específica e quantidade de materiais utilizados na determinação da atividade pozolânica com o cimento Portland

Materiais			
	Cimento	Material cerâmico	
Massa específica (kg/dm ³)	3,11	2,58	
Quantidade de materiais (g)			
	Cimento	Material cerâmico	Areia normal
Argamassa A	312,0	-	936,0
Argamassa B	202,8	90,6	936,0

Argamassa A = Argamassa de referência
Argamassa B = Argamassa com substituição do cimento pelo material pozolânico

Tabela 65 Resultados do ensaio de atividade pozolânica do material cerâmico com cimento Portland

Consistência (mm)								Relação a/agl final		
Argamassa	Resultados individuais				Média	DP	CV (%)			
A	223	232	231	228	228,5	4,04	1,77	0,50		
B	222	219	222	224	221,8	2,06	0,93	0,55		
Resistência à compressão axial (Mpa)										
Argamassa	fc individual (MPa)						Média	DP	CV (%)	Água requerida
A	24,8*	24,7*	26,1	28,3*	25,7	25,8	25,9	0,20	0,77	-
B	20,8*	23,0	21,1*	22,1	22,6	19,9*	22,6	0,45	1,99	103 %

Argamassa A = Argamassa de referência
Argamassa B = Argamassa com substituição do cimento pelo material pozolânico
* Resultado não considerado para o cálculo da média e do desvio padrão
a/agl = água/aglomerante
DP = Desvio Padrão
CV (%) = Coeficiente de variação percentual
Água requerida = quantidade de água necessária para obtenção do índice de consistência de (225 ± 5) mm da argamassa B, dividido pela quantidade de água da argamassa A, multiplicado por 100.

O índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias, em relação à argamassa de referência, é de 87,2 %. De acordo com a NBR 12653 (1992), este índice deve ser no mínimo de 75 %, ou seja, o material avaliado atende a esta exigência da norma para que um material seja considerado pozolânico. Bem como o percentual de água requerida para que a argamassa com material cerâmico alcançasse o índice de consistência de (225 ± 5) mm foi 103 %, que é menor que o valor máximo de 115 ou 110 % especificado pela NBR 12653 (1992). O valor máximo de água requerida depende da classe na qual se encontra o material estudado.

7.2.3 Considerações gerais

A partir dos resultados de atividade pozolânica obtidos, observa-se que o material cerâmico presente na amostra de resíduo utilizado para a produção dos concretos apresentou índices de atividade pozolânica, tanto com a cal, quanto com o cimento. Entretanto, somente com estes ensaios não é possível afirmar que este material pode ser classificado como uma pozolana pois, para isso, seria necessário realizar outros ensaios de caráter tanto físico quanto químico que cumpram as exigências da NBR 12653 (1992). Este não é o objetivo desta investigação. É preciso ficar claro que analisar a atividade pozolânica do material cerâmico presente na composição do resíduo é interessante para que se possa ter certeza que o uso deste material pode contribuir com a melhoria da resistência à compressão e, principalmente, da resistência à tração dos concretos produzidos com agregados reciclados.

Com os resultados obtidos pode-se afirmar que o material cerâmico possui sim uma certa atividade pozolânica, e, ainda, que há uma probabilidade de que isso tenha contribuído com o pequeno incremento de resistência apresentado pelos traços de concreto com altos teores de agregado miúdo reciclado. Todavia, não é possível garantir que tenha sido esta a maior ou a única razão para este incremento de resistência. Seria necessário um estudo mais aprofundado das características físicas e químicas do material cerâmico, bem como seria interessante realizar misturas de concreto com adição somente deste material para avaliar o incremento de resistência, principalmente em idades mais avançadas, como 180 dias, ou mais. E ainda realizar uma avaliação do consumo de hidróxido de cálcio das misturas ao longo do tempo.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

8.1 CONCLUSÕES

A preocupação com o meio ambiente tem sido a mola propulsora para reavaliação de vários dos processos produtivos em toda a sociedade. A população mundial tem se voltado para os conceitos de sustentabilidade e desta forma vários segmentos ligados à ciência e tecnologia vem buscando alternativas para controlar ou minimizar danos causados pelo consumo indiscriminado de matéria prima e energia e pelo alto volume de resíduos gerados. A reciclagem dos resíduos tem se mostrado uma alternativa viável, neste sentido, e está sendo perseguida por todos os setores. A construção civil tem se mostrado um setor promissor para absorção destes novos materiais, sejam eles resíduos de outras indústrias ou o seu próprio resíduo. Nas últimas duas décadas o estudo da utilização dos resíduos de construção e demolição teve grandes avanços, principalmente para sua utilização em pavimentação. Todavia tem se buscado nos últimos tempos incorporar este resíduo à produção do concreto. Esta prática é considerada por muitos pesquisadores como a forma mais eficaz de tentar fechar o ciclo de vida dos materiais utilizados na construção.

É possível afirmar, contudo, que é necessário ampliar ainda mais o conhecimento sobre o comportamento do resíduo de construção e demolição para produção de novos concretos. A falta de uma metodologia padronizada nos estudos já realizados até agora levam a conclusões muito variadas e até divergentes sobre este assunto. A maior parte dos estudos realizados levaram em consideração o uso de um componente específico do resíduo de construção e demolição, ou seja, ou se estudou o efeito do resíduo de concreto, ou do resíduo de materiais cerâmicos, ou do resíduo de argamassas, sobre algumas propriedades de concretos e argamassas produzidos com o material reciclado, o que pode induzir ao pensamento da obrigatoriedade da separação do material para sua utilização. Entretanto, pelo que foi visto, tal aspecto se apresenta, pelo menos por enquanto, inviável, prática e economicamente, dentro da realidade brasileira. Antes que o resíduo de construção e demolição possa se consagrar como subproduto da construção civil seria interessante mostrar a viabilidade na utilização do material, dirimir todas as incertezas sobre o seu comportamento quando incorporado à produção de novos materiais, e depois tentar implantar técnicas de manuseio diferentes das existentes atualmente.

Com o intuito de ampliar o conhecimento neste sentido, esta pesquisa avaliou o comportamento de concretos produzidos com diferentes proporções de agregados miúdo e graúdo de resíduos de construção e demolição, bem como avaliou algumas propriedades físicas dos agregados reciclados. Foi considerada a influência de diferentes teores de substituição dos agregados miúdos e

grãos naturais por reciclados e diferentes relações a/c sobre as propriedades do concreto no estado fresco - massa específica e trabalhabilidade – e no estado endurecido – resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e resistência à tração na flexão, e módulo de deformação dos concretos. Foram estabelecidos modelos de comportamento dos concretos reciclados em função das variáveis supracitadas, que permitem estimar as propriedades dos concretos com agregados reciclados. É importante ressaltar que as conclusões que constam neste trabalho dizem respeito à utilização de materiais com características peculiares utilizados na produção de concretos em proporções e técnicas de execução específicas. Deste modo, seria interessante que novas pesquisas, utilizando metodologia semelhante, fossem realizadas no sentido de confirmar e complementar os resultados aqui obtidos.

A partir do programa experimental foi possível obter as seguintes conclusões.

- a) O resíduo de construção utilizado no desenvolvimento desta pesquisa apresentou na sua composição grande quantidade de rocha natural (29,84 %), seguida por argamassa (28,26 %) e material cerâmico (26,33 %).
- b) As curvas granulométricas do agregado miúdo e grão reciclado evidenciaram materiais com granulometria contínua, aspecto considerado positivo para produção de concretos, devido ao melhor arranjo existente entre as partículas. Além disso, é interessante salientar que o agregado miúdo reciclado apresentou um teor de finos cerca de 23 vezes maior que o agregado miúdo natural. E que a análise granulométrica da fração < 0,15 mm evidenciou um material com diâmetro médio 5,5 vezes maior que o diâmetro médio do cimento CP I S – 32 utilizado nesta pesquisa.
- c) A massa específica dos agregados reciclados foi 4 % e 19 % menor que a massa específica das frações de agregados naturais miúdos e grãos, respectivamente. Também a massa unitária dos agregados reciclados foi inferior à massa unitária dos agregados naturais miúdos e grãos, 21 % e 30 %, respectivamente. Tais reduções nas massas específicas e unitárias dos agregados reciclados ressaltam a necessidade de compensar o volume de material reciclado utilizado em misturas de concreto obtidas a partir de traços de concreto convencional.
- d) Para a determinação da massa específica do agregado grão reciclado não foi possível utilizar o método prescrito pela norma NBR 9937 (1987). Considerando que este método prevê a secagem superficial das partículas e que, no caso do agregado reciclado, este processo poderia levar à desagregação do material em virtude da sua maior fragilidade, e também, devido à sua maior porosidade, não havia como garantir que a água dos poros mais superficiais não seria também

retirada durante o processo de secagem. Assim a massa específica do agregado graúdo reciclado foi determinada através da adaptação de um método descrito por NEVILLE (1995) para agregados convencionais.

- e) As normas NBR 9777 (1987) e NBR 9937 (1987), que prescrevem os métodos para determinação das taxas de absorção dos agregados miúdos e graúdos naturais, respectivamente, não foram consideradas eficientes para determinação da taxa de absorção dos agregados reciclados. Desta forma, foi desenvolvido um método para determinação da taxa de absorção de agregados reciclados que está descrita no item 4.7.2.1.3.
- f) As taxas de absorção do agregado miúdo e graúdo reciclado foram 8,60 % e 4,95 %, respectivamente. As taxas de absorção dos agregados reciclados são bastante elevadas e, deste modo, há a necessidade de compensá-las durante a produção dos concretos para que não haja diminuição excessiva da água livre das misturas de concreto produzidas com agregados reciclados, fato este que comprometeria a trabalhabilidade.
- g) As curvas de absorção dos agregados reciclados demonstram que tanto a fração miúda quanto a graúda absorvem, em 30 minutos de ensaio, mais de 50 % do total de água absorvido em 24 horas de ensaio, e a absorção é tanto mais rápida quanto menor for a dimensão das partículas de agregado.
- h) O agregado graúdo natural e reciclado apresentaram grãos em forma lamelar. Apesar do agregado reciclado utilizado nesta pesquisa apresentar-se menos lamelar que o natural, a sua textura rugosa combinada com este tipo de forma podem prejudicar a trabalhabilidade dos concretos reciclados produzidos.
- i) Para a produção do concreto reciclado pode ser seguida a mesma ordem de mistura utilizada para os concretos convencionais.
- j) Os concretos com agregados reciclados necessitam de mais água que os concretos convencionais em virtude da alta taxa de absorção apresentada pelo material reciclado. No entanto, não é necessário compensar totalmente a taxa de absorção do agregado reciclado. Esta compensação deve ser feita com base na curva de absorção dos agregados reciclados, sendo suficiente compensar entre 40 e 50 % da taxa de absorção do material. O intervalo de tempo necessário para que isso ocorra será determinado com base na curva de absorção do material a ser utilizado.

- k) A água de absorção deve ser adicionada aos agregados reciclados no tempo determinado pela curva de absorção do material utilizado. Nesta pesquisa, este procedimento foi executado 10 minutos antes da mistura de concreto, ou seja, o agregado reciclado deve ser incorporado à mistura previamente umedecido.
- l) Durante a produção dos concretos reciclados, caso haja necessidade de adição de aditivos plastificantes ou superplastificantes, o mesmo pode ser feito antes da adição da areia, para que o aditivo aja de forma mais eficiente sobre as partículas de cimento.
- m) Os procedimentos de adensamento e cura de concretos reciclados é semelhante aos dos concretos convencionais.
- n) A massa específica dos concretos com agregados reciclados é menor que a massa específica de concretos com agregados naturais. Observou-se que o agregado graúdo reciclado exerce forte influência sobre os resultados de massa específica dos concretos reciclados. A redução da massa específica dos concretos reciclados é tanto maior, quanto maior é o teor de agregado graúdo reciclado presente na mistura de concreto e quanto maior a relação a/c utilizada. O agregado miúdo reciclado também diminui a massa específica do concreto, porém em menor proporção que o agregado graúdo reciclado, em virtude da sua menor dimensão, o que contribui para elevar a massa específica das misturas. A alta porosidade do agregado reciclado pode ser considerada como fator preponderante para a diminuição da massa específica dos concretos reciclados.
- o) A avaliação da trabalhabilidade de concretos com agregados reciclados através da determinação do índice de consistência, medido pelo ensaio de abatimento do tronco de cone, prescrito pela NBR 7223 (1982), não se mostrou muito eficiente, o que foi comprovado pela alta variabilidade encontrada nos resultados. Na verdade, a avaliação da trabalhabilidade do concreto reciclado deve estar muito mais ligada ao conceito de "moldabilidade" das misturas de concreto no estado fresco que ao valor de abatimento dos concretos, em virtude das características físicas do agregado reciclado, que promovem um certo travamento entre os grãos da mistura, dificultando o seu abatimento.
- p) Foi realizada uma análise de regressão múltipla ponderada dos resultados de trabalhabilidade dos concretos reciclados, medida pelo abatimento do tronco de cone, para a qual foi obtido o modelo matemático descrito a seguir:

$$A = 30,422 - 14,941 * a/c - 25,358 * AGR + 11,78 * a/c * AGR - 17,059 * AGR * AMR + 11,508 * a/c * AGR * AMR$$

$$r^2 = 0,748$$

- q) Através da análise do efeito das variáveis significativas sobre o comportamento das misturas de concreto reciclado no estado fresco, observou-se que o uso do agregado miúdo reciclado sozinho prejudica menos o abatimento dos concretos. Ou seja, os concretos que utilizam apenas agregados miúdos reciclados na sua composição apresentaram os maiores resultados de abatimento. Diferentemente, quanto maior o teor de agregado graúdo reciclado utilizado, maiores foram as reduções no abatimento dos concretos.
- r) Com o auxílio do modelo matemático para o cálculo do abatimento dos concretos foram obtidos resultados que variaram de 0 a cerca de 55 mm. Todos os resultados obtidos ficaram abaixo do abatimento 70 ± 10 mm estabelecido como parâmetro para produção dos concretos. Isso ajuda a comprovar a ineficiência no método de determinação da trabalhabilidade dos concretos medida pelo abatimento do tronco de cone.
- s) Além da trabalhabilidade medida pelo abatimento do tronco de cone, foi avaliada, também, a perda de abatimento de três misturas de concreto, duas com agregados reciclados e uma com agregados naturais. Os resultados não podem ser considerados como conclusivos a respeito do comportamento de concretos com agregados reciclados, mas mostram uma tendência à perda de abatimento mais rápida dos concretos com agregados reciclados, quando comparados ao concreto com agregado natural, principalmente nos instantes iniciais. Observou-se que a perda de abatimento possui uma estreita relação com a curva de absorção de água dos agregados, quando não é realizada a pré-umidificação dos agregados.
- t) A granulometria do agregado reciclado também exerce influência na perda de abatimento dos concretos reciclados. Os concretos com agregados graúdos reciclados tenderam à uma perda de abatimento muito mais rápida, devido à taxa de absorção mais lenta desta fração de material reciclado. Em contrapartida, o concreto com agregado miúdo reciclado apresentou perda de abatimento mais lenta que o concreto convencional após os 15 minutos iniciais do ensaio, o que demonstrou que, passada a fase de absorção inicial, mais brusca, o sistema tendeu ao equilíbrio através da saturação do agregado, devido ao tamanho reduzido das partículas. Admite-se inclusive que talvez tenha havido uma inversão no transporte interno de água. Contudo, somente um estudo

mais sistemático e detalhado sobre o assunto poderia fornecer subsídios para confirmar as tendências apontadas neste estudo.

- u) Com base nos resultados dos ensaios de abatimento e de perda de abatimento, combinados com as observações realizadas durante a produção dos concretos reciclados, foi realizado um estudo complementar de perda de trabalhabilidade de algumas misturas de concreto utilizando dois métodos de medição: o ensaio de abatimento do tronco de cone e o ensaio de tempo de vibração VeBe. Os resultados demonstraram que a introdução de uma componente dinâmica para a determinação da trabalhabilidade dos concretos é bastante satisfatória, visto que a quantidade de água necessária para que as misturas de concreto reciclado atinjam o mesmo tempo de vibração de misturas de referência é menor que o necessário para que estas atinjam o mesmo abatimento.
- v) A pré-umidificação dos agregados reciclados faz reduzir também a influência da taxa de absorção na perda de trabalhabilidade dos concretos reciclados.
- w) As relações unitárias do ensaio de vibração VeBe dos concretos reciclados são semelhantes às dos concretos de referência, o que permite afirmar que este ensaio poderia ser considerado como melhor parâmetro para avaliar a trabalhabilidade dos concretos reciclados. Contudo, não foi possível encontrar uma correlação entre os resultados do ensaio de vibração VeBe e do ensaio de abatimento do tronco de cone.
- x) De forma geral é importante que fique claro que este estudo demonstrou que utilizar o abatimento do concreto como parâmetro para produção de misturas com agregado reciclado não pode ser considerada uma boa prática, uma vez que as características físicas do agregado reciclado, principalmente da fração graúda, influenciam sobremaneira este método de determinação da trabalhabilidade. E ainda, a quantidade de água necessária para que o concreto reciclado apresente o mesmo abatimento do concreto de referência é bastante elevada, o que pode levar a reduções bruscas da resistência à compressão, prejudicando a potencialidade de aplicação do material.
- y) A partir da análise estatística dos resultados obtidos nos ensaios foi possível determinar os modelos matemáticos ajustados para as propriedades mecânicas avaliadas. Os modelos estão descritos a seguir:

Para resistência à compressão em (MPa):

$$f_c = 7,104 + \frac{15,594}{a/c} + 4,531 * AGR + 1,178 * AMR + 4,453 * Idade - \frac{5,149 * AGR}{a/c} + \frac{0,923 * Idade}{a/c} + 0,502 * AMR * Idade - \frac{0,970 * AGR * Idade}{a/c}$$

$$r^2 = 0,919$$

Para resistência à tração por compressão diametral em (MPa):

$$f_t' D = 1,721 + \frac{1,431}{a/c} + 0,697 * AMR - \frac{0,494 * AMR}{a/c} - \frac{0,099 * AGR}{a/c}$$

$$r^2 = 0,843$$

Para resistência à tração na flexão em (MPa):

$$f_t' F = 3,12 + \frac{1,021}{a/c} + 0,299 * AMR - \frac{0,702 * AGR}{a/c}$$

$$r^2 = 0,549$$

Para o módulo de deformação, medido com extensômetro elétrico, em (GPa):

$$E_c(ee) = 11,156 + \frac{6,992}{a/c} - 3,163 * AGR - 1,248 * AGR * AMR$$

$$r^2 = 0,782$$

Todos os modelos foram obtidos através da análise de regressão múltipla ponderada dos resultados de cada ensaio, considerando os níveis codificados de cada variável utilizada que estão apresentados na Tabela 42.

- z) A resistência à compressão dos concretos é muito influenciada pela porosidade dos materiais que o compõe e pela porosidade da zona de transição. Quando se utiliza agregado reciclado nas misturas de concreto, a relação a/c e o teor de agregado graúdo reciclado são os fatores de maior influência na determinação da resistência, ou seja, a porosidade da matriz, determinada pela relação a/c, e a porosidade do agregado são fatores de fundamental importância na resistência final dos concretos.

- aa) Observou-se que os concretos com agregados reciclados obedecem o comportamento da lei de Abrams, ou seja, quanto maior a relação a/c , menor é resistência do concreto. Também, confirmou-se que o grau de hidratação do concreto influencia os resultados de resistência à compressão do concreto reciclado, da mesma forma que ocorre com o concreto convencional, porém em níveis diferenciados.
- bb) Com relação ao teor de substituição do agregado miúdo e graúdo natural pelo reciclado observou-se que: há a viabilidade da utilização apenas do agregado miúdo reciclado em substituição total ou parcial do agregado miúdo natural, principalmente para baixas relações a/c ; quando é usado 100 % de AMR e 0 % de AGR para qualquer relação a/c , o concreto reciclado apresenta as maiores taxas de crescimento de resistência, dos 28 aos 91 dias, o que aponta a existência de atividade pozolânica da fração miúda do agregado reciclado; o uso de AMR e AGR combinados nas misturas de concreto com altas relações a/c também é viável, pois fornece concretos com maiores resistências, principalmente quanto maior for o teor de substituição dos agregados naturais pelos reciclados, devendo-se tomar cuidado apenas com a trabalhabilidade das misturas do concreto no estado fresco.
- cc) Com base nos resultados de resistência à compressão observou-se que o procedimento de compensar parcialmente a taxa de absorção dos agregados reciclados é extremamente satisfatório, uma vez que não foram observados problemas com o adensamento e resistência à compressão das misturas de concreto produzidas desta forma.
- dd) O modelo matemático obtido a partir da análise estatística dos resultados experimentais de resistência à tração na flexão apresentou um valor de r^2 de 0,549, o que não permite uma boa correlação com entre o modelo e estes resultados. Como esse foi o melhor modelo matemático obtido para esta propriedade, as considerações e modelos matemáticos apresentados no item 6.2, para resistência à tração na flexão, devem ser utilizados com cuidado.
- ee) O estudo da resistência à tração dos concretos reciclados apresentou uma tendência à redução dos valores de resistência, com o aumento da relação a/c . Esta redução foi de cerca de 26 % para a resistência à tração na flexão e de 42 % para a tração por compressão diametral.
- ff) A resistência à tração na flexão dos concretos com agregados reciclados tende a ser menor para qualquer teor de substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado, quando apenas este é substituído ou em combinação com o agregado miúdo reciclado. Caso inverso ocorre quando somente o agregado miúdo reciclado está presente nas misturas de concreto, a resistência à

tração na flexão tende a ser maior para qualquer teor de substituição do agregado miúdo natural pelo reciclado, em qualquer das relações a/c avaliadas.

- gg) Na resistência à tração por compressão diametral os resultados dependem da relação a/c utilizada. Para relações a/c altas os concretos com agregado reciclados apresentaram valores mais elevados de resistência à tração por compressão diametral que os concretos de referência. Com exceção dos traços que substituíam 100 % do agregado graúdo natural por reciclado e usavam agregado miúdo natural, para o qual a resistência à tração por compressão diametral do concreto reciclado foi sempre menor que a do concreto de referência.
- hh) De forma geral, a resistência à tração dos concretos com agregados reciclados tende a diminuir quanto maior for a dimensão do agregado reciclado utilizado, em virtude da fragilidade inerente ao material.
- ii) Ao relacionar a resistência à tração com a resistência à compressão dos concretos reciclados, observou-se que existe uma redução da relação f_t/f_c à medida que a resistência à compressão do concreto aumenta, porém esta relação, para o concreto reciclado, é maior que as relações normalmente conhecidas para os concretos convencionais. Os modelos de previsão de resistência à tração em função da resistência à compressão para os concretos reciclados, válidos para o intervalo $12 < f_c < 42$ MPa, aos 28 dias, são os seguintes:

Para resistência à tração na flexão (MPa):

$$f_t' F = 2,421 + 0,082f_c$$

$$r^2 = 0,522$$

Para resistência à tração por compressão diametral (MPa):

$$f_t' D = 1,325 + 0,09f_c$$

$$r^2 = 0,899$$

- jj) Com relação ao módulo de deformação dos concretos reciclados, a relação a/c e o teor de AGR foram as variáveis que mais influenciaram nos resultados obtidos. Foram observadas reduções nos valores de módulo em virtude da porosidade do material reciclado. Tais reduções no módulo de deformação dos concretos reciclados são tanto maiores, quanto maiores forem as relações a/c e os

teores de AGR utilizados na produção dos concretos, devido à maior porosidade introduzida no sistema.

- kk) Observou-se uma redução de cerca de 38 % no módulo de deformação do traço de concreto com substituição total do agregado miúdo e graúdo natural pelo reciclado e relação a/c 0,80. Contudo, para teores de AGR menores que 50 %, quando se substitui também o agregado miúdo reciclado, ocorre uma diminuição na taxa de redução do módulo dos concretos reciclados em relação aos concretos de referência, ou até, um aumento do módulo do concreto reciclado em relação ao de referência, dependendo dos teores de substituição de AMR e AGR utilizados.
- ll) Foi estabelecido, também, o modelo de previsão do módulo de deformação do concreto reciclado, em GPa, em função da resistência à compressão, em MPa, válido para o intervalo $12 < f_c < 42$ MPa, aos 28 dias:

$$E_c = -3,48 + 4,63 * \sqrt{f_c}$$

$$r^2 = 0,804$$

- mm) A análise da microestrutura dos concretos permitiu evidenciar a melhoria da zona de transição pasta/agregado dos concretos reciclados. Foi possível constatar que realmente há maior entrelaçamento entre a pasta e o agregado reciclado, devido à formação de produtos de hidratação na superfície dos agregados reciclados. Tais observações permitem explicar a melhoria das propriedades mecânicas observadas nos concretos com agregados reciclados, principalmente dos traços de concreto com relações a/c mais elevadas.
- nn) A avaliação do material cerâmico finamente moído mostrou que este material apresenta índices de atividade pozolânica tanto com a cal quanto com o cimento. Isso demonstra que o material cerâmico presente na composição do resíduo de construção e demolição pode ter contribuído para o aumento observado no ganho de resistência dos concretos reciclados, dos 28 aos 91 dias, que foi tanto maior, quanto maior foi o teor de AMR utilizado.

De forma geral conclui-se que o uso de agregados reciclados é perfeitamente viável para produção de concretos, pelo menos do ponto de vista das propriedades mecânicas avaliadas. No entanto, é importante ressaltar que, para relações a/c baixas, a combinação das duas frações de agregados reciclados merece atenção especial, visto que foram observadas reduções das resistências

mecânicas. Para produção de concretos com altas relações a/c , o uso das duas frações de agregados reciclados é bastante satisfatório, devendo ser observados apenas cuidados com a trabalhabilidade.

Além disso, diferente do que afirma a bibliografia, é perfeitamente possível utilizar a fração miúda do material reciclado sem maiores prejuízos ao desempenho mecânico dos concretos. E ainda, que o uso do agregado graúdo reciclado afeta muito mais a resistência à tração, módulo de deformação e trabalhabilidade dos concretos que o uso do agregado miúdo reciclado. Por fim, é importante salientar que o uso do concreto reciclado em estruturas de concreto deve implicar na consideração, em seu cálculo, de que vão ser obtidas maiores deformações do que com concretos convencionais.

Apesar do bom comportamento apresentado pelos concretos reciclados no tocante às propriedades mecânicas avaliadas, outros estudos devem ser realizados com o objetivo de confirmar os resultados aqui apresentados. Além disso, devem ser consideradas outras propriedades mecânicas como fluência e retração e ainda os aspectos relativos à durabilidade das misturas de concreto.

Por fim, salienta-se que o uso de materiais reciclados para construção passa pelo incentivo à adoção de tecnologias construtivas mais sustentáveis. O aumento na qualidade dos produtos obtidos na construção, a necessidade de uma manutenção adequada e a diminuição dos custos são algumas das metas a serem alcançadas, entretanto, isso não deve ocorrer de forma indiscriminada, em detrimento do meio ambiente. É interessante que sejam elaboradas normas rígidas de controle de qualidade de materiais e serviços, bem como disseminar a adoção de novas tecnologias de interesse comum, com o objetivo melhorar a conservação ambiental.

8.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como numa única pesquisa é impossível vencer todas as possibilidades de estudo sobre o comportamento de um material, principalmente quando se trata de um novo material, existem muitos trabalhos que podem ser desenvolvidos, no sentido de contribuir para aumentar o conhecimento sobre o assunto tratado. Assim, são feitas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- avaliar a fluência de concretos com diferentes teores de substituição agregados naturais por agregados reciclados.
- realizar um estudo dos métodos de dosagem existentes para concretos convencionais que possam ser aplicados a concretos com agregados reciclados;

- realizar um estudo aprofundado dos métodos de medida da trabalhabilidade de concretos convencionais que possam ser aplicados a concretos reciclados, tentando encontrar uma correlação com o ensaio de abatimento do tronco de cone ;
- realizar estudos mais aprofundados da perda de trabalhabilidade em concretos com substituição total e parcial dos agregados naturais por reciclados;
- realizar um estudo econômico do uso de agregados reciclados, avaliando custos com gerenciamento de resíduos, implantação de programas de reciclagem de resíduos de construção e demolição, e produção de concretos e argamassas reciclados;
- realizar um estudo do estado de propagação de fissuras sob aplicação de cargas em corpos-de-prova de concreto reciclado;
- realizar um estudo da porosidade de concretos reciclados com baixas relações a/c ;
- realizar um estudo dos mecanismos de transporte interno de água durante a formação da estrutura do concreto reciclado e sua influência na porosidade do material;
- avaliar a influência dos agregados reciclados na retração térmica e hidráulica dos concretos;
- estudar o efeito de diferentes tipos de cura nas propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos reciclados;
- estudar com mais detalhe a interface pasta/agregado dos concretos reciclados;
- realizar um estudo da possibilidade da existência de reações álcali/agregado nos concretos reciclados;
- realizar um estudo da influência dos vários tipos de impureza, que podem estar presentes no material reciclado, sobre as propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos reciclados;

- realizar um estudo do uso de agregados reciclados miúdos de resíduos de construção e demolição para produção de argamassas e sua influência nas propriedades mecânicas e de durabilidade da argamassa produzida;
- avaliar a retração por secagem de argamassas produzidas com resíduos de concreto, material cerâmico e argamassa, separadamente e misturado, verificando se há diferença significativa nos tipos de componentes presentes no resíduo sobre esta propriedade;
- avaliar o teor de ar incorporado nas misturas de concreto com diferentes tipos e teores de substituição do agregado natural pelo reciclado;
- avaliar a resistência de aderência dos concretos reciclados;
- avaliar a resistência de aderência superficial de argamassas produzidas com agregados miúdos reciclados.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AÏTCIN, P. C. **High-performance concrete**. London: E & FN SPON, 1998. 591p.
- AKHTARUZZAMAN, A. A.; HASNAT, A. Properties of concrete using crushed brick as aggregate. **Concrete International**, v. 05, n. 2, p. 58-63, 1983.
- ALAVEDRA, P.; DOMÍNGUEZ, J.; GONZALO, E. et al. La construcción sostenible. El estado de la cuestión. **Informes de la Construcción**, v.49, nº 451, p.41-47, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado em estado solto – determinação da massa unitária**: NBR 7251. Rio de Janeiro, 1982.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado graúdo – determinação do índice de forma pelo método do paquímetro**: NBR 7809. Rio de Janeiro, 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado para concreto**: NBR 7211. Rio de Janeiro, 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – determinação da absorção e massa específica do agregado graúdo**: NBR 9937. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – determinação da composição granulométrica**: NBR 7217. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”**: NBR 6465. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman**: NBR 9776. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – determinação da absorção de água em agregados miúdos**: NBR 9777. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – ensaio de qualidade do agregado miúdo**: NBR 7221. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa e concreto – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos**: NBR 7222. Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland – determinação da resistência à compressão**: NBR 7215. Rio de Janeiro, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland comum**: NBR 5732. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica**: NBR 6474. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação**: NBR 8522. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos**: NBR 12142. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**: NBR 7223. Rio de Janeiro, 1982.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto fresco – determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico**: NBR 9833. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto fresco – perda de abatimento**: NBR 10342. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cal**: NBR 5751. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento**: NBR 5752. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais pozolânicos**: NBR 12653. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto**: NBR 5738. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto e execução de obras de concreto armado**: NBR 6118. Rio de Janeiro, 1978.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos sólidos**: NBR 10004. Rio de Janeiro, 1987.

BALLISTA, L. P. Z.; MACHADO Jr., E. F. Concreto com agregado reciclado modificado com látex estireno-butadieno. Determinação da condição ótima de cura. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 29., 2000, Punta del Este, Uruguai. **Memórias...** [CD-ROM]. Punta del Este: EDITOR, 2000, 14p.

BANTHIA, N.; CHAN, C. Use of recycled aggregate in plain and fiber-reinforced shotcrete. **Concrete International**, v. 22, n. 06, p. 41-45, 2000.

BARRA, M. Dosagem de concretos com agregados reciclados: aspectos particulares. In: RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, ALTERNATIVA ECONÔMICA PARA PROTEÇÃO AMBIENTAL, 1997, São Paulo. **Anais...** São Paulo: PCC-USP, 1997, p.39-43.

BARRA, M. **Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón armado**. Barcelona, 1996. 223 p. Tese (doutorado). Escola técnica Superior d'Enginyers de Camin, Canal i Ports. Universitat Politècnica de la Catalunya.

BARRA, M.; VASQUEZ, E. Particularidades do processo de carbonatação em concretos de agregado reciclado. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, 4., 1997, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: UFRGS, 1997, p.217-224.

BAZUCO, R. S. **Utilização de agregados reciclados de concreto para a produção de novos concretos**. Florianópolis, 1999. 100 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

BOSSINK, B. A. G.; BROUWERS, H. J. H. Construction Waste: qualification and source evaluation. **Journal of Construction Engineering and Management**. vol. 122, n. 01, p. 55-59, mar. 1996.

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

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

CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A.; COSTA, D. B. et al. Characterization of C&D waste and processed debris aiming the production of construction materials. In: CIB SYMPOSIUM IN CONSTRUCTION AND ENVIRONMENT: THEORY INTO PRACTICE, 2000, São Paulo, Brazil. **Proceedings...** [CD-ROM]. São Paulo: CIB, 2000. 10p.

CECCATO, M. R. **Estudo da trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras de aço**. São Paulo, 1998. 98 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo.

CINCOTTO, M. A. Utilização de subprodutos e resíduos na indústria da construção civil. In: SIMPÓSIO DE DESEMPENHO DE MATERIAIS E COMPONENTES DE CONSTRUÇÃO CIVIL. 2, 1988, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: [s.n.], 1988. p.171-181.

COLLINS, R. J. Recycled aggregate – application and control issues. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). **Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate**. London: Thomas Telford Pub., 1998b. p. 169-175.

COLLINS, R. J. Upgrading the use of recycled aggregates. In: MATERIALS AND TECHNOLOGIES FOR SUSTAINABLE CONSTRUCTION – CIB WORLD BUILDING CONGRESS, 1998a, Gävle, Sweden. **Proceedings...** Gävle: Kickan Fahlstedt, KTH, 1998. Symposium A., 2v. v. 1, p.101–106.

CONSTRUÇÃO. Do caos à solução. Região Sul: PINI. n. 329, p.8-11, mar. 1996.

CORNELL, J. A. **How to apply response surface methodology**. 2. Ed. Milwaukee, WI: American Society for Quality Control, 1990. 82p. Vol.8.

COSTA, A. C. F. **Os caminhos dos resíduos sólidos urbanos de Porto Alegre/RS: da origem ao destino final**. Porto Alegre, 1998. 144 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

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

COUTINHO, A. S. **Fabrico e propriedades do betão**. 3.ed. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1997b. 3v. v.2. 219.

COUTINHO, A. S.; GONÇALVES, A. **Fabrico e propriedades do betão**. 2.ed. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1994. 3v. v.3. 368p.

D'AMICO, C.; GARGANO, C. Recycling of demolition waste to produce durable concrete – experimentation in order to diffuse use. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). **Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate**. London: Thomas Telford Pub., 1998b. p. 205-211.

DACZKO, J. A. A proposal for measuring rheology of production concrete. **Concrete International**, v. 22, n. 05, p. 47-49, 2000.

DE PAUW, P.; THOMAS, P.; VYNCKE, J.; et al. Shrinkage and creep of concrete with recycled materials as coarse aggregates. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). **Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate**. London: Thomas Telford Pub., 1998b. p. 213-225.

DELWAR, M.; FAHMY, M.; TAHA, R. Use of reclaimed asphalt pavement as na aggregate in Portland Cement concrete. **ACI Materials Journal**, v. 94, n. 3, p. 251-256, 1997.

DESAI, S. B. Sustainable development and recycling of concrete aggregate. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). **Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate**. London: Thomas Telford Pub., 1998b. p. 381-388.

DESSY, P.; BADALUCCO, C.; BIGNAMI, F. C.; at al. Analysis of performances of concrete components made with recycled aggregates. In: MATERIALS AND TECHNOLOGIES FOR SUSTAINABLE CONSTRUCTION – CIB WORLD BUILDING CONGRESS, 1998, Gävle, Sweden. **Proceedings...** Gävle: Kickan Fahlstedt, KTH, 1998. Symposium A., 2v. v. 1, p.149–156.

DEVENNY, A.; KHALAF, F.M. The use of crushed brick as coarse aggregate in concrete. **Mansory International**, v. 12, n. 3, p.81-84, 1999.

DHIR, R. K.; LIMBACHIYA, M. C.; LEELAWAT, T. Suitability of recycled concrete aggregate for use in BS 5328 designated mixes. **Journal of Institution of Civil Engineering, Structures and Buildings**, v.134, n. 08, p. 257-274, 1999.

DI NIRO, G.; DOLARA, E.; CAIRNS, R. Properties of hardened RAC for structural purposes. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). **Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate**. London: Thomas Telford Pub., 1998b. p. 177-187.

DILLMANN, R. Concrete with recycled concrete aggregate. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). **Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate**. London: Thomas Telford Pub., 1998b. p. 239-253.

DOLARA, E.; DI NIRO, G.; CARINS, R. RAC prestressed beams. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). **Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate**. London: Thomas Telford Pub., 1998b. p. 255-261.

DONAIRE, D. A internalização da gestão ambiental na empresa. **Revista de Administração**, v. 31, n. 01, p. 44-51, 1996.

DORSTHORST, B. J. H.; HENDRIKS, CH. F. Re-use of construction and demolition waste in the EU. In: CIB SYMPOSIUM IN CONSTRUCTION AND ENVIRONMENT: THEORY INTO PRACTICE, 2000, São Paulo, Brazil. **Proceedings...** [CD-ROM]. São Paulo: CIB, 2000. 9p.

DRAKE, B. Crush'n run: Preparation, flexibility and mobility are key to successful contract crushing. **Rock Products**, v. 103, n. 02, p. 26-28, 2000.

DUMET, T. B.; PINHEIRO, L. M. A evolução do concreto: uma viagem no tempo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 42., 2000, Fortaleza. **Anais...** [CD-ROM]. São Paulo: IBRACON, 2000. Artigo: III – D – 001, 16p.

FORMOSO, C. T.; FRANCHI, C.C.; SOIBELMAN, L. Um estudo sobre as perdas de materiais na construção civil e suas principais causas. In: ENCONTRO NACIONAL EM TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 6., 1993, São Paulo. **Avanços em tecnologia e gestão da produção de edificações**. São Paulo: POLI-USP, 1993. v.2, p.571-580

FORMOSO, C. T.; JOBIM, M. S. S.; COSTA, A. L.; ROSA, F. P. Perdas de materiais na construção civil: estudo em canteiros de obras no Estado do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO TECNOLOGIA E GESTÃO NA PRODUÇÃO DE EDIFÍCIOS, 1998, São Paulo. **Soluções para o terceiro milênio**. São Paulo: POLI-USP, 1998. 2v. v.1, p.299-307

FORSTER, S. W. Recycled concrete as aggregate. **Concrete International**, v. 8, n. 10, p. 34-40, 1986.

GALLIAS, J. L. Action of gypsum on recycled aggregate concrete. In: MATERIALS AND TECHNOLOGIES FOR SUSTAINABLE CONSTRUCTION – CIB WORLD BUILDING CONGRESS, 1998, Gävle, Sweden. **Proceedings...** Gävle: Kickan Fahlstedt, KTH, 1998. Symposium A. 2v., v.2., p.175–182.

GLAVIND, M.; HAUGAARD, M. Future aspects for the use of recycled concrete aggregate in Denmark. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). **Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate**. London: Thomas Telford Pub., 1998b. p. 401-407.

GOLDSTEIN, H. Not your father's concrete. **Civil Engineering**, v. 65, n. 5, p. 60-63, 1995.

GRIGOLI, A. S. Management in the production and utilization of the waste material in the construction site. In: CIB SYMPOSIUM IN CONSTRUCTION AND ENVIRONMENT: THEORY INTO PRACTICE, 2000, São Paulo, Brazil. **Proceedings...** [CD-ROM]. São Paulo: CIB, 2000. 11p.

GRÜBL, P.; RÜHL, M. German committee for reinforced concrete (DafStb) – code: concrete with recycled aggregate. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). **Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate**. London: Thomas Telford Pub., 1998b. p. 409-418.

HAMASSAKI, L. T.; SBRIGHI NETO, C.; FLORINDO, M. C. Uso de entulho como agregado para argamassas de alvenaria. In: WORKSHOP SOBRE RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO, 1996, São Paulo. **Anais...** São Paulo: EPUSP/ANTAC, 1997. 170 p. p.107–115.

HANSEN, T. C.; HEDEGARD, S. Properties of recycled aggregate concretes as affected by admixtures in original concretes. **ACI Materials Journal**, v. 81, n. 1, p. 21-26, 1984.

HANSEN, T. C.; NARUD, H. Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. **Concrete International**, v. 5, n. 1, p. 79-83, 1983.

HANSEN, T.C. **Recycled of demolished concrete and masonry**. London: Chapman & Hall, 1992. 316p. Part One: Recycled aggregates and recycled aggregate concrete, p. 1-160. (RILEM TC Report 6).

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: Pini; Brasília: SENAI, 1992. 349p.

HENDRIKS, C. F.; PIETERSEN, H. S. Concrete: durable, but also sustainable? In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). **Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate**. London: Thomas Telford Pub., 1998. p. 1-18.

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

JOHN, V. M. A construção e o meio ambiente. <http://www.recycle.pcc.usp.br/artigos1.htm>. 1998a.

JOHN, V. M. Desenvolvimento sustentável, construção civil, reciclagem e trabalho multidisciplinar. <http://www.recycle.pcc.usp.br/artigos1.htm>. 1998b.

JOHN, V. M. Panorama sobre a reciclagem de resíduos na construção civil. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2., 1999, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Comitê Técnico do IBRACON; TC 206 – Meio Ambiente, 1999. p.44-55.

JOHN, V. M. Pesquisa e desenvolvimento de mercado para resíduos. In: WORKSHOP SOBRE RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO, 1996, São Paulo. **Anais...** São Paulo: EPUSP/ANTAC, 1997. 170 p. p.21 – 30.

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

JUNGSMANN, A.; QUINDT, J. Allgig® - Technology for separation of building rubble. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). **Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate**. London: Thomas Telford Pub., 1998. p. 45-53.

KARLSSON, M. Reactivity in mortar phase in recycled concrete aggregate. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). **Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate**. London: Thomas Telford Pub., 1998b. p. 197-203.

KASAI, Y.; FUJII, T. Demolition and reuse of concrete and masonry. **Concrete International**, v.11, n. 3, p.24-28, 1989.

KIBERT, C. J.; SENDZIMIR, J.; GUY, G. B. Construction ecology and metabolism. In: CIB SYMPOSIUM IN CONSTRUCTION AND ENVIRONMENT: THEORY INTO PRACTICE, 2000, São Paulo, Brazil. **Proceedings...** [CD-ROM]. São Paulo: CIB, 2000. 8p.

KIHARA, Y.; SHUKUZAWA, J. K. Contribuição ao estudo de pozolanas no Brasil. **Cerâmica**, v. 28, n. 145, p. 15-24, 1982.

KIKUCHI, M.; MIURA, T.; DOSHO, Y; et al. Application of recycled aggregate concrete for structural concrete. Part 1 – Experimental study on the quality of recycled aggregate and recycled aggregate concrete. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). **Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate**. London: Thomas Telford Pub., 1998. p. 55-68.

KIKUCHI, M.; YASUNAGA, A.; EHARA, K. The total evaluation of recycled aggregate and recycled concrete. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM, 3., 1993, Odense, Denmark. **Proceedings ...** Great Britain: E & FN Spon, 1993. p.367-378.

KNIGHTS, J. Relative performance of high quality concrete containing recycled aggregates and their use in construction. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). **Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate**. London: Thomas Telford Pub., 1998b. p. 275-286.

KOHLER, G.; KURKOWSKI, H. Optimizing the use of RCA. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). **Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate**. London: Thomas Telford Pub., 1998. p. 69-82.

LATTERZA, L. M. **Concreto com agregado graúdo proveniente da reciclagem de resíduos de construção e demolição: um novo material para fabricação de painéis leves de vedação**. São Carlos, 1998. 116p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

LATTERZA, L. M.; MACHADO Jr., E. F. Aplicação do concreto de agregado reciclado ($D_{máx}=9,5$ mm) na fabricação de painéis leves de vedação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 41., 1999, Salvador. **Anais...** [CD-ROM]. São Paulo: IBRACON, 1999. Arquivo: 2-1-03, 14p.

LAURITZEN, .E K. The global challenge of recycled concrete. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). **Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate**. London: Thomas Telford Pub., 1998b. p. 505-519.

LEVY, S. M. **Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos**. São Paulo, 1997. 147 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo.

LEVY, S. M.; HELENE, P. R. L. Durability of concrete produced with mineral waste of civil construction industry. In: CIB SYMPOSIUM IN CONSTRUCTION AND ENVIRONMENT: THEORY INTO PRACTICE, 2000, São Paulo, Brazil. **Proceedings...** [CD-ROM]. São Paulo: CIB, 2000. 12p.

LIMA, G. L.; TAMAI, M. T. Programa de gestão diferenciada de resíduos inertes em Santo André: estação entulho. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL – GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS E CERTIFICAÇÃO AMBIENTAL, 2., 1998, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: PUCRS, 1998. p.413-418.

LIMA, J. A. R. Aggregate obtained from C&D waste recycling. Proposition of specification for use in concrete. In: CIB SYMPOSIUM IN CONSTRUCTION AND ENVIRONMENT: THEORY INTO PRACTICE, 2000, São Paulo, Brazil. **Proceedings...** [CD-ROM]. São Paulo: CIB, 2000. 6p.

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, 1999. 246p. Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

LIMA, J. A. R.; SILVA, L. F. e. Utilização e normalização de resíduo de construção reciclado no Brasil. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL – GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS E CERTIFICAÇÃO AMBIENTAL, 2., 1998, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: PUCRS, 1998. p.169-171.

LIMBACHIYA, M. C.; LEELAWAT, T.; DHIR, R. K. RCA concrete: A study of properties in the fresh state, strength development and durability. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). **Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate**. London: Thomas Telford Pub., 1998b. p. 227-237.

LOO, W. van. Closing the concrete loop – from reuse to recycling. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). **Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate**. London: Thomas Telford Pub., 1998. p. 83-97.

MACHADO Jr, E. F.; AGNESINI, M. V. C. Estudo comparativo das propriedades físicas e mecânicas de microconcretos leves produzidos com argila expandida e com agregados reciclados de rejeitos de construção e demolição. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 29., 2000, Punta del Este, Uruguai. **Memórias...** [CD-ROM]. Punta del Este: EDITOR, 2000, 12p.

MACHADO Jr, E. F.; LATTERZA, L. M.; MENDES, C. L. Influência do agregado reciclado de rejeitos de construção e demolição nas propriedades do concreto fresco e endurecido. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 29., 2000, Punta del Este, Uruguai. **Memórias...** [CD-ROM]. Punta del Este: EDITOR, 2000, 13p.

MACHADO Jr., E. F.; AGNESINI, M. V. C. Estudo comparativo das propriedades físicas e mecânicas de microconcretos leves produzidos com argila expandida e com agregados reciclados de rejeitos de construção e demolição. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 41., 1999, Salvador. **Anais...** [CD-ROM]. São Paulo: IBRACON, 1999. Arquivo: 2-1-13, 19p.

MACHADO Jr., E. F.; LATTERZA, L. M. Residuos de construccion y demolicion una fuente auxiliar de agregados gruesos para concretos estructurales de baja resistencia. In: SEMINARIO INTERNACIONAL SOBRE MEJORAMIENTO Y REORDENAMIENTO DE ASENTAMIENTOS URBANOS PRECARIOS, 1997, Caracas. **Anales...** Caracas: [s.n.], 1997. p.277-286.

MACHADO JR., E. F.; LATTERZA, L. M.; MENDES, C. L. Influência do agregado graúdo, proveniente da reciclagem de rejeitos de construção e demolição (entulho), na perda da abatimento do concreto fresco e nas propriedades mecânicas do concreto endurecido. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 40., 1998, Rio de Janeiro. **Anais...** [CD-ROM]. São Paulo: IBRACON, 1998. Arquivo: , 14p.

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. **Advances in concrete technology: pozzolanic and cementitious materials**. [S.l.]: Gordon and Breach Pub., 1995?. v.1. 191p.

MANSUR, M. A.; WEE, T. H.; CHERAN, L. S. Crushed bricks as coarse aggregate for concrete. **ACI Materials Journal**, v. 96, n. 04, p. 478-484, 1999.

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

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo:PINI, 1994. 573p.

MONTEIRO, P. J. M. **Caracterização da microestrutura do concreto: fases e interfaces; aspectos de durabilidade e de microfissuração**. São Paulo, 1993. 138 p. Tese (livre docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

MONTGOMERY, D. G. Workability and compressive strength properties of concrete containing recycled concrete aggregate. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). **Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate**. London: Thomas Telford Pub., 1998b. p. 287-296.

MORALES, G.; ANGULO, S. C.; CECILIATO, A. C. M. Produção de concreto de Cimento Portland utilizando entulho de obra reciclado. In: ENCONTRO NACIONAL EM TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8., 2000, Salvador. **Modernidade e Sustentabilidade**. Salvador: UFBA, UEFS, ENEB, UPE, UNIFOR, 2000. 2v. v.2, p.1131-1138.

MOREL, A.; GALLIAS, J. L.; BAUCHARD, M.; MANA, F.; ROSSEAU, E. Practical guidelines for the use of recycled aggregates in concrete in France and Spain. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM, 3., 1993, Odense, Denmark. **Proceedings ...** Great Britain: E & FN Spon, 1993. p.71-82.

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

NANNI, L. F.; RIBEIRO, J. L. **Planejamento e avaliação de experimentos**. 2.ed. Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1992. 194p. (Caderno Técnico, 17).

NEVILLE, A. M. **Properties of concrete**. 4.ed. London: Longman, 1995. 844p.

NEVILLE, A. M. The question of concrete durability: we can make good concrete today. **Concrete International**, v.22, n. 07, p. 21-26, 2000a.

NEVILLE, A. M. There is more to concrete than cement. **Concrete International**, v.22, n. 01, p. 73-74, 2000b.

O'BRIEN, K. Using RCA as part of an overall approach to sustainable construction. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). **Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate**. London: Thomas Telford Pub., 1998b. p. 459-470.

OGWUDA, O. I.; FORDYCE, D.; UNDERWOOD, J. Variation in particle size distribution from primary crushing of demolition waste. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). **Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate**. London: Thomas Telford Pub., 1998. p. 121-133.

ORTIZ, J. L. R., La múltiple identidad del hormigón. **Informes de la Construcción**, v.49, n. 454, p.77-83, 1998.

PENG, Chun-Li; SCORPIO, D. E.; KIBERT, C. J. Strategies for successful construction and demolition waste recycling operations. **Construction Management and Economics**, n.15, p.49-58, 1997.

PENTALLA, V. Concrete and sustainable development. **ACI Materials Journal**, v. 94, n. 5, p. 409-416, 1997.

PERA, J. State of the art report – use of waste materials in construction in Western Europe. In: WORKSHOP SOBRE RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO, 1996, São Paulo. **Anais...** São Paulo: EPUSP/ANTAC, 1997. 170 p. p.1-20.

PIETERSEN, H. S.; FRAAY, A. L. A. Performance of concrete with recycled aggregates. In: MATERIALS AND TECHNOLOGIES FOR SUSTAINABLE CONSTRUCTION – CIB WORLD

BUILDING CONGRESS, 1998, Gävle, Sweden. **Proceedings...** Gävle: Kickan Fahlstedt, KTH, 1998. Symposium A., p.425-434.

PIETERSEN, H. S.; FRAAY, A. L. A.; HENDRIKS, C. F. Application of recycled aggregates in concrete: experiences from the Netherlands. **Three-Day CANMET/ACI International Symposium on Sustainable Development of the Cement and Concrete Industry**. Ottawa, Canada, 1998. [S.l.: s.n.], p.131-146.

PINTO, T. P. De volta a questão do desperdício. **Construção**. São Paulo: PINI, n.2491, p.18-19, 1995.

PINTO, T. P. Desperdício em xeque. **Revestimentos**. São Paulo, p.37-38, dez. 1989/1990.

PINTO, T. P. Reciclagem de resíduos da construção urbana no Brasil. Situação atual. In *Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção Civil (Workshop)*, 1996, São Paulo. **Anais...** São Paulo, EPUSP/ANTAC, 1996, p.156-170.

PINTO, T. P. Recycling in construction sites: environmental responsibility and cost reduction. In: *CIB SYMPOSIUM IN CONSTRUCTION AND ENVIRONMENT: THEORY INTO PRACTICE*, 2000, São Paulo, Brazil. **Proceedings...** [CD-ROM]. São Paulo: CIB, 2000. 8p.

PINTO, T. P. Resultados da gestão diferenciada. **Téchne**, n. 31, p. 31-34, nov/dez. 1997.

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.

POON, C. S. Management and recycling demolition waste in Hong Kong. **Waste Management & Research**, n. 15, p. 561-572, 1997.

PRICE, W. H. Pozzolans: a review. **ACI journal**, v. 72, n. 05, p. 225-232, 1975.

QUEBAUD, M. Characterisation des granulats recycles etude de la composition et du comportement de betons incluant ces granulats. França, 1996. 247p. Tese (Doutorado) – Universidade d'Artois.

QUEBAUD, M. R.; BUYLE-BODIN, F. A reciclagem de materiais de demolição: utilização dos agregados reciclados no concreto. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO*, 5., 1999, São Paulo. **Anais...** [CD-ROM]. São Paulo: ABCP, 1999. Arquivo: 3-01, 14p.

QUEBAUD, M. R.; ZAHARIEVA, R.; WIRQUIN, E.; BUYLE-BODIN, F. Influência do teor em agregados proveniente da reciclagem de materiais de demolição (agregados reciclados) na permeabilidade do concreto. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO*, 41., 1999, Salvador. **Anais...** [CD-ROM]. São Paulo: IBRACON, 1999. Arquivo: 2-1-18, 16p.

QUEBAUD, M.; COURTIAL, M.; BUYLE-BODIN, F. The recycling of demolition materials: basic properties of concretes with recycled aggregates from demolished buildings. In: *R'97 – RECOVERY, RECYCLING, RE-INTEGRATION, INTERNATIONAL CONGRESS WITH EXHIBITION*, 3., 1997, Geneva, Switzerland. **Proceedings ...** Switzerland: [s.n.], 1997. 2v. v.2., p.11179 – 11186.

RAMACHANDRAN, V. S.; MALHOTRA, V. M.; JOLICOEUR, C. et al. **Superplasticizers: properties and applications in concrete**. Canada: CANMET, 1998. 403p.

RANVIDRARAJAH, R. S.; LOO BENG, Y. H.; TAM, C. T. Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 39, n. 141, p. 214-220, 1987.

RASHWAN, M. S.; ABOURIZK, S. The properties of recycled aggregate concrete. **Concrete International**, v.19, n.7, p.56-60, 1997.

ROOS, F. Verification of the dimensioning values for concrete with recycled concrete aggregate. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFRASTRUCTURE REGENERATION AND REHABILITATION, 1999, Sheffield, UK. **Proceedings...** Sheffield: EDITOR, 1999, p. 243-252.

SAGOE-CRENTSIL, K.; BROWN, T. Performance requirements of building products derived from construction and demolition waste. In: MATERIALS AND TECHNOLOGIES FOR SUSTAINABLE CONSTRUCTION – CIB WORLD BUILDING CONGRESS, 1998, Gävle, Sweden. **Proceedings...** Gävle: Kickan Fahlstedt, KTH, 1998. Symposium A., 2v. v. 1, p.451–457

SAGOE-CRENTSIL, K.; TAYLOR, A.; BROWN, T. Properties of concrete incorporating fly ash and recycled demolition waste. In: MATERIALS AND TECHNOLOGIES FOR SUSTAINABLE CONSTRUCTION – CIB WORLD BUILDING CONGRESS, 1998, Gävle, Sweden. **Proceedings...** Gävle: Kickan Fahlstedt, KTH, 1998. Symposium A., 2v. v. 1, p.443–449

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

SCHULZ, R. R. The processing of building rubble as concrete aggregate in Germany. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM, 3., 1993, Odense, Denmark. **Proceedings ...** Great Britain: E & FN Spon, 1994. p.105-116.

SCHULZ, R. R.; HENDRICKS, Ch. F. Recycling of masonry rubble. In: HANSEN, T. C. **Recycling of demolished concrete and masonry**. London: Chapman & Hall, 1992. Part Two, p.161-255. (RILEM TC Report 6).

SCIOTTI, M.; DOLARA, E.; DI NIRO, G.; et al. Bonding surface between recycled aggregate and new cement paste. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). **Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate**. London: Thomas Telford Pub., 1998. p. 135-142.

SIMONS, B. P.; HENDERIECKX, F. Guidelines for demolition with respect to the reuse of building materials: guidelines and experiences in Belgium. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM, 3., 1993, Odense, Denmark. **Proceedings ...** Great Britain: E & FN Spon, 1994. p.25 – 34.

SIMPSON, D. Recycled aggregates in concrete – a realist's perspective. **Concrete**, v.33, n.06, p.17, 1999.

SJÖSTRÖM, C. Durability and sustainable use of building materials. 8p., 1997? (Texto digitado).

SJÖSTRÖM, C. Durability of building materials and components. In: CIB SYMPOSIUM IN CONSTRUCTION AND ENVIRONMENT: THEORY INTO PRACTICE, 2000, São Paulo, Brazil. **Proceedings...** [CD-ROM]. São Paulo: CIB, 2000. 9p.

SOIBELMAN, L. **As perdas de materiais na construção de edificações sua incidência e seu controle**. Porto Alegre, 1993. 127p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SUÁREZ, C. J.; MALAVÉ, R. E. Proposal for the commercialization of recycled construction waste in Barquisimeto City, Venezuela. In: CIB SYMPOSIUM IN CONSTRUCTION AND ENVIRONMENT: THEORY INTO PRACTICE, 2000, São Paulo, Brazil. **Proceedings...** [CD-ROM]. São Paulo: CIB, 2000. 9p.

TAVAKOLI, M.; SOROUSHIAN, P. Drying shrinkage behavior of recycled aggregate concrete. **Concrete International** v. 18, n. 11, p. 58-61, 1996a.

TAVAKOLI, M.; SOROUSHIAN, P. Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate. **ACI Materials Journal**, v. 93, n. 2, p. 182-190, 1996b.

TOBORI, N.; HOSODA, T. E. KASAMI, H. Properties of superplasticized concrete containing recycled fine aggregate. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 2, 1999, Gramado. **Supplementary Papers...** [CD-ROM]. Porto Alegre: UFRGS, 1999. Arquivo: SP37, 18p.

TOPÇU, I. B.; GÜNÇAN, N. F. Using waste concrete as aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 7, p. 1385-1390, 1995.

TORRES, E. McM. **A necessidade de redução da geração de resíduos nos processos de fabricação.** ConsultE: Consultores Associados. 1995 (Texto digitado).

TORRING, M. Management of construction and demolition waste streams. In: MATERIALS AND TECHNOLOGIES FOR SUSTAINABLE CONSTRUCTION – CIB WORLD BUILDING CONGRESS, 1998, Gävle, Sweden. **Proceedings...** Gävle: Kickan Fahlstedt, KTH, 1998. Symposium C., p.1911–1918.

TURLEY, W. Concrete crushing: Creole style. **Rock Products**, v. 101, n. 08, p. 44-46, 1998b.

TURLEY, W. Portable support: An edge for recycling arm. **Rock Products**, v. 101, n. 08, p. 36-38, 1998a.

VAN ACKER, A. Recycling of concrete at a precast concrete plant. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). **Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate.** London: Thomas Telford Pub., 1998b. p. 321-332.

VAN DER WEGEN, G.; HEVERKORT, R. Recycled construction and demolition wastes as a fine aggregate for concrete. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). **Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate.** London: Thomas Telford Pub., 1998b. p. 333-345.

VÁSQUEZ, E.; BARRA, M. Recycling of aggregates in the construction industry. In: CIB SYMPOSIUM IN CONSTRUCTION AND ENVIRONMENT: THEORY INTO PRACTICE, 2000, São Paulo, Brazil. **Proceedings...** [CD-ROM]. São Paulo: CIB, 2000. 8p.

VAZ FILHO, P.; CORDEIRO, J.S. Construction solid waste and urban drainage: a problem to be solve. In: CIB SYMPOSIUM IN CONSTRUCTION AND ENVIRONMENT: THEORY INTO PRACTICE, 2000, São Paulo, Brazil. **Proceedings...** [CD-ROM]. São Paulo: CIB, 2000. 12p.

VIEIRA, A. M.; QUADROS, B.; LEÃO, I.; et al. Gestão diferenciada do entulho na cidade de Salvador. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL – GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS E CERTIFICAÇÃO AMBIENTAL, 2., 1998, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: PUCRS, 1998. p.478-481

VYNCKE, J.; ROUSSEAU, E. Recycling of construction and demolition waste in Belgium: actual situation and future evolution. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM, 3., 1993, Odense, Denmark. **Proceedings ...** Great Britain: E & FN Spon, 1994. p.57 – 70.

WAINWRIGHT, P. J.; TREVORROW, A.; YU, Y.; WANG, Y. Modifying the performance of coarse and fine recycled concrete aggregates. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM, 3., 1993, Odense, Denmark. **Proceedings ...** Great Britain: E & FN Spon, 1993. p.319 – 330.

WALLEVIK, O. H.; SAASEN, A.; GJORV, O. E. Effect of filler materials on the rheological properties of fresh concrete. **ACI Materials Journal**, v. 92, n. 5, p.524-528, 1995.

WINKLER, A.; MÜELLER, H. A. Recycling of fine processed building rubble materials. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). **Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate**. London: Thomas Telford Pub., 1998. p. 157-168.

ZORDAN, S. E. Entulho da indústria da construção civil. <http://www.recycle.pcc.usp.br/fichatécnica.htm>. 2000 (acessado em maio de 2000).

ZORDAN, S. E.; PAULON, V. A.; JOHN, V. M. Concreto confeccionado com entulho reciclado: avaliação do desempenho em função do consumo de cimento. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 2, 1999, Gramado. **Supplementary Papers...** [CD-ROM]. Porto Alegre: UFRGS, 1999. Arquivo: SP157, 13p.

ZORDAN, S. E. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto**. Campinas, 1997. 140 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil - FEC, Universidade Estadual de Campinas.

ANEXOS

ANEXO 1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

Tabela 66 Resultados da massa específica dos concretos com agregados reciclados

				Massa específica (kg/dm ³)					
Traço nº	%AGR	%AMR	a/c	1º Repetição		2º Repetição		3º Repetição	
13	50	50	0,40	2,369	-	2,359	2,361	2,381	-
16	0	0		2,589	-	2,582	2,580	2,576	-
1	11,5	11,5	0,45	2,514	2,515	2,519	2,514	2,499	-
3	11,5	88,5		2,435	2,499	2,451	-	2,433	-
5	88,5	11,5		2,262	2,263	2,214	-	2,243	-
7	88,5	88,5		2,221	2,213	2,222	-	2,223	-
17	0	0		2,561	-	2,565	2,557	2,561	-
9	0	50	0,60	2,490	2,491	2,493	-	2,471	-
10	100	50		2,168	2,165	2,169	-	2,173	-
11	50	0		2,362	2,357	2,341	2,344	2,358	-
12	50	100		2,296	2,288	2,26	2,303	2,289	-
15	50	50		2,275	-	2,289	2,317	2,311	-
18	0	0		2,545	-	2,517	2,510	2,535	-
2	11,5	11,5	0,75	2,455	2,457	2,439	2,437	2,427	-
4	11,5	88,5		2,405	2,379	2,471	-	2,388	-
6	88,5	11,5		2,197	2,182	2,183	-	2,158	-
8	88,5	88,5		2,147	-	2,139	-	2,179	-
19	0	0		2,498	-	2,482	2,493	2,486	-
14	50	50	0,80	2,290	2,268	2,271	2,303	2,302	-
20	0	0		2,519	-	2,511	2,506	2,481	-

Tabela 67 Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial – 3 e 7 dias

Resistência à compressão axial (MPa)															
Idade				3 dias						7 dias					
Traço nº	%AGR	%AMR	a/c	1º rep		2º rep		3º rep		1º rep		2º rep		3º rep	
13	50	50	0,40	27,8	27,8	25,5	28,2	30,8	32,0	31,6	33,1	30,8	33,1	27,8	28,9
16	0	0		28,5	28,2	26,3	26,3	31,6	33,1	34,6	30,1	35,4	35,4	36,2	37,7
1	11,5	11,5	0,45	15,6	22,5	24,7	23,2	27,0	24,0	20,2	29,7	30,1	30,1	29,7	28,5
3	11,5	88,5		23,2	25,5	24,0	24,0	26,3	25,5	30,8	30,1	33,1	30,8	32,4	32,4
5	88,5	11,5		22,5	23,2	21,7	21,3	25,1	25,1	27,8	25,1	23,6	24,0	27,0	23,6
7	88,5	88,5		20,9	22,5	22,1	24,4	22,5	23,2	24,7	21,7	25,9	27,4	27,8	28,5
17	0	0		24,0	23,2	20,9	20,9	26,3	26,3	30,1	27,8	26,3	27,0	29,3	29,3
9	0	50	0,60	13,3	14,1	14,1	13,3	15,6	14,8	16,8	17,1	17,9	17,1	19,4	17,9
10	100	50		14,8	14,1	15,6	15,6	16,8	19,0	18,7	17,5	19,8	19,4	16,0	19,8
11	50	0		12,6	14,1	14,1	14,1	15,6	17,1	17,1	17,9	17,9	17,9	19,4	20,9
12	50	100		14,8	14,8	16,4	15,6	16,4	16,4	18,3	18,7	17,5	20,9	20,2	20,9
15	50	50		15,6	14,1	15,6	14,8	16,0	19,0	22,5	19,4	19,8	19,8	20,2	19,0
18	0	0		14,1	14,8	11,8	11,8	14,8	18,7	16,4	17,1	16,4	14,8	19,4	18,7
2	11,5	11,5	0,75	9,5	8,8	9,5	8,0	9,1	8,8	13,3	12,6	12,9	11,4	12,6	11,8
4	11,5	88,5		14,8	10,3	32,4	32,0	9,1	10,7	19,0	12,6	37,7	36,5	12,9	12,9
6	88,5	11,5		10,3	13,3	10,7	11,4	12,2	12,9	13,3	12,9	14,8	13,3	14,1	12,9
8	88,5	88,5		11,0	10,3	11,8	11,8	10,7	12,2	14,8	14,8	14,8	15,6	15,6	14,8
19	0	0		9,5	8,8	8,0	8,8	10,3	9,5	10,7	11,8	10,3	11,0	12,6	14,8
14	50	50	0,80	8,8	9,5	8,8	10,3	10,3	10,3	12,6	12,6	10,7	9,9	14,1	13,3
20	0	0		8,8	8,8	7,2	7,6	6,5	6,5	10,7	11,8	9,5	8,8	8,8	8,0

Tabela 68 Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial – 28 e 91 dias

			Resistência à compressão axial (MPa)												
			Idade	28 dias						91 dias					
Traço nº	%AGR	%AMR	a/c	1º rep		2º rep		3º rep		1º rep		2º rep		3º rep	
13	50	50	0,40	40,3	36,2	35,4	36,2	33,9	42,2	40,7	40,3	40,7	40,3	37,7	42,2
16	0	0		44,2	41,9	42,6	43,4	47,3	41,1	45,7	45,7	45,7	46,9	48,8	47,7
1	11,5	11,5	0,45	27,3	34,6	36,9	39,9	34,6	40,3	30,8	43,4	43,8	40,3	43,8	41,5
3	11,5	88,5		36,9	39,5	34,5	36,2	39,9	36,9	44,2	40,3	36,5	43,4	43,8	41,9
5	88,5	11,5		30,8	32,4	27,8	28,5	33,9	32,4	32,4	33,9	27,8	27,8	33,5	35,0
7	88,5	88,5		29,3	29,3	29,3	30,1	32,4	28,5	29,3	-	32,4	36,2	35,0	35,0
17	0	0		39,5	36,5	35,4	36,2	35,4	39,5	40,7	39,9	41,1	41,9	40,7	46,1
9	0	50	0,60	21,7	24,0	23,2	24,0	27,0	27,4	31,6	29,3	25,5	25,5	32,7	32,0
10	100	50		23,2	23,2	24,7	23,2	23,2	25,5	27,0	25,9	25,5	27,8	28,5	28,9
11	50	0		21,7	24,0	24,7	21,7	24,7	26,3	27,0	29,3	26,3	27,4	25,9	27,4
12	50	100		26,3	26,3	24,0	25,5	27,0	27,8	30,1	31,6	28,5	30,8	32,0	30,5
15	50	50		26,3	27,7	23,2	25,5	27	26,3	31,6	30,8	26,3	28,5	31,2	31,2
18	0	0		23,2	21,7	22,5	20,9	24,7	18,7	26,3	28,7	24,7	25,5	27,8	17,5
2	11,5	11,5	0,75	17,1	15,6	16,4	15,6	16,0	15,6	19,4	18,7	18,7	19,0	19,8	17,5
4	11,5	88,5		26,3	17,9	43,4	43,4	17,1	17,1	30,1	22,5	48,8	48,1	20,6	21,3
6	88,5	11,5		17,1	19,4	17,9	17,9	18,7	19,4	20,2	20,0	20,9	19,4	22,1	21,3
8	88,5	88,5		20,9	21,7	20,9	21,9	20,9	19,4	22,5	23,2	22,5	23,9	22,8	23,6
19	0	0		14,8	14,8	14,1	13,3	14,8	14,8	18,7	18,7	17,1	17,9	18,3	17,5
14	50	50	0,80	17,1	17,1	14,8	13,3	17,9	16,4	20,2	20,2	17,9	16,4	21,3	21,3
20	0	0		15,6	16,4	14,1	13,3	11,8	11,8	19,6	24,3	14,8	16,4	14,5	13,7

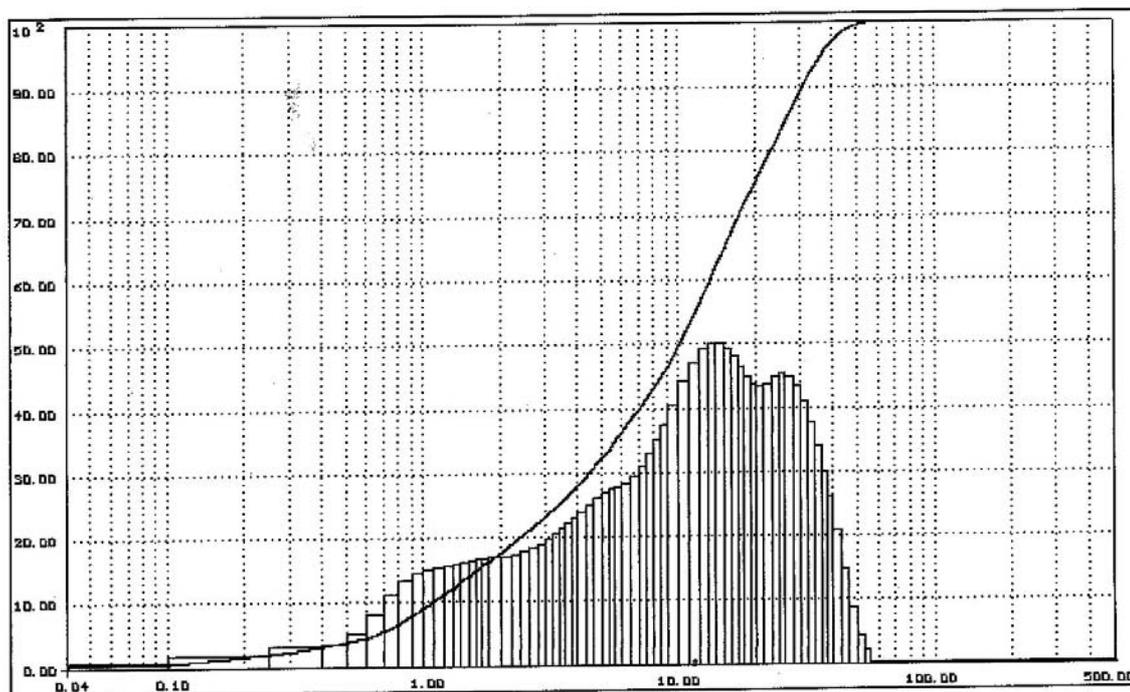
Tabela 69 Resultados dos ensaios de resistência à tração

Traço nº	%AGR	%AMR	a/c	Tração por compressão diametral (MPa)						Tração na flexão (MPa)		
				1º rep	2º rep	3º rep	1º rep	2º rep	3º rep			
13	50	50	0,40	2,1	3,3	4,2	5,0	4,0	4,6	5,2	5,6	3,3
16	0	0		5,0	3,8	3,6	4,0	4,4	4,8	10,4	5,4	4,4
1	11,5	11,5	0,45	3,2	3,4	4,2	3,8	3,7	4,7	8,9	5,4	6,0
3	11,5	88,5		4,0	4,2	4,0	4,2	3,9	4,0	13,6	5,3	6,0
5	88,5	11,5		4,2	3,6	3,4	3,2	4,0	3,8	8,1	4,5	2,8
7	88,5	88,5		3,6	2,8	3,0	4,0	3,4	3,5	8,0	3,9	4,1
17	0	0		4,8	4,8	3,9	3,1	4,6	4,8	10,6	4,5	5,2
9	0	50	0,60	2,7	3,2	3,4	4,4	2,9	2,9	8,1	4,2	5,6
10	100	50		2,7	2,7	2,8	3,2	3,2	2,8	7,8	3,9	2,8
11	50	0		3,4	3,2	2,6	2,4	3,4	3,0	5,5	4,2	3,5
12	50	100		3,6	3,6	3,4	3,0	3,5	2,7	7,7	4,8	5,2
15	50	50		4,1	2,7	3	3,2	2,7	3,5	9,3	4,4	3,3
18	0	0		3,8	4,2	3,5	2,7	3,4	3,2	9,0	4,0	3,7
2	11,5	11,5	0,75	2,2	2,6	2,2	2,2	2,3	2,7	4,4	3,6	2,7
4	11,5	88,5		3,1	3,1	4,8	4,6	2,5	2,5	5,2	4,6	3,0
6	88,5	11,5		2,3	1,9	2,5	2,7	2,2	2,4	8,0	4,7	2,4
8	88,5	88,5		3,1	2,9	3,0	2,4	2,1	3,0	7,8	4,4	3,0
19	0	0		2,4	2,2	2,1	2,3	2,2	2,6	8,7	3,1	3,3
14	50	50	0,80	2,2	2,4	1,9	2,2	2,4	2,5	4,3	3,5	3,0
20	0	0		3,1	2,9	2,3	1,9	1,8	1,7	5,2	2,8	2,5

Tabela 70 Resultados dos ensaios de módulo de deformação

Módulo de deformação (GPa)												
Traço nº	%AGR	%AMR	a/c	Extensômetro mecânico			LVDT			Extensômetro elétrico		
				1º Rep.	2º Rep.	3º Rep.	1º Rep.	2º Rep.	3º Rep.	1º Rep.	2º Rep.	3º Rep.
13	50	50	0,40	21,4	16,2	25,2	24,8	16,5	20,8	23,5	26,4	25,7
16	0	0		28,1	17,2	39,7	30,2	25,7	29,2	29,5	30,0	32,6
1	11,5	11,5	0,45	30,5	24,7	19,7	20,4	23,6	21,1	22,0	26,1	21,3
3	11,5	88,5		19,4	18,7	16,3	20,6	19,6	16,7	26,2	22,0	17,8
5	88,5	11,5		13,4	17,0	23,0	18,5	15,7	17,4	18,5	23,7	17,8
7	88,5	88,5		21,2	12,3	23,5	13,2	12,2	12,2	12,8	15,8	21,3
17	0	0		26,1	25,1	19,6	30,4	25,3	33,7	33,4	33,1	27,7
9	0	50	0,60	21,6	22,1	19,8	19,7	27,1	18,0	21,3	21,7	23,7
10	100	50		29,6	13,7	11,9	12,5	9,0	9,5	18,0	17,7	13,5
11	50	0		23,1	16,3	21,5	17,7	15,7	15,9	16,7	19,1	17,7
12	50	100		15,3	11,1	12,9	14,0	13,9	13,9	16,9	17,4	17,5
15	50	50		12,2	6,8	23,9	20	25,8	12,5	18,3	17,3	12,2
18	0	0		14,3	11,3	9,8	26,3	22,3	13,9	26,8	18,3	13,1
2	11,5	11,5	0,75	32,9	26,7	21,0	58,5	13,3	11,9	19,4	15,3	11,2
4	11,5	88,5		62,7	21,0	11,1	24,7	25,1	12,3	19,3	25,7	13,3
6	88,5	11,5		14,7	10,8	14,6	10,8	9,4	12,2	12,8	13,1	13,1
8	88,5	88,5		9,7	12,9	12,7	10,5	10,0	10,1	10,9	13,0	10,3
19	0	0		7,5	6,6	9,7	14,6	13,1	9,7	9,3	17,3	14,6
14	50	50	0,80	8,4	5,5	38,8	10	8,7	12,7	15,5	12,7	16,8
20	0	0		7,3	10,7	10,3	24,3	14,4	7,2	19,6	18,7	6,9

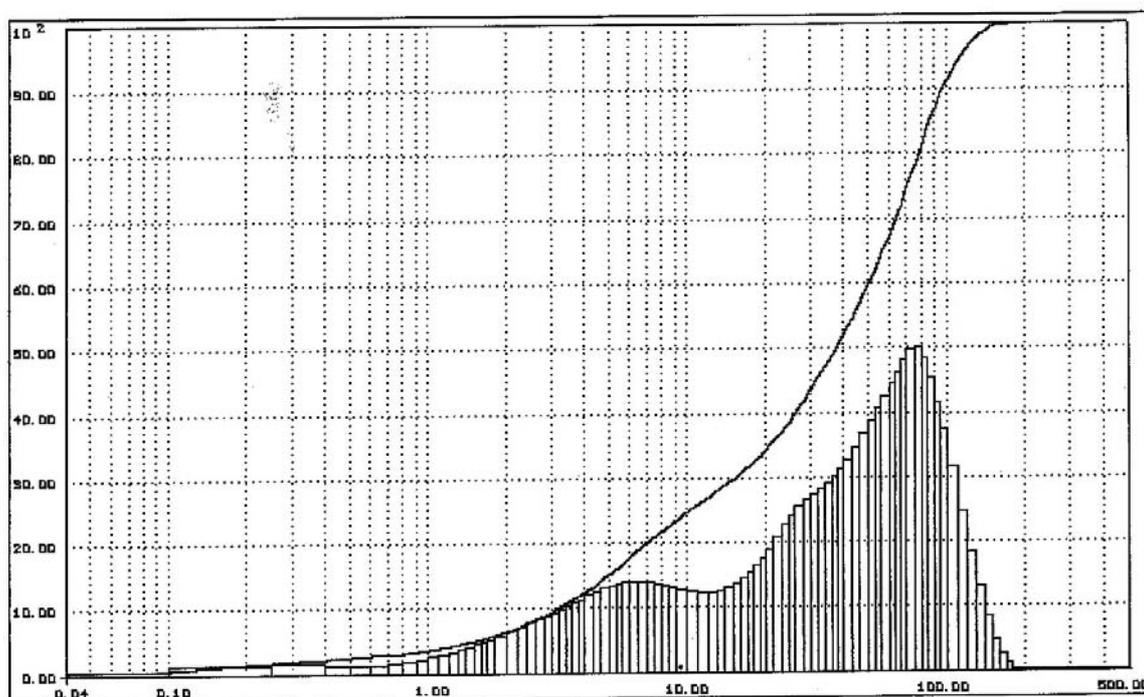
Granulometer 1064 number 169
Version V 3.30
File name : D:\CILAS\SYDNEY\TEMP\CIMCPI32.MES
08/21/2000 14:20:30




CILAS 1064 N.169
COMPAGNIE INDUSTRIELLE DES LASERS

Figura 64 Curva da composição granulométrica do cimento Portland CP I S 32

Granulometer 1064 number 169
Version V 3.30
File name : D:\CILAS\SYDNEY\TEMP\MATCER1.MES
08/21/2000 13:32:32



CILAS 1064 N.169

COMPAGNIE INDUSTRIELLE DES LASERS

Figura 65 Curva da composição granulométrica do material cerâmico passante na peneira # 0,15 mm – Amostra 01

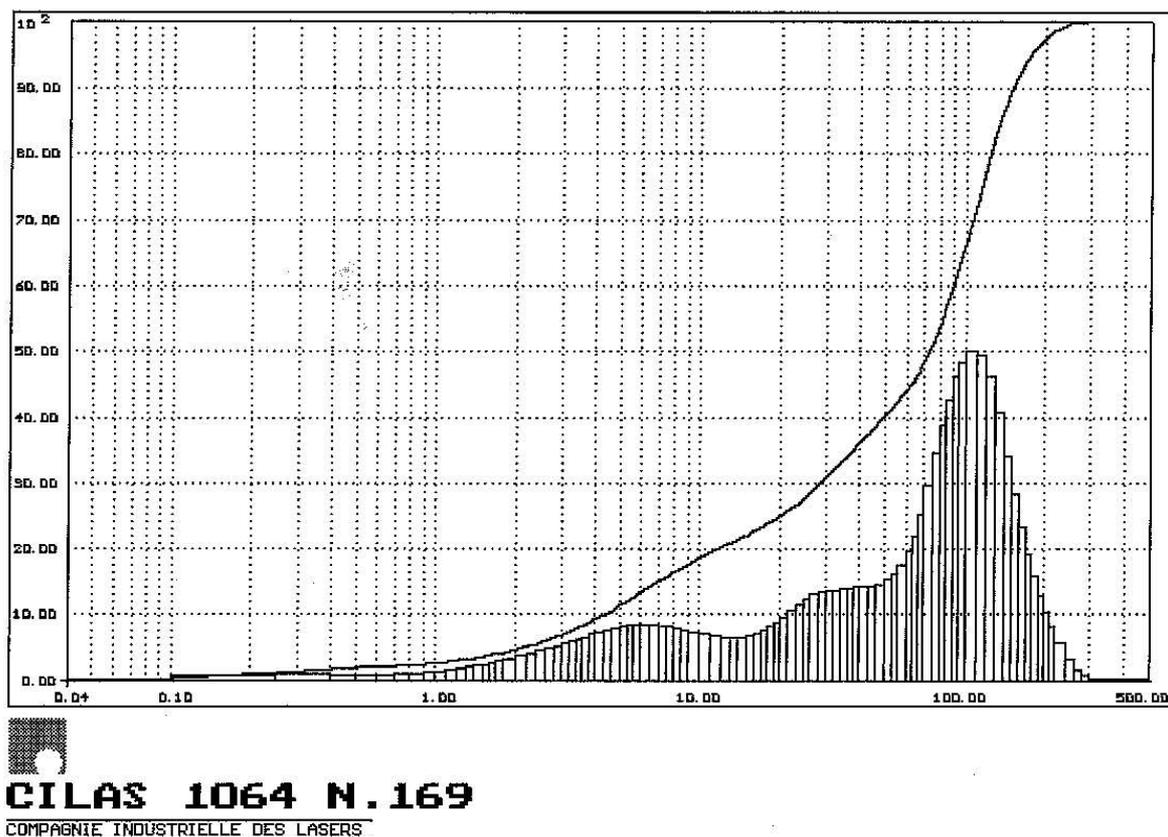


Figura 66 Curva da composição granulométrica do material cerâmico passante na peneira # 0,15 mm – Amostra 02

ANEXO 3 PROPOSTA DE NORMA PARA O ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DE AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

1. OBJETIVO

Esta proposta tem como objetivo determinar a massa específica do agregado graúdo reciclado de resíduos de construção e demolição, visando sua aplicação no estudo da dosagem e produção de concretos.

2. APARELHAGEM

2.1. Balança

A balança utilizada deve ter resolução mínima de 0,1 g e capacidade compatível com a massa a determinar.

2.2. Bomba de vácuo

A bomba de vácuo utilizada, com registros, vacuômetro e conexões, deve ser capaz de aplicar um vácuo de 88 kPa (66 cm de Hg a 0°C), para remoção do ar presente nas partículas de agregado reciclado.

2.3. Recipientes para amostra

Deve ser utilizado um picnômetro ou balão volumétrico de vidro, com capacidade mínima de 1000 ml, cujo gargalo possua um diâmetro de no mínimo a dimensão máxima do agregado, determinada de acordo com a NBR 7217 (1987), mais folga de 5 mm ($D_{\text{máx}} \pm 5 \text{ mm}$).

O recipiente deve possuir um dispositivo capaz de ajustar conexão com uma bomba de vácuo para retirada do ar da amostra.

NOTA: Em virtude das dimensões do gargalo do recipiente para amostra não é recomendável o uso de agregados de grandes dimensões máximas. Uma alternativa é reduzir a amostra a tamanhos compatíveis com o recipiente disponível.

2.4. Placa de vidro

Deve ser utilizada uma placa de vidro de seção quadrada, com aresta superior a 2 vezes o diâmetro da abertura do recipiente para a amostra, e espessura de 5 mm, no mínimo.

3. PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

3.1. A amostra de agregado graúdo deve ser coletada de acordo com a NBR 7216 (1982) e reduzida conforme a NBR 9941 (1987).

3.2. Todo material passante na peneira # 4,8 mm deve ser desprezado, através de peneiramento a seco, seguido de lavagem cuidadosa dos grãos, em água corrente, para retirada do material pulverulento aderido.

4. EXECUÇÃO DO ENSAIO

4.1. Secar a amostra por 24 horas, à temperatura de (105 – 110) °C.

4.2. Deixar a amostra resfriar ao ar à temperatura ambiente. Pesar uma quantidade de material da amostra seca e fria entre 800 e 1000 g. Determinar a massa da amostra seca em estufa (C).

4.3. Adicionar água à temperatura ambiente ao recipiente de vidro em quantidade suficiente para que a amostra de agregado possa ficar submersa, porém sem preenchê-lo completamente.

4.4. Adicionar cuidadosamente a amostra de agregado graúdo reciclado no recipiente de vidro contendo água e deixar o conjunto tampado em repouso durante 24 horas.

4.5. Antes de realizar a primeira pesagem do conjunto, deve ser aplicado vácuo, durante pelo menos 15 minutos, agitando cuidadosamente o recipiente em intervalos regulares, permitindo a saída do ar aprisionado entre os grãos do agregado.

4.6. Acrescentar ao recipiente, água em temperatura ambiente, até preenchê-lo completamente.

4.7. Colocar a placa de vidro sobre o recipiente que contém a amostra+água, de modo que não haja nenhuma bolha de ar aprisionada.

- 4.8. Secar externamente o recipiente, com cuidado para não incorporar ar ao conjunto.
- 4.9. Determinar a massa do conjunto amostra+recipiente+água+placa de vidro (A).
- 4.10. Retirar a amostra do recipiente, lavá-lo e em seguida preenchê-lo com água. Colocar a placa de vidro sobre o recipiente de forma que nenhuma bolha de ar fique aprisionada no conjunto. Determinar a massa do conjunto recipiente+água+placa de vidro (B). É importante secar externamente o conjunto.

5. RESULTADOS

- 5.1. A massa específica do agregado graúdo é calculada através da expressão:

$$\gamma = \frac{C}{B - A + C}$$

Onde:

γ = massa específica do agregado graúdo, expressa em kg/dm³ ou g/cm³;

A = massa da amostra+recipiente+água+placa de vidro, expressa em g,

B = massa do recipiente+água+placa de vidro, expressa em g,

C = massa da amostra seca em estufa, expressa em g,

- 5.2. Devem ser realizadas, no mínimo, duas determinações consecutivas com amostras do mesmo agregado.
- 5.3. O resultado é a média entre os resultados de cada determinação e deve ser expresso com dois algarismos significativos.

ANEXO 4 PROPOSTA DE NORMA PARA O ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

1. OBJETIVO

Esta proposta 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 pré-determinados apresentados na Tabela 74.

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

Tabela 74 Intervalos para leituras do ensaio de absorção do agregado reciclado

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		
	1min		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		