

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**VERIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CONTROLE DE
AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO PARA UTILIZAÇÃO EM
CONCRETO**

Patrícia Silveira Lovato

Porto Alegre
Maio 2007

PATRÍCIA SILVEIRA LOVATO

**VERIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CONTROLE DE
AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO PARA UTILIZAÇÃO EM
CONCRETO**

Dissertação 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 Mestre em
Engenharia na modalidade Acadêmico

Porto Alegre

Maio 2007

L896v

Lovato, Patrícia Silveira

Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto / Patrícia Silveira Lovato. – 2007.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2007.

Orientação: Prof^a. Dra. Ângela Borges Masuero e
Prof^a. Dra. Denise Carpena Coitinho Dal Molin

1. Indústria da construção – Resíduos. 2. Materiais de construção – Agregados. 3. Concreto. I. Masuero, Ângela Borges, orient. II. Dal Molin, Denise Carpena Coitinho, orient. III. Título.

CDU-691.322(043)

PATRÍCIA SILVEIRA LOVATO

**VERIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CONTROLE DE
AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO PARA UTILIZAÇÃO EM
CONCRETO**

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

Porto Alegre, 11 de maio de 2007

Prof.^a Angela Borges Masuero
Dr.^a pela Universidade Federal do Rio Grande
do Sul
Orientadora

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

Prof. Fernando Schnaid
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Antonio Domingues de Figueiredo (USP)
Dr. pela Universidade de São Paulo

Prof. Claudio de Souza Kazmierczak (UNISINOS)
Dr. pela Universidade de São Paulo

Prof.^a Fernanda Macedo Pereira (ULBRA/CIENTEC)
Dr.^a pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

*Dedico este trabalho aos meus
queridos pais, Antônio e Elizabeth*

AGRADECIMENTOS

Desejo expressar os meus agradecimentos a todos aqueles que, de alguma forma, auxiliaram na realização desta dissertação:

Aos meus pais, Antônio e Elizabeth, por tudo que fizeram e fazem por mim até hoje, pelo apoio e carinho, muito obrigada. Ao meu irmão Rodrigo, pelo carinho e torcida em todos os momentos. Ao meu namorado Junior, pelo companheirismo, apoio, carinho e compreensão.

Às professoras Angela Masuero e Denise Dal Molin, pela orientação, pelo conhecimento transmitido e pela amizade.

Aos demais professores do NORIE, pelos conhecimentos transmitidos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

À Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), pelo financiamento do projeto que deu origem a esta pesquisa e aos professores Claudio Kazmierczak, Marlova Kulakowski e Fernanda Pereira, que participaram deste projeto.

Aos amigos do NORIE, em especial aos colegas do grupo de materiais, pelo companheirismo e amizade. À Edna, pela disponibilidade em ajudar nas análises estatísticas, muito obrigada. Aos bolsistas de iniciação científica, Rafael e Samuel, pelo auxílio e dedicação. Obrigada por tudo.

Ao Éder e ao Airton, pela amizade e pela ajuda prestada no laboratório. Ao Fontes e ao Teixeira, do Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME), e aos funcionários do NORIE, Simone e Luiz Carlos, pela disponibilidade em ajudar no que fosse possível.

Ao professor Carlos Hoffmann Sampaio, por permitir a utilização dos materiais e equipamentos do Laboratório de Processamento Mineral (LAPROM), e aos demais professores e bolsistas de iniciação científica que auxiliaram na realização do ensaio de separação por densidades.

Ao professor José Luis Duarte Ribeiro, pela contribuição na análise estatística deste trabalho.

Ao Sérgio Cirelli Angulo, pelo auxílio via e-mail, esclarecendo sobre o ensaio de separação por densidades.

A todas as pessoas que não foram citadas aqui, mas que de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho. Muito obrigada!

RESUMO

LOVATO, P. S. **Verificação dos Parâmetros de Controle de Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição para Utilização em Concreto**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2007.

A construção civil consome grande quantidade de recursos naturais, energia e gera 50% do total de resíduos produzidos no mundo. A reciclagem dos resíduos de construção e demolição é uma prática de grande importância para o ambiente, uma vez que ela constitui uma alternativa para reduzir o impacto ambiental causado pelo setor. Nos diversos estudos já desenvolvidos quanto à utilização dos resíduos de construção e demolição em concreto não se observa um consenso com relação ao desempenho destes concretos. Uma das causas dessa diversidade de resultados é a grande variabilidade na composição dos agregados reciclados. Controlando a variabilidade se tornará mais fácil garantir que os concretos produzidos com esses agregados tenham bom desempenho e durabilidade. Assim, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de determinar um parâmetro de controle da variabilidade dos agregados reciclados, comparando a classificação pela composição e pela separação densitária, para utilização em dosagens de concretos. Foram realizadas caracterizações dos agregados reciclados obtidos a partir do beneficiamento de resíduos de construção e demolição coletados em três locais diferentes. Para produção dos concretos foram consideradas três relações a/c (0,50; 0,60 e 0,70) e três níveis de substituição tanto do agregado miúdo reciclado, quanto do agregado graúdo reciclado (0%, 50%, 100%), sendo que as combinações executadas foram definidas através de um projeto estatístico. As propriedades avaliadas foram resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de deformação e absorção de água por imersão. A partir dos resultados obtidos foram elaborados modelos matemáticos para cada uma das propriedades avaliadas, e foram estabelecidas as relações entre os resultados de cada coleta e as características dos agregados reciclados de cada uma delas. Concluiu-se que o comportamento do concreto com agregados reciclados não pode ser previsto através da composição ou da densidade dos agregados, uma vez que ambos os aspectos e também outras características dos agregados influenciam na qualidade dos concretos, dependendo da propriedade considerada.

Palavras-chave: resíduos de construção e demolição; agregados reciclados; variabilidade; parâmetros de controle; concreto.

ABSTRACT

LOVATO, P.S. **Verificação dos Parâmetros de Controle de Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição para Utilização em Concreto**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2007.

Parameters control verification of recycled aggregates from construction and demolition waste to concrete use

Civil construction consumes a large quantity of natural resources, energy, and it generates 50% of total wastes produced in the world. The recycling of construction and demolition wastes it is an important practice for the environment, being a good way to reduce the environmental impact caused by the sector. In many researches already developed about the use of the construction and demolition wastes in concrete, there is a diversity of results. One cause of this is the great variability in the composition of recycled aggregates. The control of aggregates variability will become easier to control the properties of concretes with recycled aggregates. Thus, this work was developed with the purpose to find a control parameter of the variability of these aggregates, comparing the analysis by composition and heavy media separation, to use in concretes mix design. Characterizations of recycled aggregates obtained from construction and demolition wastes collected at three different places were accomplished. Three water/cement ratio – 0,50; 0,60; and 0,70 – and three substitution proportion from fine and coarse recycled aggregate – 0%, 50%, 100% – were considered to produce concrete mixtures. The combinations executed were defined by a statistical project. The properties evaluated were compressive strength, split tensile strength, modulus of elasticity and water absorption. Mathematical models were obtained to estimate the properties evaluated. Relations between the results from each collection and the properties of the recycled aggregates were established. In conclusion, the concrete with recycled aggregates behavior can not be predict through composition or density of aggregates. Both aspects and other aggregates characteristics have influenced on the quality of concretes, depending of the property evaluated.

Key-words: construction and demolition wastes; recycled aggregates; variability; control parameters; concrete

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	15
LISTA DE TABELAS	16
1 INTRODUÇÃO	18
1.1 OBJETIVOS	20
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	20
2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD).....	22
2.1 DEFINIÇÃO.....	22
2.2 ORIGEM E QUANTIDADE DE RESÍDUOS GERADOS.....	23
2.3 COMPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	26
2.4 IMPUREZAS NA COMPOSIÇÃO DOS RCD	29
2.4.1 Matéria orgânica ou solos argilosos	29
2.4.2 Materiais betuminosos	30
2.4.3 Gesso	30
2.4.4 Vidro.....	30
2.4.5 Metais	31
2.4.6 Cloretos	31
2.4.7 Substâncias orgânicas	31
3 RECICLAGEM DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	33
3.1 PANORAMA DA RECICLAGEM NO BRASIL	34
3.1.1 Recomendações normativas para definição, classificação e destinação do resíduo da construção civil em vigor no Brasil	35
3.1.1.1 Resolução N° 307, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002)	35
3.1.1.2 NBR 15112 – “Resíduos sólidos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação” (ABNT, 2004b).....	37
3.1.1.3 NBR 15113 – “Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação” (ABNT, 2004c).....	37
3.1.1.4 NBR 15114 – “Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação” (ABNT, 2004d)	37
3.1.1.5 NBR 15115 – “Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos” (ABNT, 2004e).....	38
3.1.1.6 NBR 15116 – “Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos” (ABNT, 2004f)....	38
3.2 BENEFICIAMENTO DO RESÍDUO	38
3.2.1 Cominuição	39
3.2.1.1 Britador de impacto.....	39
3.2.1.2 Britador de mandíbula.....	40

3.2.1.3	Moinho de martelo	40
3.2.1.4	Cones de britagem.....	40
3.2.1.5	Britador de rolo	40
3.2.2	Separação por tamanho.....	41
3.2.3	Concentração.....	41
3.2.4	Operações auxiliares	41
3.3	UTILIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	41
3.3.1	Agregados reciclados de resíduos de construção e demolição	43
3.3.1.1	Características dos agregados reciclados.....	44
3.3.1.1.1	Composição granulométrica	44
3.3.1.1.2	Massa específica e massa unitária	45
3.3.1.1.3	Absorção de água	47
3.3.1.2	Variabilidade dos agregados reciclados	48
3.3.2	Concreto com agregados reciclados	52
3.3.2.1	Influência dos agregados reciclados no concreto no estado fresco	53
3.3.2.2	Influência dos agregados reciclados no concreto no estado endurecido	54
3.3.2.2.1	Influência dos agregados reciclados nas propriedades mecânicas do concreto	54
3.3.2.2.2	Influência dos agregados reciclados nas propriedades de durabilidade do concreto	56
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	58
4.1	PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO	58
4.2	COLETA DAS AMOSTRAS DE RESÍDUO.....	61
4.3	COMPOSIÇÃO DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO.....	61
4.4	BENEFICIAMENTO DO RESÍDUO	62
4.5	MATERIAIS UTILIZADOS – SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO.....	63
4.5.1	Cimento	63
4.5.2	Agregados	64
4.5.2.1	Caracterização dos agregados	65
4.5.2.1.1	Composição granulométrica	65
4.5.2.1.2	Massa específica e massa unitária	65
4.5.2.1.3	Absorção de água dos agregados reciclados	67
4.5.2.2	Separação densitária dos agregados reciclados	68
4.5.3	Água	71
4.6	DOSAGEM EXPERIMENTAL.....	71
4.6.1	Ajuste do teor ideal de argamassa	72
4.6.2	Definição dos traços.....	73
4.6.3	Produção dos concretos	75

4.7	PROPRIEDADES AVALIADAS – MÉTODOS DE ENSAIO.....	77
4.7.1	Resistência à compressão axial.....	77
4.7.2	Resistência à tração por compressão diametral.....	77
4.7.3	Módulo de deformação.....	77
4.7.4	Absorção de água.....	78
5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA OS RCD COLETADOS E AGREGADOS.....	79
5.1	COMPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS COLETADOS.....	79
5.2	SEPARAÇÃO POR DENSIDADE.....	81
5.3	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....	85
5.3.1	Composição granulométrica.....	85
5.3.2	Massa específica e massa unitária.....	88
5.3.3	Absorção de água.....	89
6	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA OS CONCRETOS PRODUZIDOS.....	93
6.1	RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO.....	94
6.1.1	Efeito isolado da coleta sobre a relação água/cimento.....	95
6.1.2	Efeito isolado de m sobre a relação água/cimento.....	96
6.1.3	Efeito isolado do teor de substituição do agregado miúdo reciclado e do agregado graúdo reciclado sobre a relação água/cimento.....	96
6.1.4	Efeito da interação m x AGR sobre a relação água/cimento.....	97
6.1.5	Efeito das interações coleta x AMR e coleta x AGR sobre a relação água/cimento.....	98
6.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	99
6.2.1	Efeito isolado de m sobre a resistência à compressão axial do concreto.....	100
6.2.2	Efeito isolado do teor de substituição do agregado miúdo reciclado e do agregado graúdo reciclado sobre a resistência à compressão axial do concreto.....	101
6.2.3	Efeito das interações m x AMR e m x AGR sobre a resistência à compressão axial do concreto.....	102
6.2.4	Efeito da interação AMR x AGR sobre a resistência à compressão axial do concreto.....	105
6.2.5	Verificação da validade da caracterização dos agregados por diferentes faixas de densidade como parâmetro de controle da resistência à compressão do concreto.....	1066
6.2.6	Relação entre a resistência à compressão e o consumo de cimento.....	108
6.2.7	Considerações gerais.....	111
6.3	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	113
6.3.1	Efeito isolado de m sobre a resistência à tração por compressão diametral do concreto ..	114
6.3.2	Efeito isolado do teor de substituição do agregado miúdo reciclado e do agregado graúdo reciclado sobre a resistência à tração por compressão diametral do concreto.....	114
6.3.3	Efeito da interação m x AGR sobre a resistência à tração por compressão diametral do concreto.....	115

6.3.4	Relação entre as resistências à tração e à compressão	116
6.3.5	Considerações gerais.....	118
6.4	MÓDULO DE DEFORMAÇÃO	120
6.4.1	Efeito isolado de m sobre o módulo de deformação do concreto.....	121
6.4.2	Efeito isolado do teor de substituição do agregado miúdo reciclado e do agregado graúdo reciclado e efeito da interação AMR x AGR sobre o módulo de deformação do concreto.....	122
6.4.3	Efeito das interações m x AMR e m x AGR sobre o módulo de deformação do concreto ..	124
6.4.4	Verificação da validade da caracterização dos agregados por diferentes faixas de densidade como parâmetro de controle do módulo de deformação secante do concreto.....	125
6.4.5	Relação entre o módulo de deformação e a resistência à compressão do concreto.....	128
6.4.6	Considerações gerais.....	128
6.5	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO.....	130
6.5.1	Efeito isolado da coleta sobre a absorção de água do concreto	132
6.5.2	Efeito da interação m x coleta sobre a absorção de água do concreto	133
6.5.3	Efeito das interações coleta x AMR e coleta x AGR sobre a absorção de água do concreto ..	134
6.5.4	Efeito das interações m x AMR e m x AGR sobre a absorção de água do concreto, para cada coleta	135
6.5.5	Efeito da interação AMR x AGR sobre a absorção de água do concreto, para cada coleta ..	137
6.5.6	Considerações gerais.....	140
6.6	DESEMPENHO DE ALGUNS TRAÇOS PARA CONCRETOS COM A MESMA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	143
6.7	COMPARAÇÃO DOS MODELOS DE COMPORTAMENTO ELABORADOS COM OUTROS ENCONTRADOS NA BIBLIOGRAFIA.....	145
6.7.1	Resistência à compressão axial.....	145
6.7.2	Resistência à tração por compressão diametral.....	147
6.7.3	Módulo de deformação	148
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	150
7.1	CONCLUSÕES.....	150
7.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	155
	REFERÊNCIAS	157
	APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	166
	APÊNDICE B – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS.....	171
	APÊNDICE C – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS MODELOS DE REGRESSÃO MÚLTIPLA E PARÂMETROS ESTIMADOS DOS FATORES ANALISADOS.....	175

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: representação esquemática do procedimento do ensaio de afunda-flutua	51
Figura 2: representação esquemática das variáveis independentes.....	59
Figura 3: esquema do Projeto Composto de Segunda Ordem	59
Figura 4: agregados reciclados: (a) agregado miúdo; (b) agregado graúdo	65
Figura 5: execução do ensaio de absorção dos agregados reciclados	68
Figura 6: capela para exaustão de gases tóxicos contendo os recipientes de ensaio	70
Figura 7: fração flutuada em uma determinada densidade; (a) agregado miúdo; (b) agregado graúdo ..	70
Figura 8: representação esquemática da separação por densidades realizada	71
Figura 9: diagrama de dosagem	72
Figura 10: pré-molhagem dos agregados reciclados; (a) agregado miúdo; (b) agregado graúdo	76
Figura 11: aspecto do concreto produzido com agregado reciclado	76
Figura 12: verificação do abatimento do concreto	76
Figura 13: sistema de medição das deformações através de extensômetro eletrônico	78
Figura 14: composição dos resíduos de construção e demolição da Coleta 1 (São Leopoldo)	80
Figura 15: composição dos resíduos de construção e demolição da Coleta 2 (Porto Alegre)	80
Figura 16: composição dos resíduos de construção e demolição da Coleta 3 (Novo Hamburgo).....	80
Figura 17: distribuição por fases dentro das faixas de densidades separadas para o material da coleta 1 ..	84
Figura 18: distribuição por fases dentro das faixas de densidades separadas para o material da coleta 2 ..	84
Figura 19: distribuição por fases dentro das faixas de densidades separadas para o material da coleta 3 ..	84
Figura 20: curvas granulométricas dos agregados miúdos utilizados e respectivos limites especificados pela NBR 7211 (ABNT, 2005b)	86
Figura 21: curvas granulométricas dos agregados graúdos utilizados e respectivos limites especificados pela NBR 7211 (ABNT, 2005b)	88
Figura 22: curvas de absorção dos agregados miúdos reciclados, conforme adaptação da norma NBR NM 30 (ABNT, 2001c)	91
Figura 23: curvas de absorção dos agregados graúdos reciclados obtidas pelo método de Leite (2001)..	91
Figura 24: relação a/c em função da origem do RCD	95
Figura 25: relação a/c em função de m	96
Figura 26: relação a/c em função do teor de substituição dos agregados	97
Figura 27: relação a/c em função da interação m x AGR: (a) a/c em função de AGR, para os diferentes valores de m; (b) a/c em função de m, para os diferentes teores de AGR.....	98
Figura 28: relação a/c em função dos teores de substituição dos agregados, para as diferentes coletas: (a) a/c em função de AMR; (b) a/c em função de AGR	98
Figura 29: resistência à compressão em função do valor de m.....	101
Figura 30: resistência à compressão em função do teor de substituição dos agregados	102

Figura 31: resistência à compressão em função da interação m x AMR: (a) fc em função de AMR, para os diferentes valores de m; (b) fc em função de m, para os diferentes teores de AMR....	103
Figura 32: resistência à compressão em função da interação m x AGR: (a) fc em função de AGR, para os diferentes valores de m; (b) fc em função de m, para os diferentes teores de AGR.....	104
Figura 33: resistência à compressão em função da interação AMR x AGR: (a) fc em função de AMR, para os diferentes teores de AGR; (b) fc em função de AGR, para os diferentes teores de AMR.....	105
Figura 34: resistência à compressão em função da origem do RCD	106
Figura 35: resistência à compressão em função da interação m x coleta.....	107
Figura 36: resistência à compressão em função dos teores de substituição dos agregados, para as diferentes coletas: (a) fc em função de AMR; (b) fc em função de AGR	108
Figura 37: resistência à compressão x consumo de cimento.....	109
Figura 38: curvas de resistência à compressão em função da relação a/c	111
Figura 39: resistência à tração por compressão diametral em função do valor de m.....	114
Figura 40: resistência à tração por compressão diametral em função do teor de substituição dos agregados.....	115
Figura 41: resistência à tração por compressão diametral em função da interação m x AGR: (a) ftD em função de AGR, para os diferentes valores de m; (b) ftD em função de m, para os diferentes teores de AGR	116
Figura 42: curvas de resistência à tração por compressão diametral em função da relação a/c.....	118
Figura 43: módulo de deformação em função do valor de m	122
Figura 44: módulo de deformação em função do teor de substituição dos agregados.....	123
Figura 45: módulo de deformação em função da interação AMR x AGR: (a) Esec em função de AMR, para os diferentes teores de AGR; (b) Esec em função de AGR, para os diferentes teores de AMR	123
Figura 46: módulo de deformação em função da interação m x AMR: (a) Esec em função de AMR, para os diferentes valores de m; (b) Esec em função de m, para os diferentes teores de AMR	124
Figura 47: módulo de deformação em função da interação m x AGR: (a) Esec em função de AGR, para os diferentes valores de m; (b) Esec em função de m, para os diferentes teores de AGR	125
Figura 48: módulo de deformação em função da origem do RCD	126
Figura 49: módulo de deformação em função dos teores de substituição dos agregados, para as diferentes coletas: (a) Esec em função de AMR; (b) Esec em função de AGR.....	1266
Figura 50: curvas do módulo de deformação em função da relação a/c.....	129
Figura 51: absorção de água em função da origem do RCD.....	132
Figura 52: absorção de água em função do valor de m.....	133
Figura 53: absorção de água em função dos diferentes teores de substituição dos agregados, considerando cada coleta: (a) A em função de AMR; (b) A em função de AGR.....	134
Figura 54: absorção de água em função da interação m x AMR, para a coleta 1: (a) A em função de AMR, para os diferentes valores de m; (b) A em função de m, para os diferentes teores de AMR	135
Figura 55: absorção de água em função da interação m x AMR, para a coleta 2: (a) A em função de AMR, para os diferentes valores de m; (b) A em função de m, para os diferentes teores de AMR	136

Figura 56: absorção de água em função da interação m x AGR, para a coleta 2: (a) A em função de AGR, para os diferentes valores de m; (b) A em função de m, para os diferentes teores de AGR.....	137
Figura 57: absorção de água em função da interação AMR x AGR, para a coleta 1: (a) A em função de AMR, para os diferentes teores de AGR; (b) A em função de AGR, para os diferentes teores de AMR	138
Figura 58: absorção de água em função da interação AMR x AGR, para a coleta 2: (a) A em função de AMR, para os diferentes teores de AGR; (b) A em função de AGR, para os diferentes teores de AMR	138
Figura 59: absorção de água em função da interação AMR x AGR, para a coleta 3: (a) A em função de AMR, para os diferentes teores de AGR; (b) A em função de AGR, para os diferentes teores de AMR	139
Figura 60: curvas da absorção de água por imersão em função da relação a/c, para a coleta 1.....	140
Figura 61: curvas da absorção de água por imersão em função da relação a/c, para a coleta 2.....	141
Figura 62: curvas da absorção de água por imersão em função da relação a/c, para a coleta 3.....	141
Figura 63: comparação da resistência à compressão em função da relação a/c com outras pesquisas....	145
Figura 64: comparação da resistência à compressão em função do teor de substituição dos agregados com outras pesquisas.....	146
Figura 65: comparação da resistência à tração por compressão diametral em função da relação a/c com pesquisa de Leite (2001)	147
Figura 66: comparação da resistência à tração por compressão diametral em função do teor de substituição dos agregados com pesquisa de Leite (2001)	148
Figura 67: comparação do módulo de deformação em função da relação a/c com outras pesquisas	149
Figura 68: comparação do módulo de deformação em função do teor de substituição dos agregados com outras pesquisas.....	149

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: dados sobre a geração de resíduos de construção e demolição em algumas cidades brasileiras.....	25
Tabela 2: porcentagem dos materiais presentes no RCD em cada coleta realizada na usina de reciclagem de Ribeirão Preto	27
Tabela 3: composição do resíduo de construção e demolição coletado em aterro de Ferrara, Itália .	28
Tabela 4: comparativo da composição dos resíduos de construção e demolição.....	28
Tabela 5: Classificação, definição e destinação final dos RCD, de acordo com a Resolução N° 307 (CONAMA, 2002)	36
Tabela 6: densidades de líquidos orgânicos usados em ensaios afunda-flutua	52
Tabela 7: combinações analisadas no programa experimental	60
Tabela 8: características químicas do cimento utilizado na pesquisa	63
Tabela 9: características físicas e mecânicas do cimento utilizado na pesquisa.....	64
Tabela 10: traços unitários e em massa utilizados na produção dos concretos com os agregados reciclados provenientes da Coleta 1 (São Leopoldo).....	74
Tabela 11: traços unitários e em massa utilizados na produção dos concretos com os agregados reciclados provenientes da Coleta 2 (Porto Alegre).....	74
Tabela 12: traços unitários e em massa utilizados na produção dos concretos com os agregados reciclados provenientes da Coleta 3 (Novo Hamburgo)	75
Tabela 13: constituintes percentuais dos resíduos de construção e demolição coletados	79
Tabela 14: percentuais dos materiais mais porosos (cerâmica + argamassa) e dos materiais menos porosos (concreto + rocha), para cada coleta	81
Tabela 15: resultados da separação por densidades para os agregados miúdos, através do ensaio de “afunda-flutua”	82
Tabela 16: resultados da separação por densidades para os agregados graúdos, através do ensaio de “afunda-flutua”	83
Tabela 17: composição dos agregados miúdos e graúdos reciclados	85
Tabela 18: composição granulométrica dos agregados miúdos utilizados	86
Tabela 19: composição granulométrica dos agregados graúdos utilizados	87
Tabela 20: resultados de massa específica e massa unitária dos agregados	89
Tabela 21: resultado dos ensaios de absorção dos agregados reciclados.....	92
Tabela 22: níveis codificados das variáveis independentes m , AGR e AMR	94
Tabela 23: níveis codificados da variável coleta para a relação a/c	95
Tabela 24: níveis codificados da variável coleta para fc	100
Tabela 25: níveis codificados da variável coleta para o consumo de cimento.....	109
Tabela 26: relação entre o consumo de cimento e a resistência à compressão dos concretos	110
Tabela 27: comparação geral das resistências à compressão dos concretos com diferentes teores de substituição do agregado natural pelo reciclado.....	112

Tabela 28: relação entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão dos concretos aos 28 dias	117
Tabela 29: comparação geral das resistências à tração por compressão diametral dos concretos com diferentes teores de substituição do agregado natural pelo reciclado	119
Tabela 30: níveis codificados da variável coleta para Esec	121
Tabela 31: comparação geral dos módulos de deformação dos concretos com diferentes teores de substituição do agregado natural pelo reciclado	130
Tabela 32: modelos ajustados para estimativa da absorção de água por imersão dos concretos com agregados reciclados	131
Tabela 33: relação entre a absorção de água dos concretos com agregados reciclados e os concretos de referência	142
Tabela 34: desempenho dos concretos com agregados reciclados em função da resistência à compressão	144
Tabela 35: dados obtidos durante a moldagem dos concretos referentes à coleta 1	166
Tabela 36: dados obtidos durante a moldagem dos concretos referentes à coleta 2	166
Tabela 37: dados obtidos durante a moldagem dos concretos referentes à coleta 3	167
Tabela 38: resultados dos ensaios obtidos no programa experimental, para os concretos com agregados reciclados da coleta 1	168
Tabela 39: resultados dos ensaios obtidos no programa experimental, para os concretos com agregados reciclados da coleta 2	169
Tabela 40: resultados dos ensaios obtidos no programa experimental, para os concretos com agregados reciclados da coleta 3	170
Tabela 41: análise de variância dos resultados da relação a/c	171
Tabela 42: análise de variância dos resultados de resistência à compressão axial	171
Tabela 43: análise de variância dos resultados de consumo de cimento	171
Tabela 43: análise de variância dos resultados de consumo de cimento	172
Tabela 44: análise de variância dos resultados de resistência à tração por compressão diametral ..	172
Tabela 45: análise de variância dos resultados do módulo de deformação secante à 80% f_c	173
Tabela 46: análise de variância dos resultados da absorção de água por imersão dos concretos da coleta 1	173
Tabela 47: análise de variância dos resultados da absorção de água por imersão dos concretos da coleta 2	174
Tabela 48: análise de variância dos resultados da absorção de água por imersão dos concretos da coleta 3	174
Tabela 49: análise de variância do modelo de regressão para a relação a/c	175
Tabela 50: parâmetros estimados dos fatores analisados para a relação a/c	175
Tabela 51: análise de variância do modelo de regressão para a resistência à compressão	175
Tabela 52: parâmetros estimados dos fatores analisados para a resistência à compressão	176
Tabela 53: análise de variância do modelo de regressão para o consumo de cimento	176
Tabela 54: parâmetros estimados dos fatores analisados para o consumo de cimento	176

Tabela 55: análise de variância do modelo de regressão para a resistência à tração por compressão diametral	177
Tabela 56: parâmetros estimados dos fatores analisados para a resistência à tração por compressão diametral	177
Tabela 57: análise de variância do modelo de regressão para a relação entre resistência à tração e resistência à compressão	177
Tabela 58: parâmetros estimados dos fatores analisados para a relação entre resistência à tração e resistência à compressão	177
Tabela 59: análise de variância do modelo de regressão para o módulo de deformação secante....	177
Tabela 59: análise de variância do modelo de regressão para o módulo de deformação secante....	178
Tabela 60: parâmetros estimados dos fatores analisados para o módulo de deformação secante ...	178
Tabela 61: análise de variância do modelo de regressão para a relação entre módulo de deformação e resistência à compressão	178
Tabela 62: parâmetros estimados dos fatores analisados para a relação entre módulo de deformação e resistência à compressão	178
Tabela 63: análise de variância do modelo de regressão para a absorção de água da coleta 1	179
Tabela 64: parâmetros estimados dos fatores analisados para a absorção de água da coleta 1	179
Tabela 65: análise de variância do modelo de regressão para a absorção de água da coleta 2	179
Tabela 66: parâmetros estimados dos fatores analisados para a absorção de água da coleta 2	179
Tabela 67: análise de variância do modelo de regressão para a absorção de água da coleta 3	180
Tabela 68: parâmetros estimados dos fatores analisados para a absorção de água da coleta 3	180

1 INTRODUÇÃO

A questão ambiental tem sido discutida atualmente em várias áreas do conhecimento. Diversos setores da sociedade têm tentado alterar sua forma de produção, visando reduzir o impacto causado por suas atividades. No entanto, não se observa uma preocupação muito significativa quanto à geração de impactos ambientais pela indústria da construção civil.

A construção civil é considerada um dos maiores agentes de degradação do ambiente. De acordo com Oikonomou (2005), o setor consome grande quantidade de recursos naturais, 40% do total de energia e gera 50% do total de resíduos produzidos no mundo. Conforme Eguchi et al. (2007), a indústria da construção é responsável anualmente por 75 milhões de toneladas do total de resíduos industriais produzidos.

Há várias fontes de geração de resíduos na construção civil, como por exemplo, a falta de qualidade dos bens e serviços, que pode causar perdas de materiais, os quais saem das obras em forma de entulho, contribuindo com o aumento do volume de resíduos gerados (LEITE, 2001). Aos resíduos de construção, somam-se os de demolição, que podem ser originados pelo crescimento econômico e demográfico das cidades e pela necessidade de manutenção, recuperação e reforma das estruturas (CARRIJO, 2005).

Considerando a preocupação ambiental crescente nos últimos anos, impulsionada pela questão do desenvolvimento sustentável, há a necessidade de importantes mudanças na construção civil. A reciclagem dos resíduos de construção e demolição é uma alternativa para amenizar o impacto que o consumo de matérias-primas e energia e a geração de resíduos causam no ambiente. Nos últimos anos a reciclagem de resíduos tem sido incentivada em todo mundo, por questões políticas, econômicas e ecológicas.

Vários estudos já foram realizados, em âmbito nacional e internacional, buscando a utilização dos resíduos de construção e demolição em diversos materiais de construção, como argamassas, concretos e blocos de concreto. Zordan (1997), após realizar ensaios de resistência à compressão, abrasão e permeabilidade em concretos produzidos com agregados reciclados, concluiu que estes podem ser utilizados na fabricação de peças de concreto para drenagem superficial de estradas, guias e blocos para calçamento e blocos de concreto para alvenaria sem função estrutural.

Latterza (1998) avaliou o emprego de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados na fabricação de painéis leves de vedação, comprovando a viabilidade técnica e econômica da utilização desses agregados em concretos de baixa e média resistências.

Em seu trabalho, Leite (2001) comprovou a viabilidade de utilização dos agregados reciclados em concretos quanto às propriedades mecânicas avaliadas, demonstrando que também é possível substituir agregados miúdos naturais pelos agregados reciclados. Sousa (2001) verificou em seu estudo potencialidades de utilização de agregados reciclados na produção de blocos de concreto.

Vieira (2003) realizou ensaios de resistência à compressão e de durabilidade, avaliando o processo de corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos com agregado reciclado. A autora concluiu que é viável o uso de agregados reciclados no concreto quando este é utilizado com reforço de armaduras, exceto em substituições totais dos agregados miúdos e graúdos em uma mesma mistura, principalmente em relações água/cimento maiores que 0,6.

Internacionalmente, podem-se citar estudos realizados por Hansen (1992), Barra (1996 apud LEITE, 2001) e Quebaud (1996 apud LEITE, 2001).

No entanto, nas pesquisas nacionais e internacionais existentes até o momento, não há um consenso com relação ao comportamento e desempenho de concretos com agregados reciclados. Essa diversidade de resultados pode ser explicada pela grande variabilidade na composição dos agregados reciclados, pela possível presença de impurezas e pelas diferentes porosidades dos agregados (CARRIJO, 2005). Conforme a autora, pelos trabalhos já existentes sobre o assunto, percebe-se que a classificação dos agregados reciclados por suas diferentes fases não é suficiente para proporcionar um maior domínio do comportamento do concreto que com ele será produzido.

Os agregados reciclados de resíduos de construção e demolição apresentam uma alta variabilidade quanto à composição e origem, o que interfere no comportamento dos concretos produzidos com eles. Logo, controlando essa variabilidade poderiam ser controlados também os valores de resistência dos concretos produzidos a partir dos agregados reciclados.

De acordo com Angulo (2005), a avaliação da distribuição dos agregados reciclados por densidades pode ser um método simples e rápido para a classificação de lotes desses agregados, assim como um parâmetro de controle do comportamento mecânico dos concretos produzidos.

Considerando que os agregados reciclados de resíduos de construção e demolição apresentam alta heterogeneidade, sendo esta devida à origem dos resíduos, ao período e local de coleta e ao equipamento utilizado no beneficiamento, entre outros, tem-se a necessidade de encontrar parâmetros para o controle dessa variabilidade. Dessa forma, se tornará mais fácil garantir que os concretos produzidos com esses agregados tenham bom desempenho e durabilidade.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral da pesquisa é identificar um parâmetro que permita prever o comportamento dos concretos produzidos com agregados provenientes de resíduos de construção e demolição, a partir de características destes agregados, para utilização em dosagens de concretos.

Os objetivos específicos são:

- verificar se a separação densitária dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição pode ser utilizada como parâmetro de controle do comportamento dos concretos produzidos com estes agregados;
- verificar se a composição dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição pode ser utilizada como parâmetro de controle do comportamento dos concretos produzidos com estes agregados;
- avaliar a resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, módulo de deformação secante e absorção de água por imersão dos concretos produzidos com diferentes teores de substituição dos agregados (grãos e miúdos) naturais pelos reciclados;
- comparar os modelos de comportamento verificados em outras pesquisas com os modelos encontrados nos ensaios realizados, visando encontrar um único modelo matemático que represente a tendência de comportamento dos concretos com agregados reciclados.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O trabalho está dividido em sete capítulos. Neste capítulo – “Introdução” – são feitas considerações iniciais sobre o tema da pesquisa, a justificativa da escolha deste tema e os objetivos do trabalho.

O capítulo 2 – “Resíduos de construção e demolição (RCD)” – apresenta considerações gerais sobre os resíduos de construção e demolição, como conceito, geração, quantidade e composição.

No terceiro capítulo – “Reciclagem dos resíduos de construção e demolição” – é apresentado um breve histórico da reciclagem dos resíduos de construção e demolição no Brasil e no mundo, as operações envolvidas nesta reciclagem e as possíveis utilizações desses resíduos.

No capítulo 4 – “Programa experimental” – são detalhadas as variáveis consideradas no planejamento do experimento, as atividades realizadas desde a coleta do resíduo e a metodologia dos ensaios realizados.

O capítulo 5 apresenta a análise dos resultados da composição dos resíduos de construção e demolição utilizados e da caracterização dos agregados reciclados, quanto à composição granulométrica, massa específica, absorção e densidade.

No capítulo 6 são apresentadas a análise e discussão dos resultados dos ensaios realizados no concreto com agregado reciclado: resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de deformação e absorção de água.

No capítulo 7 são feitas as conclusões finais sobre o trabalho e algumas sugestões para pesquisas futuras.

2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

2.1 DEFINIÇÃO

Os resíduos de construção e demolição (RCD) podem ser definidos, de uma forma simplificada, como resíduos provenientes de construções, reparos, reformas e demolições de estruturas e estradas. Encontram-se na literatura diversos conceitos para resíduos de construção e demolição, como, por exemplo, a definição de Biocycle (1990), citado por Zordan (1997), que apresenta um significado mais amplo para o termo. Segundo o autor, os RCD são resíduos sólidos não contaminados, provenientes tanto da construção, reforma, reparos e demolição, como também resíduos não contaminados de vegetação, resultantes da limpeza e escavação de solos.

A norma NBR 15116 (Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 2004f), que estabelece requisitos para o emprego de resíduos sólidos da construção civil, define estes como sendo:

Resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto, solo, rocha, madeira, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica, etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha. (ABNT, 2004f, p. 2).

É importante comentar que há uma diferença entre a nomenclatura adotada nas pesquisas nacionais e internacionais e a encontrada nas recomendações normativas em vigor no Brasil, como a Resolução Nº 307 (Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, 2002) e as normas da ABNT. Enquanto as primeiras utilizam a terminologia adotada nesta pesquisa, “Resíduos de Construção e Demolição (RCD)”, as normas trazem o termo “Resíduos da Construção Civil (RCC)”.

Considerando o risco ambiental, os resíduos devem ser classificados para serem corretamente manuseados. A norma brasileira NBR 10004 (ABNT, 2004a) – Resíduos sólidos: classificação – classifica os resíduos de construção e demolição como inertes (classe II-b), ou seja, não reagem quimicamente mesmo contendo elementos minerais. No entanto, alguns estudos, citados a seguir, contestam essa classificação.

Conforme Oliveira et al. (2001), quando ainda estava em vigor a NBR 10004 de 1987, a norma deveria ser modificada, classificando os resíduos de construção e demolição como resíduos não inertes, pois um estudo dos autores constatou, através de análises químicas e de difratometria,

que o resíduo proveniente de concreto não apresenta propriedades inertes. No entanto, essa classificação foi mantida quando da re-publicação da norma em 2004.

Segundo Zaharieva et al. (2003), os agregados reciclados não podem ser considerados inertes, pois são altamente heterogêneos e porosos e possuem altos teores de impurezas. Zordan (2000) afirma que dependendo da origem e da composição do resíduo de construção e demolição, este pode apresentar elementos que o torne não inerte ou perigoso. Como exemplo, o autor cita a presença de amianto. Carneiro (2005) também apresenta alguns componentes dos RCD que não são inertes, como o gesso, considerado um resíduo não inerte (classe II-a), e os resíduos de tintas, solventes e óleos, considerados resíduos perigosos (classe I).

Para este trabalho, entende-se como RCD qualquer resíduo oriundo de construções, demolições e reformas de obras de construção, não incluindo resíduos de vegetação e solos argilosos.

2.2 ORIGEM E QUANTIDADE DE RESÍDUOS GERADOS

Os resíduos de construção e demolição podem ser originados em perdas na construção civil; por catástrofes naturais ou artificiais, como terremotos, bombardeios, incêndios e desabamentos; demolição de estruturas ou de obras que atingiram sua vida útil ou deficiências próprias dos processos e sistemas construtivos atualmente utilizados. No Brasil, segundo dados do Sinduscon-SP (2005), apresentados por Angulo (2005), mais de 50% do resíduo de construção e demolição é originado na construção (construção informal e canteiros de obras).

Os resíduos gerados nas construções são provenientes das perdas físicas nos canteiros de obras (ANGULO, 2000). Os resíduos de demolição são constituídos principalmente por concretos e tijolos, e em menores quantidades, por aço, plástico e madeira. Esses resíduos podem incluir diversas substâncias tóxicas em sua composição, como fenóis, sulfatos e metais pesados, constituindo em torno de 1% da massa de resíduo.

Segundo John e Agopyan (2000), a quantidade de resíduos de construção gerada nas cidades é igual ou maior que a de resíduos domiciliares. Mundialmente estima-se que a geração de resíduos de construção varia entre 130 e 3000 kg/hab.ano. Conforme Tarring (1998) e Lauritzen (1998), citados por Leite (2001), acredita-se que são gerados entre 2 e 3 bilhões de toneladas de resíduos de construção e demolição por ano no mundo.

De acordo com John (1996), os países desenvolvidos e em desenvolvimento, geralmente consomem uma elevada quantidade de material, uma vez que possuem um grande número de construções, gerando conseqüentemente grande quantidade de resíduos. Dados apresentados por Nawa (2004) mostram que nos Estados Unidos são gerados entre 250 a 300 milhões de toneladas por ano de RCD. De acordo com Banthia e Chan (2000), a média de resíduos de concreto produzida anualmente no país é de 40 a 50 milhões de toneladas.

Estima-se que na União Européia são geradas anualmente de 200 a 300 milhões de toneladas de RCD, equivalendo de 0,5 a 1 ton/hab.ano (LAURITZEN, 2004). No Japão, conforme Banthia e Chan (2000), cerca de 25 milhões de toneladas de resíduos de concreto eram produzidos em 1990. Cinco anos depois, esse número aumentou para 71 milhões de toneladas, com previsão de chegar a 110 milhões de toneladas por ano em 2001.

Dados apresentados por Shayan e Xu (2003) mostram que na Austrália são produzidos anualmente mais de 3 milhões de toneladas de RCD, sendo a maior parte composta por resíduos de concreto. Destes, aproximadamente 50% é reciclado para a produção de agregados graúdos. Pentalla (1997) relata que na Finlândia são gerados mais de 0,11 ton/hab.ano de resíduos de construção e demolição, sendo que este resíduo é descartado em aterro.

Em Hong Kong, a indústria da construção produz em torno de 37 mil toneladas de RCD por dia (POON et al., 2004), sendo que 38% desses resíduos são provenientes da construção (TAM et al., 2006).

Conforme já mencionados anteriormente, os desastres naturais e guerras também são fontes geradoras de resíduos. No Líbano, por exemplo, em 1995, havia na cidade de Beirute, aproximadamente 20 milhões de toneladas de materiais. Na Flórida, o furacão Andrew, em 1992, causou a destruição de 100 mil residências (LAURITZEN, 1998 apud LEITE, 2001). Na Indonésia, a Tsunami ocorrida em dezembro de 2004 destruiu 300 mil residências, 200 km de estradas e 30 pontes de concreto armado. Os índices iniciais mencionados pela revista Época (2005 apud AFFONSO, 2005) apontam cerca de 80 milhões de metros cúbicos de resíduos. O furacão Katrina, que atingiu os Estados Unidos em agosto de 2005, destruiu aproximadamente 350 mil casas nos estados do Luisiana e do Mississippi. Pelo menos 100 milhões de metros cúbicos de resíduos foram gerados (GOMES, 2006).

No Kuwait, estima-se que 58% do total depositado nos aterros municipais em 2001 e 2002 era proveniente de construções. A maior parte desses resíduos eram concreto e cerâmica vermelha (RAHAL, 2007).

No Brasil, Pinto (1996) relata que os RCD correspondem a 2/3 em massa do total de resíduos coletados em cidades de médio e grande porte. Em outro estudo, Pinto (1999) apresenta que no país a quantidade de resíduos gerados varia entre 41% e 70% do total de resíduos sólidos urbanos nas cidades de médio e grande porte.

Na tabela 1 são apresentados alguns dados sobre a produção de RCD de algumas cidades brasileiras. Conforme John e Agopyan (2000), muitas vezes pode-se observar grande variabilidade das estimativas de quantidade de resíduos gerados apresentados por diferentes autores de um mesmo país. Segundo esses autores, um dos motivos é a diferença entre os conceitos de resíduos de construção e demolição. Alguns autores incluem a remoção de solos, e outros excluem este valor. John e Agopyan (2000, p.3) afirmam que “os dados nacionais necessitam ser validados a partir de uma metodologia única”.

Tabela 1: dados sobre a geração de resíduos de construção e demolição em algumas cidades brasileiras

Cidade	População (milhões de habitantes)	Geração de RCD (ton/dia)	% de RCD em relação ao resíduo sólido urbano	Produção de RCD (kg/hab.dia)
São Paulo ¹	10,00	10866	ND	1,08
Porto Alegre ²	1,29	350	ND	0,27
Salvador ³	2,20	2750	50	1,25
Ribeirão Preto ⁴	0,46	1043	67	2,27
São José do Rio Preto ⁴	0,32	687	ND	2,15
Jundiaí ⁴	0,29	712	ND	2,46
Santo André ⁴	0,63	1013	58	1,61
Belo Horizonte ⁴	2,01	1200	51	0,60
Vitória da Conquista ⁴	0,24	310	ND	1,29
São José dos Campos ⁴	0,50	733	65	1,47
Rio de Janeiro ³	5,90	863	19	0,14
Guaratinguetá ¹	0,10	60	ND	0,60
Taubaté ¹	0,23	230	ND	1,00

(fonte: ¹OLIVEIRA et al., 2004a; ²COSTA, 1998; ³NUNES, 2004 apud AFFONSO, 2005; ⁴LEITE, 2001)

Dados da Associação dos Transportadores de Caçambas Estacionárias e Similares de Porto Alegre apontam que em 2005 eram geradas mil toneladas diárias de RCD, tanto por obras públicas, como particulares, nesta cidade (ENTULHO, 2005). Conforme informações fornecidas pelo Departamento Municipal de Limpeza Urbana (DMLU, 2007), em 2006 os aterros de inertes

de Porto Alegre receberam cerca de 280 mil toneladas de resíduos, incluindo solos, o que equivale a 770 ton/dia. É importante ressaltar que esse dado não corresponde a geração total de RCD de Porto Alegre, uma vez que parte do material gerado é depositado em aterros particulares e em locais irregulares. Comparando esses valores com o apresentado na tabela 1, observa-se que ocorreu um grande aumento da quantidade de RCD gerada por dia na cidade.

De acordo com Oikonomou (2005), as principais razões para o aumento do volume de resíduos de concreto provenientes de demolições são:

- muitas edificações antigas e outras estruturas chegaram ao seu limite de vida útil e necessitam serem demolidas;
- há estruturas, que mesmo adequadas ao uso, são demolidas, pois há novas necessidades;
- há resíduos de edificações que são resultados de fenômenos da natureza, como terremotos e tempestades.

Apesar da variabilidade nas estimativas de quantidade de RCD gerados, observa-se que os volumes são elevados, contribuindo para o esgotamento dos aterros. Dessa forma, há a necessidade de uma maior reutilização e reciclagem do RCD, justificando estudos sobre esse tema.

2.3 COMPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Os RCD podem ser constituídos por diferentes materiais, como solos, rochas naturais, concreto, argamassas (de assentamento e revestimento), cerâmica vermelha (tijolos e telhas), cerâmicas para revestimento, cimento-amianto, gesso, vidro, aço, chapas de aço galvanizado, madeira, plásticos, materiais betuminosos, tintas, papel de embalagem e restos de vegetais. A composição desses resíduos depende da fonte que o originou, do momento em que a amostra foi coletada e do tipo de obra em construção.

De acordo com Zordan (2000), o resíduo de construção e demolição possivelmente seja o mais heterogêneo dos resíduos industriais. Uma edificação é composta por diversos componentes, resultando nessa heterogeneidade dos resíduos quando ocorre sua demolição. Além disso, nem mesmo um resíduo de concreto ou argamassa é igual, quando se comparam materiais de duas edificações. Oliveira e Assis (1999), afirmam que o resíduo de concreto pode ser proveniente de diversas fontes, como concretos que foram dosados, fabricados e aplicados com controle tecnológico; e concretos produzidos sem controle de qualidade. O nível de resistência do concreto vai influenciar na porosidade final do resíduo.

Outros aspectos que contribuem para a heterogeneidade do resíduo de construção e demolição são: o nível de desenvolvimento técnico da indústria da construção local, a qualidade da mão-de-obra disponível, as técnicas de construção e demolição utilizadas, os programas de qualidade e redução de perdas adotados, os processos de reciclagem e reutilização empregados no canteiro de obras e os materiais disponíveis na região (OLIVEIRA et al., 2004b). Todos os aspectos apresentados conferem a esse resíduo uma alta diversidade, impossibilitando sua separação total.

Vieira (2003) acredita que essa variabilidade pode ser um das causas da pouca utilização dos agregados reciclados por parte das indústrias. Angulo (2000), ao concluir sua pesquisa sobre a variabilidade dos agregados de resíduos de construção e demolição, enfatiza a importância da identificação das origens e composições desses resíduos.

Em seu estudo, Zordan (1997) observou que a variabilidade na composição dos agregados reciclados pode ter influenciado na resistência à compressão dos concretos produzidos, que oscilou entre 21 e 30 MPa para o traço 1:3. O autor realizou quatro coletas, no período de um mês, na usina de reciclagem de Ribeirão Preto. Na tabela 2 se observam as diferentes composições do resíduo em cada coleta.

Tabela 2: porcentagem dos materiais presentes no RCD em cada coleta realizada na usina de reciclagem de Ribeirão Preto

Material	Amostras				
	A (%)	B (%)	C (%)	D (%)	Média (%)
Argamassa	36,8	35,7	37,9	39,4	37,4
Cerâmica	14,6	25,9	23,8	18,9	20,8
Cerâmica polida	1,2	2,6	4	1,9	2,5
Concreto	19,8	21,6	21,5	21,7	21,1
Pedras	27,4	13,4	12,4	17,6	17,7
Outros	0,2	0,8	0,4	0,5	0,5
Total	100	100	100	100	100

(fonte: ZORDAN, 1997, p89)

Bianchini et al. (2005) analisaram o material coletado em Ferrara, na Itália, em dois períodos diferentes, fevereiro e setembro de 1997, sendo que no primeiro mês foram coletadas duas amostras. A composição do material coletado está apresentada na tabela 3.

Comparando as composições dos RCD apresentados em vários trabalhos, pode-se comprovar a grande variabilidade existente. Pinto (1987 apud ZORDAN, 1997) analisou a composição dos

resíduos gerados em canteiros de obras, verificando que aproximadamente 64% do material é formado por argamassa, 30% por cerâmica vermelha e 6% por materiais como concreto, pedra, areia, metais e plásticos.

Tabela 3: composição do resíduo de construção e demolição coletado em aterro de Ferrara, Itália

Componente	Amostra 1 – Fevereiro (%)	Amostra 2 – Fevereiro (%)	Amostra Setembro (%)
Cerâmica vermelha	45	30	35
Concreto	20	40	40
Madeira	3	2	2
Metal	4	5	2
Plástico, papel e borracha	2	1	1
Asfalto	-	2	5
Finos provenientes de argamassas e concretos	26	20	15

(fonte: BIANCHINI et al., 2005, p150)

Carneiro et al. (2000) estudaram a composição do RCD gerado em Salvador, verificando que a maior parte deste (53%) é constituída por concreto e argamassa, 12% por cerâmica vermelha e 4% de rochas, totalizando em 72% de materiais com potencial de reciclabilidade. Leite (2001) analisou a composição dos resíduos de construção e demolição de Porto Alegre, onde predominaram os resíduos de argamassa e material cerâmico, seguidos por resíduos de concreto. Os percentuais destes componentes podem ser visualizados na tabela 4.

O estudo de Vieira (2003), relativo aos resíduos de construção e demolição de Maceió, diferentemente das demais pesquisas apresentadas, encontrou como material predominante os materiais cerâmicos, seguidos por argamassa e concreto. A tabela 4 apresenta um comparativo entre as composições dos resíduos de construção e demolição verificados em alguns trabalhos.

Tabela 4: comparativo da composição dos resíduos de construção e demolição

Componente	%			
	Pinto (1987)	Zordan (1997)	Leite (2001)	Vieira (2003)
Argamassa	63,67	37,40	28,26	27,82
Concreto	4,73	21,10	15,18	18,65
Cerâmica	29,09	20,80	26,33	48,15
Outros	2,20	20,70	30,23	5,38

Dados apresentados por Larrañaga (2004), referentes à Comunidade Européia, mostram que a quantidade de materiais com potencial de reciclabilidade é inferior aos verificados no Brasil. No trabalho, observa-se que 50% dos RCD são compostos por concreto, alvenaria e argamassa. Os outros 50% são compostos por contaminantes, como madeira, papel, metais e terra, valor muito superior aos verificados no Brasil.

Pôde-se perceber, através das informações apresentadas, que os RCD apresentam uma composição muito variável, o que interfere no comportamento dos concretos produzidos com agregados reciclados, podendo resultar em dificuldades de aproveitamento do material, seja através da reutilização ou da reciclagem.

2.4 IMPUREZAS NA COMPOSIÇÃO DOS RCD

Um dos problemas inerentes ao uso de agregados reciclados é a possibilidade de existirem contaminantes. Esses materiais podem causar efeitos negativos nas propriedades mecânicas dos concretos reciclados e na sua durabilidade (LEITE, 2001). Lima (1999) define as impurezas ou contaminantes como todos os materiais não inertes, ou materiais que prejudicam a qualidade de concretos e argamassas produzidos com agregados que os contenham.

A seguir, serão apresentadas e discutidas algumas dessas impurezas.

2.4.1 Matéria orgânica ou solos argilosos

Materiais provenientes de demolição são freqüentemente contaminados por matéria orgânica ou solos argilosos. Quando incorporados ao material, são de difícil remoção. Concretos produzidos com agregados contaminados podem ter suas resistências mecânicas reduzidas e não serem resistentes a ciclos de gelo e degelo ou umedecimento e secagem (HANSEN, 1992).

Esse tipo de contaminação pode também ocorrer nos agregados naturais. Hansen (1992) destaca que as normas para agregados naturais podem ser aplicadas também para os agregados reciclados. No entanto, a remoção desses contaminantes não é simples. De acordo com Hansen (1992), pode-se utilizar *sprinklers* acima das correias transportadoras e peneiras ou, quando necessário, podem ser feitos peneiramentos sucessivos. Quebaud (1996 apud LEITE, 2001) destaca que essas impurezas normalmente estão presentes em maiores quantidades na parte mais fina do material reciclado, portanto o ideal é descartar essa fração do material.

2.4.2 Materiais betuminosos

Conforme resultados obtidos por B.C.S.J (1978), citado por Hansen (1992), a presença de material betuminoso nos agregados reciclados reduz consideravelmente a resistência do concreto. Além disso, o agregado reciclado contaminado por esse material pode contribuir para uma incorporação de ar ao concreto (FERGUS, 1981 apud HANSEN, 1992).

No entanto, conforme Leite (2001), não há uma grande preocupação no Brasil com relação a presença desse material no resíduo de construção e demolição. Contudo, nos locais onde ocorrem demolições de pavimentos asfálticos, é importante que seja feita a remoção e reciclagem seletiva de seus diferentes componentes.

2.4.3 Gesso

O gesso é um material muito nocivo ao concreto, pois forma a etringita secundária, altamente expansiva, que provoca tensões internas que podem causar fissuras no concreto (LEITE, 2001). A etringita é um subproduto da hidratação dos componentes do cimento e sua formação está sempre relacionada à reação expansiva entre o sulfato de cálcio e o aluminato tricálcico, em presença de água, em misturas de cimento Portland (AGUIAR; SELMO, 2004).

Portanto, o gesso deve ser eliminado da composição do resíduo de construção e demolição antes de ser britado, pois ao britar ele se transforma em pequenas partículas que se misturam aos agregados produzidos, especialmente na fração composta por agregados miúdos. Recomenda-se a execução de sucessivos peneiramentos, não excluindo a necessidade de realização de ensaios para determinar a qualidade dos agregados (LEITE, 2001).

2.4.4 Vidro

O vidro pode ser um perigoso contaminante para o concreto, pois pode causar reações álcali-silica em meios aquosos, mesmo que sejam utilizados cimentos com baixo teor de álcalis (HANSEN, 1992). O autor relata que, como a densidade do vidro é similar à dos concretos ou agregados, a separação é muito difícil.

No entanto, a utilização de resíduos de vidro em blocos de alvenaria tem sido testada como substituto do agregado fino em porcentagens superiores a 20%. Conforme Terro (2006), foi constatado que quanto mais finas as partículas dos agregados de vidro empregados no concreto, menor a expansão causada pela reação álcali-silica. Em seu estudo, o autor comprovou a

viabilidade do uso de vidro como agregado em concreto, apontando diversas vantagens, como por exemplo, sua impermeabilidade.

De acordo com López et al. (2005), atualmente existem países utilizando vidro como agregado fino em concreto, como por exemplo a Austrália. Assim como Terro (2006), os autores demonstraram a viabilidade técnica da substituição do agregado fino por vidro moído.

Portanto, é provável que no futuro o vidro deixe de ser considerado um contaminante do concreto e passe a ser utilizado como agregado, sem riscos de prejudicá-lo. Para isso, ainda são necessários mais estudos a respeito desta utilização.

2.4.5 Metais

Pequenas quantidades de aço ou pedaços de arame podem causar manchas ou pequenos danos à superfície dos concretos, principalmente em presença de cloretos. Peças de zinco e alumínio, provenientes de calhas, estruturas e cabos de fios elétricos podem causar desprendimento de hidrogênio no concreto fresco, ou fissurações devido a expansões do concreto endurecido (HANSEN, 1992).

Os metais presentes nos resíduos de construção e demolição podem ser removidos por separação magnética ou manualmente, ocorrendo antes de seu beneficiamento (HANSEN, 1992; LEITE, 2001). Hansen (1992) destaca que, sendo os metais materiais dúcteis, provavelmente não fragmentarão, podendo também ser removidos no decorrer do processo de beneficiamento.

2.4.6 Cloretos

A presença de cloretos nos concretos pode provocar graves problemas de corrosão de armaduras. A contaminação por cloretos pode ocorrer através da penetração dos íons nas estruturas, especialmente em áreas marinhas, pontes ou pavimentos expostos a sais de degelo; ou no concreto ainda fresco, através da utilização de aditivos aceleradores de pega, que são produtos à base de cloretos e do uso de agregados retirados de zonas marinhas (HANSEN, 1992).

2.4.7 Substâncias orgânicas

De acordo com Hansen (1992), muitas substâncias orgânicas, como madeira, tecidos têxteis, papéis e materiais polímeros, são instáveis no concreto quando submetidas a ciclos de secagem e molhagem ou gelo e degelo. Outras substâncias, como tintas, podem causar incorporação de ar ao

concreto. O autor afirma que devem ser impostos valores limitando a quantidade de contaminantes orgânicos nas normas para agregados reciclados. A NBR 15116 (ABNT, 2004f) limita em 2% o teor máximo de materiais não minerais em relação à massa do agregado reciclado. Observa-se que os RCD apresentam muitos materiais que podem ser prejudiciais ao concreto. Portanto, há a necessidade de retirar essas impurezas, a fim de produzir concretos com melhor qualidade. A Resolução N° 307 (CONAMA, 2002) exige a separação dos resíduos da construção civil de acordo com as diferentes classes por ela estabelecidas. Caso esse requisito fosse cumprido pelas empresas geradoras, o processo de reciclagem se tornaria mais econômico, além de garantir melhor qualidade aos agregados produzidos.

3 RECICLAGEM DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

A construção civil é uma das atividades mais antigas que se tem conhecimento, tendo sido executada desde o princípio de forma artesanal, gerando uma grande quantidade de resíduos. De acordo com Schulz e Hendricks (1992) desde a época dos romanos foi utilizada alvenaria britada para a produção de concreto.

A primeira utilização de tijolos com cimento Portland para a produção de concreto, conforme apresentam Schulz e Hendricks (1992), ocorreu em 1860, na Alemanha. Entretanto, foi somente após o final da Segunda Guerra Mundial que ocorreu a primeira utilização significativa dos resíduos de construção e demolição. Durante o período de reconstrução após a guerra, era necessário satisfazer a demanda por materiais de construção e remover os escombros das cidades destruídas. A utilização destes resíduos contribuiu para a reconstrução das cidades alemãs (HELLER, 1958 apud SCHULZ; HENDRICKS, 1992).

A Comunidade Européia realizou, a partir de 1988, um grande número de obras em concreto com agregados reciclados de concreto, alvenaria e da mistura de ambos. Como exemplo, pode-se citar o *Building Research Establishment* (BRE), construído no Reino Unido. Nele, agregados reciclados de concreto foram usados nas fundações e no pavimento do estacionamento (FEILDEN CLEGG BRADLEY ARCHITECTS LLP, 2007). Também foram realizadas obras de grande porte, como a eclusa da Hidrovia de Haandrick e a eclusa de Berendrecht (LEVY; HELENE, 2002).

Em termos de normalização internacional para agregados reciclados existem:

- a proposta japonesa de normalização da B.C.S.J., de 1977. Uma das mais antigas especificações para o uso de agregados reciclados, elaborada pela *Building Contractor Society of Japan, Committe on Disposal and Reuse of Construction Waste*;
- em 1986, conforme Nawa (2004), o Instituto de Pesquisa em Edificação do Ministério da Construção do Japão emitiu: (a) proposta de padrão de qualidade para agregado graúdo reciclado, (b) proposta de norma para concreto com agregado graúdo reciclado e (c) que para agregados miúdos reciclados, deve-se seguir a proposta de norma da B.C.S.J.;
- a Norma Britânica 6543, de 1985 – Guia para a utilização de subprodutos industriais e resíduos de materiais de construção e engenharia civil;
- a Norma Holandesa do CUR – Comissão de desenvolvimento e pesquisa – para uso de agregado reciclado em concreto, de 1986 (LEITE, 2001);
- as diretrizes da RILEM TC 121 DRG apresentadas no 3º Simpósio Internacional sobre Demolição e Reutilização de Concreto e Alvenaria, em 1993 (LEITE, 2001);

- o adendo à Norma Dinamarquesa regular de concreto, de 1995 (LEITE, 2001).

Apesar de já existirem locais onde são utilizados agregados reciclados e das normalizações já existentes, ainda não se percebe um uso massivo dos agregados reciclados em concreto. Simpson (1999) aponta algumas questões que desencorajam a indústria da construção no uso de agregados reciclados em concreto:

- os projetistas e engenheiros relutam na utilização devido à carência de documentos normativos;
- sem esses documentos, os fornecedores, ou seja, os recicladores não sabem como classificar nem a graduação dos agregados reciclados;
- não existindo especificações, não haverá demanda e, portanto, não serão desenvolvidas centrais recicladoras;
- no caso de existirem especificações, demanda e recicladoras, haveria material suficiente para a quantidade de agregados reciclados necessários em um pedido?

Conforme o autor, a indústria de agregado reciclado e a indústria da demolição devem trabalhar juntas, estocando os materiais de demolição, formando “pedreiras” de material para reciclagem. Essa solução apresenta conseqüências econômicas, práticas e ambientais, pois esse local de estocagem deve localizar-se próximo a grandes cidades, onde o potencial de geração de resíduos e a demanda são maiores.

3.1 PANORAMA DA RECICLAGEM NO BRASIL

No Brasil, a utilização de resíduos de construção e demolição começou a ser tema de pesquisas em meados da década de 1980, com o arquiteto Tarcísio de Paula Pinto, cuja pesquisa estudou o uso dos reciclados para a produção de argamassas (PINTO, 1986 apud LEITE, 2001). O Brasil se encontra em um estágio ainda primário de reciclagem, sendo que o início de suas atividades foi em 1991, em Belo Horizonte (LEITE, 2001).

Conforme Jadovski, (2005), há cinco municípios com usinas de reciclagem em operação no país, de investimento público ou privado, sendo eles: Belo Horizonte, São Paulo, Vinhedo, Socorro e Piracicaba. Em São José dos Campos, Campinas, Londrina e Ribeirão Preto, as centrais existentes foram desativadas, sendo que nas duas últimas foi devido a problemas de vandalismo. Segundo Santos (2007), em setembro de 2006 foi inaugurada uma central de reciclagem em São José do Rio Preto, onde são produzidos mais de quinze produtos com os resíduos da construção civil.

Nos locais onde foi implantada, a reciclagem resultou em benefícios técnicos, econômicos e ambientais. No entanto, a quantidade de resíduos processados ainda não é suficiente para consumir o volume gerado. Além disso, o poder público tem dificuldade para implantar novas centrais recicladoras (CARRIJO, 2005). John e Agopyan (2000) também afirmam que há viabilidade técnica e econômica das centrais recicladoras, sendo que para o seu sucesso é necessária a construção de uma rede de captação de resíduos dentro da malha urbana. Dessa forma, atrairia as caçambas de coleta e os coletores autônomos, já que seria reduzida a distância até a central de reciclagem.

Em maio de 2006 foi instalado na zona Norte de Porto Alegre o Aterro Anchieta, com 51,7 mil m². Este aterro é um dos primeiros no País a separar os RCD visando a reutilização e a reciclagem (ATERRO, 2006). Entretanto, com pouco mais de seis meses de funcionamento, este aterro foi fechado devido ao esgotamento de sua capacidade, encerrando o projeto de operação da primeira fase. Em abril de 2007, o DMLU iniciou a operação da segunda fase do aterro, após receber a Licença de Operação emitida pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente. Entretanto, a área liberada é limitada, podendo esgotar-se em poucos meses (DMLU, 2007). Por isso, ressalta-se a importância da implantação de centrais de reciclagem, devido à escassez de área de descarga dos RCD.

3.1.1 Recomendações normativas para definição, classificação e destinação do resíduo da construção civil em vigor no Brasil

A seguir são apresentadas as recomendações normativas que já estão em vigor no Brasil, referentes aos resíduos da construção civil.

3.1.1.1 Resolução N° 307, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002)

Esta Resolução estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos de construção civil. Nela são adotadas, entre outras, as seguintes definições:

- *Resíduos da construção civil: são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, comumente chamados de entulhos de obras, [...] calça ou metralha;*
- *Agregado reciclado: é o material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção que apresentem características técnicas para a aplicação em obras de edificação, de infra-estrutura, em aterros sanitários ou outras obras de engenharia;*

- *Reciclagem: é o processo de reaproveitamento de um resíduo, após ter sido submetido à transformação;*
- *Beneficiamento: é o ato de submeter um resíduo a operações e/ou processos que tenham por objetivo dotá-los de condições que permitam que sejam utilizados como matéria-prima ou produto.*

De acordo com esta Resolução, as empresas geradoras de resíduos devem ter como objetivo prioritário, a não geração de resíduos e, secundariamente, a redução, a reutilização, a reciclagem e a destinação final. Esta não pode ocorrer em aterros de resíduos domiciliares, áreas de “bota-fora”, encostas, corpos d’água, lotes vagos e em área protegidas por Lei. Conforme a Resolução, deve-se implementar a gestão de resíduos da construção civil, através da elaboração de um Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil, cuja responsabilidade será dos Municípios e Distrito Federal.

A Resolução também classifica, define e orienta sobre a destinação final dos RCD, de acordo com a tabela 5.

Tabela 5: Classificação, definição e destinação final dos RCD, de acordo com a Resolução N° 307 (CONAMA, 2002)

Classe	Definição	Destinação
A	São os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como resíduos de obras de pavimentação, solos provenientes de terraplanagem, componentes cerâmicos, argamassa, concreto e resíduos de peças pré-moldadas em concreto produzidas em canteiro de obras.	Deverão ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados, ou encaminhados a áreas de aterro de resíduos da construção civil, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura.
B	São os resíduos recicláveis para outras destinações, como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e outros.	Deverão ser reutilizados, reciclados ou encaminhados a áreas de armazenamento temporário, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura.
C	São os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso.	Deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.
D	São os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.	Deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.

3.1.1.2 NBR 15112 – “Resíduos sólidos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação” (ABNT, 2004b)

O principal objetivo desta Norma é estabelecer diretrizes e critérios de projeto, implantação e operação de áreas de transbordo e triagem de resíduos da construção civil e resíduos volumosos. Determina as condições gerais para projeto, informação cadastral, memorial descritivo, plano de controle para a recepção de resíduos, sistemas de proteção ambiental, entre outros.

3.1.1.3 NBR 15113 – “Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação” (ABNT, 2004c)

Esta Norma estabelece os requisitos para projeto, implantação e operação de aterros de resíduos sólidos da construção civil classe A, conforme classificação da Resolução do CONAMA, e de resíduos inertes. Tem como objetivos: o armazenamento de materiais de forma segregada, possibilitando o uso futuro; a disposição destes materiais, com vistas à futura utilização da área; e a proteção das coleções hídricas superficiais ou subterrâneas próximas.

De acordo com essa Norma, devem ser observados critérios para a localização dos aterros, de modo que seja causado o mínimo impacto ambiental, que a maioria da população vizinha aceite a implantação do aterro e que esta esteja de acordo com a legislação de uso do solo e ambiental. Para a avaliação da adequabilidade do local, devem ser observados, entre outros, os seguintes aspectos: a geologia, a hidrologia, a vegetação, as vias de acesso, a área e o volume disponíveis e a vida útil.

O aterro deve prever sistema de monitoramento das águas subterrâneas, no aquífero mais próximo à superfície, visando a proteção das águas subterrâneas e superficiais.

3.1.1.4 NBR 15114 – “Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação” (ABNT, 2004d)

A Norma estabelece os requisitos para projeto, implantação e operação de áreas de reciclagem de resíduos sólidos da construção civil classe A. Ela se aplica na reciclagem de materiais já triados para a produção de agregados com características para a aplicação em obras de infraestrutura e edificações. A reciclagem deve ser feita de forma segura, sem comprometer o

ambiente, as condições de trabalho das operadoras dessas instalações e a qualidade de vida das populações vizinhas.

Para a escolha do local de implantação da central de reciclagem devem ser observados os mesmos critérios que para os aterros: deve ser causado o mínimo impacto ambiental, a maioria da população vizinha tem de aceitar a implantação da central de reciclagem e que esta esteja de acordo com a legislação de uso do solo e ambiental. Para a avaliação da adequabilidade do local, devem ser cuidados aspectos relacionados à hidrologia, à vegetação e às vias de acesso.

3.1.1.5 NBR 15115 – “Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos” (ABNT, 2004e)

O objetivo desta Norma é estabelecer padrões para o emprego de agregados reciclados de resíduos da construção civil em camadas de pavimentação de ruas, base e sub-base de pavimentos e como cobertura primário de ruas não pavimentadas.

3.1.1.6 NBR 15116 – “Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos” (ABNT, 2004f)

Esta Norma estabelece os requisitos para o emprego de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição em obras de pavimentação viária e concreto sem função estrutural. No item 3.3.1 serão apresentados mais alguns aspectos abordados nesta Norma.

3.2 BENEFICIAMENTO DO RESÍDUO

A situação ideal para o reaproveitamento dos resíduos de construção e demolição seria que não fosse necessário nenhum tipo de beneficiamento. No entanto, como estes materiais normalmente vêm em grandes dimensões, torna-se imprescindível realizar algumas operações de beneficiamento.

Segundo Leite (2001), para a implantação de um programa de reciclagem dos RCD, é importante a instalação de uma usina de reciclagem. Angulo et al. (2003) afirmam que, de uma forma simplificada, a reciclagem é um beneficiamento mineral. Este é um conjunto de operações unitárias cujo objetivo é obter características específicas de um material. As

operações unitárias são de quatro tipos: de cominuição, de separação por tamanho, de concentração e auxiliares (CHAVES, 1996 apud ANGULO et al., 2003).

3.2.1 Cominuição

Também denominadas operações de redução de tamanho, podendo ser realizadas britagem ou moagem, dependendo da granulometria do material. São operações que consomem grande quantidade de energia e peças de desgaste, ou seja, são de custo elevado. Segundo Angulo (2005), normalmente só é realizada a britagem na reciclagem da fração mineral dos resíduos de construção e demolição, sendo que ela pode ser repetida várias vezes.

A escolha do tipo de britador a utilizar é de grande importância, pois esse equipamento é determinante da maior parte das propriedades dos agregados obtidos (LEITE, 2001). A seguir são apresentados alguns tipos de britadores e suas características.

3.2.1.1 Britador de impacto

Utilizam-se britadores de impacto para materiais friáveis. O britador de impacto possui uma câmara onde o material é britado através do choque de martelos fixados por um rotor e pelo choque com placas fixas (LIMA, 1999). Promove uma melhor distribuição do tamanho dos grãos dos agregados para usos em pavimentação (HANSEN, 1992).

Conforme Lima (1999), devido a sua robustez, esse tipo de britador processa tanto peças de concreto armado, quanto vigas de madeira. Outra vantagem apresentada pelo autor, é a alta redução das dimensões das peças britadas, dispensando muitas vezes a rebritagem, já que esta gera uma quantidade de finos razoável. Além disso, gera grãos de forma cúbica, com boas características mecânicas. De acordo com Telles (2006), dependendo do material a ser moído, da velocidade de rotação dos martelos e do ajuste entre os martelos e a carcaça, a relação de moagem pode ser muito alta.

No entanto, Hansen (1992) apresenta como desvantagem o alto custo de manutenção desse tipo de britador, com alto desgaste.

3.2.1.2 Britador de mandíbula

Esse tipo de britador opera sob o princípio de compressão, onde o material é comprimido entre uma superfície fixa e outra móvel. A moagem ocorre numa câmara em forma de V, larga na parte superior e estreita na parte baixa (TELLES, 2006).

De acordo com Hansen (1992), o britador de mandíbulas produz a melhor distribuição granulométrica dos agregados reciclados para a produção de concreto e resulta em apenas 20% de finos abaixo de 4,8 mm. Dessa forma, há a necessidade de uma segunda britagem, aumentando o custo do processo (LIMA, 1999), o que representa uma desvantagem.

3.2.1.3 Moinho de martelo

Também denominados britadores de cilindros, são pouco utilizados, já que só produzem grande quantidade de material fino e apresentam alto consumo de energia elétrica (LEVY, 1997 apud LEITE, 2001). Os moinhos de martelo possuem câmaras de britagem e martelos de impacto que esmagam o material. De acordo com Affonso (2005), esse tipo de britador possui uma grelha na boca de saída, que mantém os agregados de grandes dimensões no compartimento de britagem. Logo, o equipamento produz grande quantidade de finos.

3.2.1.4 Cones de britagem

Os cones de britagem são mais usados para britagem secundária, processando materiais com diâmetro máximo de 200 mm (HANSEN, 1992). Logo, nesse tipo de equipamento só poderão ser colocados materiais previamente britados. Os grãos produzidos no cone de britagem são cúbicos, no entanto, é produzida grande quantidade de material fino.

3.2.1.5 Britador de rolo

Os britadores de rolos normalmente são utilizados em britagens secundárias. Realizam a fragmentação através da compressão das partículas entre dois cilindros que giram em sentidos contrários. Estes podem ser lisos ou dentados. O tamanho do material produzido pode ser regulado com a aproximação ou afastamento entre os rolos (LANZELLOTTI, 2005).

3.2.2 Separação por tamanho

Essa operação separa as partículas pelo seu tamanho através de peneiras ou classificadores pneumáticos ou hidráulicos. Pode ser realizado peneiramento a seco ou a úmido. O primeiro resulta sempre em uma pequena fração fina aderida à fração graúda. O segundo é empregado para se obter uma separação mais eficiente dessas frações (KELLY; SPOTTISWOOD, 1982 apud ANGULO, 2005).

Os classificadores pneumáticos geram uma corrente de ar ascendente e separam partículas leves de papel, plásticos, madeiras, entre outros, dos agregados reciclados (KURKOWSKI, 2000 apud ANGULO, 2005). Esses classificadores também podem ser utilizados para retirar a fração fina (<0,15 mm) presente nos agregados reciclados.

3.2.3 Concentração

As operações de concentração removem contaminantes, através de diferentes propriedades físicas dos minerais, tais como densidade, forma, propriedades elétricas e propriedades magnéticas. Conforme Angulo et al. (2003), podem ser realizadas diversas operações unitárias, como catação, separação magnética, separação em meio denso e flotação. Em Porto Alegre, como ainda não existe uma usina de reciclagem, para as pesquisas com resíduos de construção e demolição, essa etapa é realizada manualmente, preferencialmente antes da britagem.

3.2.4 Operações auxiliares

De acordo com Chaves (1996), citado por Angulo (2005), as principais operações auxiliares são transporte, secagem e homogeneização por meio de pilhas.

3.3 UTILIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Existem muitas alternativas para o reaproveitamento dos RCD, podendo estas serem através da reutilização ou da reciclagem. Na reutilização, o resíduo é reaplicado, sem transformá-lo, enquanto que na reciclagem, o resíduo é reaproveitado após ter sido transformado de alguma maneira (CARNEIRO, 2005).

A alternativa mais utilizada para o reaproveitamento dos RCD é em aterramentos, no qual eles são aplicados sem nenhum beneficiamento (CARNEIRO, 2005). No entanto, conforme a autora, normalmente os aterros são realizados sem nenhum controle e de forma inadequada, causando grandes impactos ambientais, como o aterramento de mangues, lagoas e margens de rios para a construção de habitações irregulares.

De acordo com Carrijo (2005), a forma mais simples de reaproveitamento dos RCD é utilizando-os em pavimentação, como base e sub-base de pavimentos. Dessa forma, é possível reaproveitar todos os componentes minerais do resíduo, como tijolos, argamassas, materiais cerâmicos, pedras e areias, não necessitando separá-los. Entretanto, conforme Angulo et al. (2002), há dados que demonstram que o setor de pavimentação sozinho não é capaz de consumir integralmente os RCD. Além disso, o setor da pavimentação é controlado pelo setor público na maioria das vezes, limitando o uso dos agregados reciclados nessas atividades.

Outra forma de reciclagem dos resíduos de construção e demolição é a utilização de agregados reciclados na fabricação de componentes de concreto, com ou sem função estrutural. Podem ser apenas concreto ou blocos de concreto para vedação, por exemplo (ANGULO, 2000). No entanto, de acordo com Angulo et al. (2002), a tecnologia empregada nas centrais de reciclagem brasileiras não permite que grande parte dos agregados reciclados seja empregada em concretos, conforme especificações internacionais, devido às quantidades de argamassa, contaminantes e materiais pulverulentos e aos valores de absorção de água e de massa específica nelas estabelecidas.

Visando estabelecer requisitos mínimos para o uso dos agregados reciclados na fabricação de componentes de concreto, foi elaborada a NBR 15116 (ABNT, 2004f). Além disso, segundo Carneiro (2005), encontra-se em fase de elaboração uma norma técnica que conterà especificações para o uso dos agregados reciclados na fabricação de concretos com função estrutural.

Também já há estudos da produção de argamassas com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. Como exemplo, pode-se citar o trabalho de Miranda (2000), que avaliou a influência do RCD nas argamassas para revestimento, principalmente quanto à incidência de fissuração. Os resultados obtidos apontaram a viabilidade de utilização de agregado reciclado em revestimentos de argamassas simples de cimento Portland, obtendo-se bom acabamento superficial e boa resistência de aderência à tração.

Enfim, há diversas possibilidades de aproveitamento dos resíduos de construção civil, desde que sejam tratados adequadamente e analisados (CARRIJO, 2005). Em resumo, após a britagem, peneiramento e, caso necessário, descontaminação do material, este pode ser utilizado, além das

alternativas já citadas, em enchimentos em geral, enchimentos em projetos de drenagem (HANSEN, 1992), uso arquitetônico visando estética e decoração e em obras públicas, como bancos e calçadas (CARRIJO, 2005).

3.3.1 Agregados reciclados de resíduos de construção e demolição

A NBR 15116 (ABNT, 2004f) define agregado reciclado como sendo o material granular originado do beneficiamento dos resíduos de construção ou demolição de obras civis, que apresenta características técnicas para a aplicação em obras de edificação e infra-estrutura.

Esta Norma classifica os agregados em dois tipos, **agregado de resíduo de concreto (ARC)** e **agregado de resíduo misto (ARM)**. O primeiro corresponde ao agregado reciclado composto na sua fração gráuda de no mínimo 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas. O último é aquele composto na sua fração gráuda com menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas. Além disso, essa Norma estabelece que os agregados devem ser obtidos dos resíduos pertencentes à classe A estipulada pela Resolução N° 307 (CONAMA, 2002), já definida no item 3.1.1.1.

Considerando que os agregados podem influenciar não só na trabalhabilidade do concreto, mas também suas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade, vários autores, apresentados a seguir, acham importante avaliar isoladamente os agregados reciclados de resíduos da construção civil. Segundo Quebaud e Buyle-Bodin (1999 apud LEITE, 2001), as características dos agregados reciclados dependem dos materiais que chegam às centrais de reciclagem e do tipo de beneficiamento utilizado nestas, como por exemplo, o tipo de britador e os equipamentos para retirar impurezas.

O estudo das características dos agregados é de grande importância, pois cerca de 75% do volume do concreto é ocupado por eles. Agregados com propriedades indesejáveis podem influenciar a resistência, comprometer a durabilidade e o desempenho estrutural do concreto (LEVY, 2001). Conforme Mehta e Monteiro (1994), é fundamental conhecer determinadas características dos agregados para a dosagem de concretos. É importante determinar as massas específica e unitária, a absorção de água, a granulometria, a forma e a textura, a resistência à compressão, o módulo de elasticidade e as substâncias deletérias presentes nos materiais.

3.3.1.1 Características dos agregados reciclados

3.3.1.1.1 *Composição granulométrica*

A granulometria dos agregados reciclados varia de acordo com o tipo de resíduo processado, os equipamentos utilizados no beneficiamento e a granulometria do resíduo antes de ser processado, logo cada tipo particular de resíduo reciclado terá a sua curva granulométrica (LIMA, 1999). Conforme Levy (2001), ainda não há um consenso no meio técnico a respeito da granulometria adequada para um agregado natural ou reciclado ser utilizado no concreto, portanto a curva granulométrica não deve ser utilizada como parâmetro para seleção do agregado a utilizar no concreto. A granulometria do agregado deve ser um critério orientativo para prever a trabalhabilidade do concreto.

De acordo com Lima (1999), o material reciclado pode ser peneirado, visando obter curvas granulométricas similares às da areia e brita convencionais. A NBR 15116 (ABNT, 2004f) recomenda a adição de agregados convencionais, visando corrigir a composição granulométrica do agregado reciclado. No entanto, estes procedimentos aumentam o custo da reciclagem, além de desperdiçar parte do material.

Sagoe-Crentsil et al. (2001) realizaram análise granulométrica de uma amostra de agregado graúdo reciclado de concreto, constatando que aproximadamente 80% do material estava concentrado na peneira de malha #6,3 mm. Nessa mesma amostra, 5,4% do material era passante na peneira de malha #4,8 mm. Khatib (2005) utilizou em seu trabalho agregados miúdos reciclados de cerâmica vermelha e de concreto. Ambas as amostras concentraram maior parte do material, em torno de 50%, na peneira de malha #2,36 mm.

Lee et al. (2005) analisaram duas amostras de agregados miúdos reciclados, observando diferentes composições granulométricas. Enquanto na amostra 1 maior parte do material ficou compreendido entre as peneiras de malha #2,4 e #0,6 mm, a amostra 2 apresentou uma distribuição granulométrica semelhante à do agregado natural empregado, com maior parte do material retido na peneira de malha #0,3 mm. Essa composição granulométrica refletiu no módulo de finura dos materiais. A amostra 1 apresentou módulo de finura 3,42, enquanto que para a amostra 2 obteve-se módulo de finura 2,89, valor semelhante ao do agregado natural utilizado, que apresentou módulo de finura 2,8.

Rashwan e AbouRizk (1997) compararam os agregados utilizados em sua pesquisa, naturais e reciclados de concreto, constatando que o agregado graúdo reciclado é mais fino que o agregado graúdo natural. O agregado graúdo reciclado utilizado por Topçu e Şengel (2004), proveniente de resíduos de concreto, também apresentou módulo de finura inferior ao do agregado graúdo natural, sendo 5,50 o valor do primeiro e 5,74 o valor do segundo.

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), a resistência do concreto pode ser influenciada por uma mudança na granulometria do agregado, mesmo sem alterar o diâmetro máximo do agregado e a relação água/cimento, caso esta mudança altere a consistência e as características de exsudação da mistura do concreto. Portanto, conforme Leite (2001), deve-se ter cuidado com a composição granulométrica dos agregados reciclados, de modo a produzir misturas de concreto trabalháveis, com grau de compactação satisfatório e que possibilitem o melhor desempenho técnico.

3.3.1.1.2 Massa específica e massa unitária

Na maioria dos casos, os agregados reciclados apresentam a massa específica e a massa unitária menores que os agregados naturais. Isto pode ser explicado pelo fato que os resíduos de construção e demolição são compostos de materiais porosos. Conseqüentemente, observa-se que as massas específicas das argamassas e concretos elaborados com agregados reciclados também são inferiores que das argamassas e concretos convencionais (LIMA, 1999).

Após realizar levantamento bibliográfico de valores de massa específica, Hansen (1992) concluiu que a massa específica dos agregados reciclados mais baixa que a dos agregados naturais é devida à argamassa antiga aderida às partículas do agregado. Shayan e Xu (2003) também atribuem à argamassa antiga a massa específica mais baixa. Os autores encontraram para o agregado graúdo reciclado estudado, na condição saturado superfície seca, uma massa específica de 2,56 kg/dm³.

Para agregados graúdos reciclados de cerâmica, Brito et al. (2005) encontraram valores de massa específica entre 2,03 kg/dm³ (seco) e 2,27 kg/dm³ (saturado superfície seca). Para o mesmo material a massa unitária encontrada foi 1,16 kg/dm³. Xiao et al. (2005) utilizaram em seu trabalho agregados graúdos reciclados de concreto, encontrando valores de massa específica e massa unitária, 2,52 kg/dm³ e 1,29 kg/dm³, respectivamente.

Sani et al. (2005) caracterizaram agregados reciclados compostos por diversos tipos de materiais, encontrando valores de massa específica de 2,28 kg/dm³ para os agregados miúdos e 2,35 kg/dm³ para os agregados graúdos.

Lee et al. (2005) utilizaram dois tipos de agregados miúdos reciclados de concreto, sendo seus valores de massa específica 2,28 kg/dm³ e 2,39 kg/dm³. Valor semelhante obteve Khatib (2005), também para agregados miúdos reciclados de concreto, 2,34 kg/dm³. O autor também utilizou agregados miúdos reciclados de cerâmica vermelha, os quais apresentaram massa específica 2,05 kg/dm³.

No trabalho realizado por Leite (2001), a autora encontrou valores de massa específica de 2,53 kg/dm³ para os agregados miúdos reciclados e de 2,51 kg/dm³ para os agregados graúdos reciclados. Vieira (2003) encontrou valores praticamente iguais, 2,51 kg/dm³ para os agregados miúdos reciclados e 2,52 kg/dm³ para os agregados graúdos reciclados.

Os valores de massa unitária encontrados por Leite (2001) foram 1,21 kg/dm³ para os agregados miúdos reciclados e 1,12 kg/dm³ para o agregado graúdo reciclados.

Gonçalves (2001) utilizou em seu trabalho apenas agregados graúdos reciclados de concreto, com massa unitária de 1,29 kg/dm³, massa específica seca de 2,48 kg/dm³ e massa específica saturada superfície seca de 2,61 kg/dm³.

Observa-se que os resultados de massa específica e massa unitária encontrados na bibliografia são muito variáveis, mesmo para materiais com composição parecida. Essas diferenças ocorrem em função do tipo de britador utilizado, da granulometria e das diferentes porosidades dos componentes do RCD. Outro fator que influencia nesses valores é o método de ensaio empregado, uma vez que as normas comumente utilizadas são para materiais naturais e os materiais reciclados são mais porosos e frágeis.

Leite (2001) destaca a importância de se conhecer as massas específica e unitária dos agregados, para a realização do estudo da dosagem dos concretos. Como os valores apresentados pelos materiais reciclados normalmente são inferiores aos dos materiais naturais, deve ser realizada uma compensação da quantidade de material reciclado a ser utilizado nas misturas de concreto quando traços em massa de concretos convencionais são aplicados aos concretos reciclados.

3.3.1.1.3 Absorção de água

Uma vez que os agregados reciclados são compostos por materiais porosos, como argamassas e alvenaria, eles apresentam taxas de absorção muito altas. Portanto é muito importante considerar essa característica para não influenciar na durabilidade nem dificultar a produção de argamassas e concreto (LIMA, 1999).

Oliveira e Vazquez (1996) encontraram taxas de absorção de agregados graúdos reciclados de concreto de 7,60% para os agregados de graduação 5-10 mm e de 7,70% para os de graduação 10-20 mm. Para essas mesmas graduações e também agregados reciclados de concreto, Gómez-Soberón (2002) encontrou taxas de absorção de 6,81% e 5,83%, respectivamente. Para os agregados miúdos, o autor encontrou taxa de absorção de 8,16%.

O agregado graúdo reciclado de concreto utilizado por Gonçalves (2001) apresentou taxa de absorção de 4,90%. Evangelista e Brito (2007) produziram agregados reciclados de concreto em laboratório e ajustaram sua curva granulométrica à dos agregados naturais. Os autores avaliaram a absorção de água dos agregados miúdos reciclados com diâmetros compreendidos entre 0,074 e 1,19 mm, encontrando uma taxa de 13,10%.

Senthamarai et al. (2005) estudaram a utilização de cerâmica branca em concreto. Os autores constataram que os agregados graúdos reciclados desse tipo de material apresentam baixa taxa de absorção, tendo encontrado o valor de 0,72%.

O agregado graúdo reciclado de concreto empregado por Rahal (2007) em sua pesquisa apresentou taxa de absorção de 3,47%. Já o agregado reciclado utilizado por Xiao et al. (2005), proveniente de resíduos de concreto, apresentou taxa de absorção de 9,25%.

Os agregados miúdos reciclados de concreto estudados por Lee et al. (2005) apresentaram taxas de absorção de 10,35% e 6,59%. Os agregados utilizados por Khatib (2005), também miúdos, apresentaram taxas de absorção de 6,25% (originados de concreto) e 14,75% (originados de cerâmica vermelha). O agregado reciclado caracterizado por Sani et al. (2005), composto por diversos materiais, também apresentou alta taxa de absorção, sendo esta 15,80%.

Elevados valores de absorção são comuns de serem verificados em materiais cerâmicos. Em levantamento bibliográfico realizado por Schulz e Hendricks (1992), os autores encontraram valores de absorção entre 22 a 25% para esse tipo de material.

O material estudado por Leite (2001) apresentou absorção de 8,60% para o agregado miúdo e de 4,95% para o agregado graúdo. Já na pesquisa de Vieira (2003), observam-se taxas de absorção maiores, de 11,08% para o agregado miúdo e 6,04% para o agregado graúdo.

Da mesma forma que na massa específica, os diferentes valores de absorção verificados na bibliografia devem-se às diferentes porosidades dos materiais componentes do RCD e ao método de ensaio utilizado, muitas vezes inadequado ao material reciclado.

A absorção de água dos agregados reciclados interfere na relação água/cimento final das misturas e na trabalhabilidade do material, deixando o concreto muito seco (LEITE, 2001). Portanto, é uma característica de grande importância, sendo fundamental o seu estudo prévio.

Conforme Lima (1999), devido a essa possibilidade de os agregados absorverem a água destinada à hidratação do cimento e trabalhabilidade do concreto, há autores que recomendam uma pré-molhagem do material reciclado, compensando a absorção de água do material reciclado para a produção do concreto ou argamassa. Oliveira e Vazquez (1996) também relatam que alguns autores aconselham que seja feita uma saturação por imersão dos agregados antes da produção do concreto. Entretanto, estes autores estudaram concretos executados com agregados reciclados seco, semi-saturados e saturados, observando uma pequena diminuição nas resistências dos concretos feitos com agregados secos e saturados.

Segundo Leite (2001), compensar parcialmente a taxa de absorção dos agregados permite que não haja um excesso muito grande de água no concreto, o que reduziria os valores da resistência mecânica. Hansen (1992) ressalta a importância da pré-molhagem dos agregados reciclados a fim de evitar a rápida perda de abatimento.

A norma NBR 15116 (ABNT, 2004f), que estabelece requisitos para a utilização dos agregados reciclados em concreto sem função estrutural também recomenda que seja feita a pré-molhagem, empregando valores em torno de 80% da taxa de absorção do agregado.

3.3.1.2 Variabilidade dos agregados reciclados

Segundo Angulo (2000), uma limitação à utilização dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição é a variabilidade de sua composição e, portanto, de propriedades como granulometria, massa específica e absorção de água, uma vez que os efeitos dessa variação nas propriedades dos concretos aos quais são adicionados ainda não são conhecidos. A variabilidade dos resíduos da construção civil ocorre principalmente em função da sua origem e do período de

coleta. O autor afirma ainda que a variabilidade dos agregados reciclados é diferente da dos resíduos de construção e demolição propriamente ditos, uma vez que as composições são diferentes antes e depois do beneficiamento deles.

Em relação à granulometria, mesmo utilizando-se o mesmo equipamento de britagem, com a mesma regulagem, observa-se que há variabilidade, pois as curvas granulométricas dos agregados são influenciadas pela concentração das diferentes fases (ANGULO, 2000).

O autor também se refere à absorção de água, a qual varia em função da natureza dos materiais reciclados e da faixa granulométrica. De acordo com estudo de Quebaud e Buyle-Bodin (1999 apud ANGULO, 2000), agregados de mesma composição apresentaram variações na absorção de água de 5% para os agregados graúdos a 12% para os agregados miúdos.

Portanto, conforme Angulo (2000), o conhecimento da composição e outras propriedades dos agregados reciclados pode ser o ponto inicial para a determinação da influência destas no comportamento dos concretos produzidos a partir desses resíduos. Pode-se ainda estimar o desempenho do concreto em função dessas propriedades, o que poderia despertar o interesse das empresas para a utilização do material reciclado.

A classificação dos resíduos de construção e demolição através de sua composição, ou seja, através de suas diferentes fases, não é garantia de propriedades físicas constantes. Além disso, a catação, utilizada para o controle de fases, é trabalhosa, demorada e subjetiva (ANGULO, 2005). Outra questão é a seleção das fases concreto e argamassa. Segundo Angulo (2000), encontram-se concretos muito porosos, como concretos de contrapiso, e argamassas pouco porosas, como as argamassas colantes. A diferenciação entre rocha e concreto também é um problema apontado pelo autor. Ele considera a absorção de água como a característica fundamental de diferenciação das fases dos agregados.

Em seu trabalho, Angulo (2000) utilizou a absorção de água e a massa específica seca dos agregados para sua caracterização por diferentes fases, considerando este um método objetivo para identificar as fases concreto e argamassa. Conforme o autor, a recomendação da RILEM para agregados graúdos reciclados sugere que essas propriedades sejam utilizadas para classificar e controlar a composição.

Outro método utilizado pelo autor é a análise de imagem. Complementada pelos ensaios de absorção e massa específica, pode ser empregada para determinar a composição dos agregados graúdos reciclados.

Entretanto, Angulo (2005) considera que a porosidade pode ser um parâmetro mais interessante para classificação dos agregados reciclados, uma vez que influencia a resistência mecânica e a durabilidade dos concretos. Logo, a separação por densidades pode ser uma técnica eficiente para classificação dos agregados, pois esta separa os agregados reciclados em função da massa específica aparente das partículas.

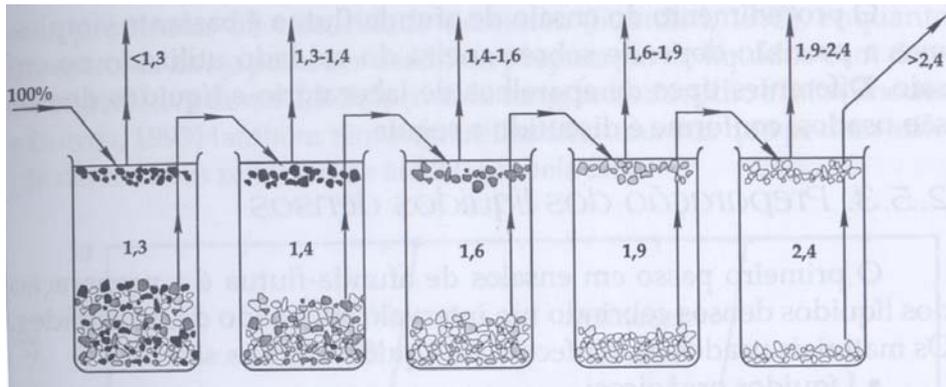
O anexo B da NBR 15116 (ABNT, 2004f) recomenda a utilização de líquidos densos, ou seja a separação por densidade, para determinar o percentual de fragmentos não-minerais presentes nos agregados reciclados.

A separação por densidades é um procedimento empregado na separação de minerais na área de Engenharia de Minas e Metalúrgica, para o beneficiamento de materiais como o carvão e o ferro. O procedimento, conhecido como ensaio de “afunda-flutua”, separa uma amostra de material em frações densimétricas com limites definidos, através da utilização de líquidos com diferentes densidades (SAMPAIO; TAVARES, 2005).

O ensaio consiste na colocação de uma amostra de material em um recipiente que contenha um líquido de densidade conhecida, determinando-se a fração flutuada e afundada. A seguir, o produto afundado deve ser colocado em líquido com uma densidade superior, e assim sucessivamente. Após cada etapa da separação, as frações afundadas e flutuadas devem ser lavadas com solvente, removendo o líquido denso aderido no material. Ao final, as amostras devem ser secas e pesadas. Para o caso do carvão mineral, o procedimento de ensaio é normalizado através da NBR 8738/1985 (SAMPAIO; TAVARES, 2005).

Os ensaios de “afunda-flutua” podem ser realizados de forma crescente ou decrescente quanto à densidade dos líquidos. Quando a maior parte da amostra for constituída de material leve, recomenda-se o método crescente. Além disso, como quanto maior a densidade do líquido, mais elevado é o seu custo, normalmente se utiliza o método crescente. A figura 1 ilustra o procedimento, pelo método crescente, utilizando cinco líquidos com densidades relativas entre 1,3 e 2,4 g/cm³.

De acordo com Sampaio e Tavares (2005), os materiais utilizados na preparação dos líquidos densos são líquidos orgânicos, soluções aquosas ou suspensões aquosas de sólidos de altas densidades. Os primeiros são líquidos homogêneos, enquanto que o terceiro é composto por partículas sólidas finas suspensas em água. Isso acarreta em uma limitação de uso desse tipo de ensaio, devido à dificuldade em manter os sólidos em suspensão.



Unidade: g/cm³

Figura 1: representação esquemática do procedimento do ensaio de afunda-flutua
(fonte: SAMPAIO; TAVARES, 2005, p55)

As soluções aquosas de sais inorgânicos são de baixo custo e toxicidade, entretanto só podem ser utilizadas na preparação de soluções com densidades relativas de até 1,2 g/cm³, quando se utiliza o cloreto de sódio (NaCl) e de até 1,75 g/cm³, quando se utiliza o cloreto de zinco (ZnCl₂). Em densidades superiores a esses valores, ocorre a saturação do meio e aumento da viscosidade, reduzindo a velocidade de sedimentação das partículas. Há também outros sais que recentemente têm sido empregados em ensaios afunda-flutua, como o cloreto de cério (CsCl) e o brometo de zinco (ZnBr₂) (SAMPAIO; TAVARES, 2005).

Normalmente para os ensaios de “afunda-flutua” são utilizados líquidos orgânicos halogenados, pois abrangem um intervalo maior de densidades. Conforme Sampaio e Tavares (2005), na prática, os líquidos comumente usados são o bromofórmio, o tetrabromoetano e o diiodometano. A tabela 6 apresenta os principais líquidos densos utilizados nos ensaios de “afunda-flutua”. Misturando o líquido denso com o solvente adequado, obtêm-se líquidos com qualquer densidade intermediária às apresentadas nesta tabela.

O ensaio pode ser realizado em béqueres ou tambores, para partículas grossas, ou em funis de separação, para partículas com tamanho intermediário. No primeiro caso, a parcela flutuada é removida do recipiente com uma peneira de malha fina e colocada em um funil contendo um papel filtro, onde o líquido denso é recuperado, podendo ser reutilizado. A fração afundada também é retirada e colocada em um outro funil com papel filtro (SAMPAIO; TAVARES, 2005).

Tabela 6: densidades de líquidos orgânicos usados em ensaios afunda-flutua

Nome	Fórmula química	Densidade relativa (g/cm ³)*	Sinônimos	Solventes
Tricloroetileno	CHCl.CCl ₂	1,46		Álcool etílico
Tetraclorometano**	CCl ₄	1,59	Tetracloroeto de carbono	Benzeno
Tetracloroetileno	CCl ₂ CCl ₂	1,62	Percloroetileno	
Pentacloroetano	CCl ₃ CHCl ₂	1,67		
Triclorobromometano	CCl ₃ Br	2,00		
Dibrometileno	CH ₂ BrCH ₂ Br	2,17	Etileno dibrometo	
Iodeto de metila	CH ₃ I	2,28		
Dibromometano	CH ₂ Br ₂	2,59	Brometo de metileno	Éter etílico ou álcool etílico
Tribromofluormetano	CBr ₃ F	2,75		
Tribromometano	CHBr ₃	2,89	Bromofórmio	Tetracloroeto de carbono, álcool etílico
Tetrabromoetano	CHBr ₂ CHBr ₂	2,96	Tetrabrometo de acetileno, tetracloroetileno, tetrabromoacetileno	Tetracloroeto de carbono, benzeno, éter etílico, acetona, álcool etílico
Diiodometano	CH ₂ I ₂	3,31	Iodeto de metileno, trietil ortofosfato, iodofórmio	Trietil ortofosfato, acetona, tetracloroeto de carbono, benzeno
Solução de Clérci**	CH ₂ (COOTI) ₂ e HCOOTI	4,20***	Mistura de malonato de tálio e formato de tálio	Água

* A 25° C em relação à água a 4° C – ela irá variar de acordo com a natureza do reagente.

** Líquidos que apresentam alta toxicidade e o seu uso requer precauções especiais de ventilação.

*** Densidade de até 5,0 podem ser atingidas a altas temperaturas.

(fonte: SAMPAIO; TAVARES, 2005, p58)

3.3.2 Concreto com agregados reciclados

Pesquisas sobre a utilização dos agregados reciclados em concretos estão se tornando cada vez mais crescentes, obtendo-se como conclusão a viabilidade de utilização em concretos das mais variadas classes de resistência. Como exemplo, pode-se citar os trabalhos de Zordan (1997), Latterza (1998), Leite (2001), Levy (2001) e Vieira (2003).

Os concretos com agregados reciclados normalmente apresentam características diferentes dos concretos com agregados convencionais, sendo que o grau de diferença depende do tipo e qualidade do agregado. Verificam-se variações ligadas à relação água/cimento, ao consumo de aglomerantes, à variabilidade na composição e a outras características físico-químicas dos agregados. Entretanto, é possível se obter concretos adequados a diversos serviços de

construção. Para isso, deve-se ter cuidado com a produção do agregado, durante a escolha do resíduo, classificação, eliminação de contaminantes, entre outros (LIMA, 1999).

A influência dos agregados reciclados em concretos pode ser avaliada em propriedades dos concretos no estado fresco e no estado endurecido. A aplicação dos agregados é definida pelo desempenho destes nessas duas fases.

3.3.2.1 Influência dos agregados reciclados no concreto no estado fresco

Com relação à influência do agregado reciclado no concreto fresco, a principal propriedade avaliada é a trabalhabilidade. Esta é uma das propriedades mais afetadas pela utilização dos agregados reciclados, devido a sua forma mais irregular, textura mais áspera e alta taxa de absorção de água. Com a diminuição da trabalhabilidade, torna-se necessário aumentar a quantidade de água na mistura, no entanto, isso pode influenciar nas propriedades do concreto no estado endurecido (LEITE, 2001).

Mansur et al. (1999) atribuíram a menor trabalhabilidade do concreto com agregado reciclado por eles produzido à superfície áspera do agregado obtido de blocos cerâmicos. Em seu estudo, Rashwan e AbouRizk (1997) obtiveram concretos com agregados reciclados de concreto com valores de trabalhabilidade reduzidos à metade em relação ao concreto de referência. Os autores afirmam que os fatores que afetaram a trabalhabilidade dos concretos com agregado reciclado foram a ausência de material fino, a alta absorção do agregado e a textura e forma dele.

Mukai et al. (1978 apud HANSEN, 1992) constataram que os concretos produzidos com agregados graúdos reciclados necessitaram 5% mais água que o concreto de referência para atingir a mesma trabalhabilidade. Utilizando agregados graúdos e miúdos reciclados, esse valor chegou a 15%.

Leite (2001) avaliou a trabalhabilidade de concretos com agregados reciclados em diferentes percentuais de substituição. A autora observou que os concretos contendo apenas agregado miúdo reciclado apresentaram os maiores valores de abatimento e que se introduzindo o agregado graúdo reciclado o abatimento tende a reduzir. Conforme a autora, a quantidade de finos nos concretos com baixas relações água/cimento e altos teores desta fração contribuiu para o maior abatimento obtido nas misturas com agregado miúdo reciclado.

Também foi observado por Leite (2001) que apesar de os concretos com agregados reciclados possuírem valores de abatimento mais baixos que os concretos de referência, ao serem vibrados

eles apresentavam aspecto satisfatório e bem-moldáveis, com exceção dos concretos com maiores teores de substituição de ambos os agregados. A autora afirma que são necessários cuidados em relação ao abatimento das misturas com agregados reciclados. Entretanto, é possível produzir concretos trabalháveis sob o ponto de vista da moldabilidade das misturas.

3.3.2.2 Influência dos agregados reciclados no concreto no estado endurecido

O agregado reciclado pode exercer influência nas propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto endurecido. As propriedades mecânicas referem-se à capacidade do concreto em resistir os esforços a que for solicitado. As propriedades de durabilidade referem-se ao seu tempo de vida útil, uma vez que efeitos químicos e mecânicos influenciam na durabilidade dos concretos.

3.3.2.2.1 *Influência dos agregados reciclados nas propriedades mecânicas do concreto*

Entre as propriedades mecânicas dos concretos, a mais estudada é a resistência à compressão. Também é interessante verificar a influência dos agregados reciclados nas resistências à tração, flexão e cisalhamento e módulo de deformação. Conforme Banthia e Chan (2000), a diferença entre as resistências dos concretos de referência e a dos concretos com agregados reciclados depende, entre outros fatores, do teor de substituição dos agregados, da característica do concreto original, da natureza e nível de contaminantes, quantidade de finos e argamassa aderida aos agregados reciclados. De acordo com pesquisa citada por Rahal (2007), concretos com 100% de agregado graúdo reciclado apresentaram um decréscimo na resistência à compressão de 9% em relação ao concreto original, enquanto que em outra pesquisa, esse número chegou a 45%.

Cabral et al. (2006) pesquisou o comportamento dos concretos produzidos com agregados reciclados variando os teores dos constituintes, concluindo que os agregados graúdos reciclados influem negativamente de maneira mais incisiva sobre a resistência à compressão. Os agregados miúdos reciclados também promovem a redução da resistência à compressão, com exceção do agregado miúdo de cerâmica vermelha, que exerce influência positiva.

Sagoe-Crentsil et al. (2001) não observaram diferença significativa entre a resistência à compressão de concretos com agregados graúdos reciclados de concreto e somente com agregado natural. Os autores realizaram uma mistura com cimento com escória de alto-forno, a qual obteve desempenho superior ao concreto de referência ainda nas primeiras idades.

Conforme Dhir et al. (1999 apud KHATIB, 2005), não foi observado decréscimo na resistência de concretos com até 20% de agregado miúdo reciclado ou 30% de agregado graúdo reciclado. Em percentuais de substituição superiores, houve um decréscimo sistemático na resistência à medida que foi aumentada a quantidade de agregado reciclado.

Leite (2001) verificou aumento da resistência à compressão de concretos contendo apenas agregados miúdos reciclados com relação ao concreto de referência. O mesmo ocorreu ao utilizar agregados miúdos combinados com agregados graúdos reciclados, para relações água/cimento mais altas.

Vieira (2003) também constatou aumento da resistência à compressão de concretos contendo apenas agregados miúdos reciclados com relação ao concreto de referência. Entretanto, para a combinação 100% de ambos os agregados reciclados, a resistência à compressão apresentou uma redução de 16% em relação ao concreto de referência, para uma relação água/cimento 0,40.

Quanto às resistências à flexão e à tração, Rao (2005 apud RAO et al., 2007) observou uma redução de 15 a 20% nas resistências de concretos com 100% de agregados reciclados, quando comparado com o concreto de referência. Katz (2003) produziu dois tipos de concretos com agregados reciclados, com cimento branco e com cimento Portland comum. O primeiro tipo apresentou resistências à flexão em torno de 23% inferiores ao respectivo concreto de referência, enquanto que o segundo tipo apresentou uma redução de 11% para os concretos produzidos com agregados que foram britados aos 3 e 28 dias de idade do concreto. Para o concreto produzido com agregado britado com 1 dia de idade, a resistência à flexão foi a mesma do concreto de referência.

Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2002) encontraram uma redução da resistência à tração inferior a 10% do concreto com agregado reciclado em comparação ao concreto de referência. Os autores relatam que estudos têm mostrado que o uso de adições no cimento como, por exemplo, a sílica ativa, ajudam a melhorar as propriedades dos concretos com agregados reciclados.

Leite (2001) constatou que o agregado graúdo reciclado reduz muito a resistência à tração do concreto, enquanto que o uso de agregado miúdo reciclado ajudou a aumentar os valores de resistência à tração. Para o módulo de deformação, somente o traço com 100% de agregado miúdo reciclado e 0% de agregado graúdo reciclado apresentou desempenho superior ao concreto de referência, sendo este aumento em torno de 10 a 15%. Os concretos contendo

apenas agregados reciclados, tanto graúdos como miúdos, apresentaram reduções no valor do módulo em torno de 24 a 38% em relação ao concreto de referência.

Os concretos produzidos por Katz (2003) apresentaram módulos de deformação entre 42 e 47% inferiores aos respectivos concretos de referência. Oliveira e Vazquez (1996) observaram que o módulo de elasticidade dos concretos com agregado reciclado produzidos por eles equivaleu a 75% do concreto com agregado natural. Os autores produziram concretos apenas com agregados graúdos reciclados, sendo estes em diferentes condições: secos, semi-saturados e saturados em água.

Os diferentes resultados obtidos nas pesquisas devem-se não apenas à variabilidade na composição dos RCD, como também ao equipamento de britagem utilizado, percentuais de substituição empregados, realização ou não da pré-molhagem, utilização ou não de aditivo, tipo de cimento, entre outros fatores. As diferenças nos procedimentos experimentais dificultam a realização de uma comparação de resultados entre as diversas pesquisas realizadas.

3.3.2.2.2 Influência dos agregados reciclados nas propriedades de durabilidade do concreto

Muitos estudos têm sido realizados para melhor entender o efeito dos agregados reciclados na durabilidade dos concretos. Há um consenso na bibliografia da maior permeabilidade do material reciclado e, dessa forma, alguns pesquisadores têm buscado melhorar o desempenho dos concretos com RCD utilizando cinza volante, sílica ativa e outras adições.

De acordo com Banthia e Chan (2000), a permeabilidade e a absorção de água do concreto com agregado reciclado do concreto são aumentadas devido à argamassa aderida no agregado, afetando a durabilidade do concreto.

Sagoe-Crentsil et al. (2001) observaram que concretos contendo agregados graúdos reciclados apresentaram absorções de água em média 25% maiores que o concreto de referência. Os autores afirmam que a argamassa residual aderida às partículas do agregado reciclado serve como um condutor potencial da umidade. Na pesquisa eles também avaliaram a carbonatação, concluindo que os concretos com agregados reciclados apresentam profundidades de carbonatação de 1,3 a 2,5 vezes maiores que o concreto de referência.

Levy e Helene (2004) estudaram a carbonatação de concretos com 20, 50 e 100% de substituição dos agregados naturais por agregados reciclados de concreto e de cerâmica. Os autores observaram que a profundidade de carbonatação dos concretos diminuiu quando os percentuais de substituição empregados foram 20 e 50% para agregados reciclados de concreto.

Entretanto, para agregados reciclados de cerâmica, isso só foi observado quando 100% do agregado foi substituído. Dessa forma, os autores concluíram que a profundidade de carbonatação depende principalmente da composição química do concreto e não somente dos aspectos físicos dos agregados.

Evangelista e Brito (2006) realizaram ensaios de carbonatação e penetração de cloretos em concretos contendo agregados miúdos reciclados em diferentes percentuais de substituição. Os resultados comprovam que a substituição total do agregado miúdo natural pelo reciclado pode causar sérios problemas, entretanto, para taxas de substituições menores, 30% por exemplo, o uso é perfeitamente viável.

Shayan e Xu (2003) realizaram ensaios de penetração de cloretos em concretos com agregados graúdos e miúdos reciclados. Os autores constataram que a inclusão do agregado miúdo reciclado causa aumento da penetração de cloretos, indicando que este tipo de agregado deve ser usado com cuidado em ambientes agressivos.

Vieira (2003) avaliou o comportamento dos concretos produzidos com agregados reciclados sob o processo de corrosão da armadura iniciada por ação de íons cloreto, realizando ensaios de resistência de polarização e potencial de corrosão. A autora concluiu que o uso do agregado reciclado no concreto não afeta a durabilidade do concreto frente à corrosão das armaduras, desde que em percentuais convenientemente dosados, e exceto quando agregados graúdos e miúdos reciclados são inseridos de forma total numa mesma mistura. Também foi considerado insatisfatório o desempenho dos concretos utilizando apenas agregado graúdo reciclado em altas relações água/cimento.

Da mesma forma que as propriedades mecânicas, a variabilidade de resultados das propriedades de durabilidade também são resultado de diferenças nos procedimentos experimentais adotados, o que dificulta a realização de comparações entre trabalhos.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Visando alcançar os objetivos propostos, apresentados no item 1.1 deste trabalho, o programa experimental elaborado contempla ensaios de laboratório, tanto com os agregados reciclados como com os concretos produzidos com estes.

4.1 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

A utilização de projeto de experimentos permite a definição de uma seqüência de ensaios econômica e eficiente, traduzindo os objetivos preestabelecidos. Através do projeto de experimentos também é possível realizar uma avaliação estatística dos resultados, maximizando as informações obtidas (RIBEIRO; CATEN, 2001).

As variáveis de resposta dependem de um conjunto de fatores experimentais que podem afetar os seus resultados, ou seja, as variáveis independentes. Visando correlacionar os valores de algumas propriedades dos concretos com as características dos agregados de cada coleta, foram definidas as seguintes variáveis de resposta:

- resistência à compressão axial;
- resistência à tração por compressão diametral;
- módulo de deformação;
- absorção de água por imersão do concreto.

Determinadas as variáveis de resposta, foram definidas as variáveis independentes. As variáveis independentes ou fatores controláveis são aquelas que podem ser alteradas e possivelmente têm algum efeito sobre as variáveis de resposta. Estão relacionadas abaixo estas variáveis:

- origem dos resíduos de construção e demolição, num total de três cidades do estado do Rio Grande do Sul;
- relação água/cimento (a/c): foram escolhidos três níveis de relação água/cimento iniciais, sendo estes 0,50; 0,60 e 0,70;
- percentuais de substituição dos agregados: a combinação de substituição dos agregados variou de 0% a 100 % tanto para o agregado graúdo reciclado (AGR) quanto para o agregado miúdo reciclado (AMR), cujos percentuais empregados foram 0%, 50% e 100%.

A primeira variável citada, a origem, está relacionada a um dos objetivos do trabalho, de determinar parâmetros de controle para a variabilidade dos agregados reciclados. Já as duas últimas variáveis determinaram o número de traços que deveriam ser realizados para cada coleta de material. Na figura 2 apresentam-se esquematicamente as variáveis independentes.

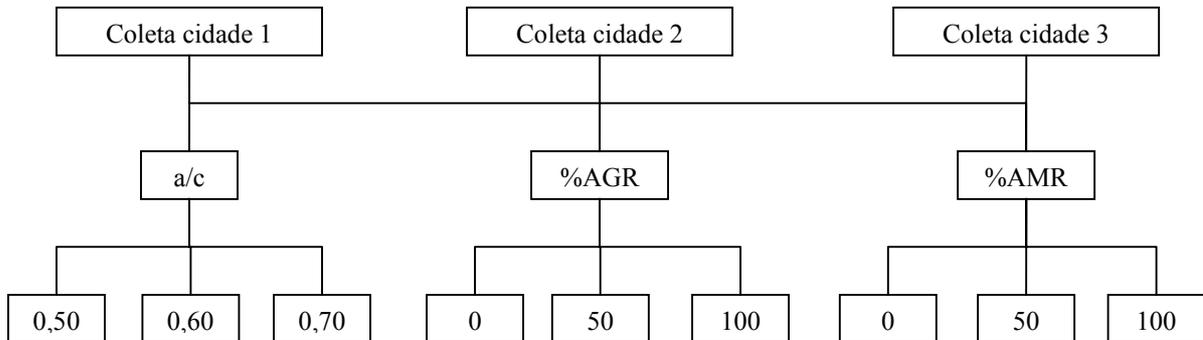


Figura 2: representação esquemática das variáveis independentes

Portanto, considerando que há três fatores controláveis (relação a/c, %AGR e %AMR), cada um com três níveis, resultou em 27 combinações para cada origem do resíduo (três cidades), ou seja, deveriam ser realizados 81 traços. Em função de limitações de tempo e custo, adotou-se um projeto fatorial fracionado, a fim de reduzir o número de traços a serem executados e viabilizar a execução da parte experimental.

Para o fracionamento do experimento, o esquema adotado para a escolha dos pontos ensaiados foi o Projeto Composto de Segunda Ordem (PCSO), que é a soma de um experimento 2k (tipo cubo), mais uma estrela e o ponto central. A figura 3 apresenta o esquema do projeto escolhido.

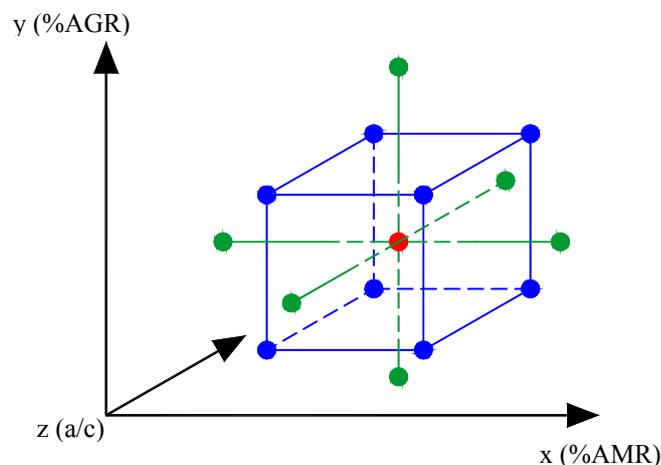


Figura 3: esquema do Projeto Composto de Segunda Ordem

Dessa forma, para cada coleta realizada, foram executados 15 traços obtidos no projeto fracionado, conforme apresentados na tabela 7.

Tabela 7: combinações analisadas no programa experimental

Experimento nº	a/c (inicial)	%AMR	%AGR	Parte do PCSO
1	0,50	0	0	CUBO
2	0,50	100	0	
3	0,50	0	100	
4	0,50	100	100	
5	0,70	0	0	
6	0,70	100	0	
7	0,70	0	100	
8	0,70	100	100	
9	0,50	50	50	ESTRELA
10	0,70	50	50	
11	0,60	0	50	
12	0,60	50	100	
13	0,60	100	50	
14	0,60	50	0	
15	0,60	50	50	PONTO CENTRAL

Também foram definidos alguns fatores que deveriam ser mantidos constantes durante a execução do experimento, sendo eles:

- idade do concreto: foi estabelecida como idade padrão para o estudo de todas as propriedades mecânicas os 28 dias. Para a absorção de água foi estabelecido o início do ensaio aos 63 dias, sendo concluído aos 69 dias;
- pré-umidificação dos agregados reciclados: esse procedimento foi adotado visando evitar que o agregado reciclado absorvesse parte da água de amassamento do concreto, durante a mistura dos materiais, fato que prejudicaria a trabalhabilidade do mesmo e iria mascarar o real valor de relação a/c. Dessa forma, os agregados foram pré-molhados de acordo com as curvas de absorção verificadas durante a caracterização dos materiais.

Definidas as variáveis a serem analisadas e os traços a serem realizados, teve início a execução do programa experimental, o qual consistiu das seguintes etapas:

- coletas dos RCD;
- caracterização dos RCD;
- beneficiamento dos RCD;
- caracterização dos agregados naturais e reciclados;

- estudo da dosagem do concreto;
- execução dos concretos com agregados reciclados;
- avaliação das propriedades escolhidas.

4.2 COLETA DAS AMOSTRAS DE RESÍDUO

Considerando que o objetivo deste trabalho é verificar parâmetros de controle da variabilidade dos RCD, foram realizadas coletas em três cidades da Região Metropolitana de Porto Alegre: São Leopoldo, Porto Alegre e Novo Hamburgo. Foi realizada uma coleta em cada cidade, todas no mesmo mês. Cada amostra foi constituída de vinte sacos, totalizando aproximadamente 500 kg por coleta. Para melhor visualização dos dados apresentados neste trabalho, as coletas serão identificadas como Coleta 1 (material de São Leopoldo), Coleta 2 (material de Porto Alegre) e Coleta 3 (material de Novo Hamburgo).

Em Porto Alegre, os resíduos foram coletados no Aterro de Inertes Serraria, situado na Zona Sul da cidade. Os resíduos provenientes de Novo Hamburgo foram coletados na Central de Resíduos Inertes do Bairro Rondônia. Os resíduos provenientes de São Leopoldo foram coletados no aterro municipal.

As coletas das amostras foram realizadas retirando-se o resíduo da base, do meio e do topo das pilhas. Entretanto, este procedimento não pôde ser realizado na coleta 2, no aterro de Porto Alegre, pois as cargas de materiais recebidas no local são espalhadas ao longo do terreno e imediatamente aterradas. Dessa forma, quando solicitado, foi deixada separada uma carga de resíduos de construção e demolição recebidos, resultando em apenas uma pilha de RCD. Nesta cidade, a coleta foi feita de forma aleatória.

4.3 COMPOSIÇÃO DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Após cada coleta de resíduo, efetuou-se a caracterização conforme a sua composição. O processo de verificação da composição foi feito manualmente, identificando os diversos materiais constituintes do RCD.

A caracterização foi realizada para uma amostra de material de cada coleta, obtida por quarteamento, conforme procedimento descrito na NBR NM 27 (ABNT, 2001b). Durante o processo de verificação da composição, e também no restante do material não caracterizado,

foram excluídas impurezas e materiais que pudessem comprometer a qualidade do concreto, tais como madeira, metal, gesso, plástico e papel. Além disso, visando eliminar possíveis quantidades de matéria orgânica e solos argilosos presentes nas amostras coletadas, a parcela fina foi peneirada em peneira de malha #4,8 mm, conforme recomendação de Hansen (1992).

Na análise da composição do resíduo foram considerados os seguintes constituintes:

- concreto: materiais compostos por cimento, areia e brita;
- argamassa: material constituído de cimento e/ou cal e areia, onde não se observe a presença de agregado graúdo ou pedrisco;
- cerâmica vermelha: material cerâmico constituído de blocos, tijolos e telhas;
- cerâmica branca e cerâmica para revestimento: material cerâmico empregado em revestimentos cerâmicos de piso e parede, ladrilhos e louças sanitárias. Neste trabalho, será identificada apenas como cerâmica branca;
- rochas naturais: qualquer fragmento de rocha que não apresente nenhum tipo de material aglomerante aderido;
- impurezas: partículas de materiais, como madeira, metal, gesso, plástico e amianto;
- finos: material passante na peneira de malha #4,8 mm, que pode conter matéria orgânica ou solos argilosos.

4.4 BENEFICIAMENTO DO RESÍDUO

Depois da etapa de caracterização do resíduo segundo sua composição, foi feita a britagem do material, realizada no britador de mandíbulas da CIENTEC – Fundação de Ciência e Tecnologia – situada em Porto Alegre/RS. Nessa fase, os resíduos foram transformados em agregados.

Posteriormente todo material obtido foi colocado em peneirador mecânico, separando-se os agregados miúdos dos agregados graúdos. O material passante na peneira de malha #25 mm e retido na peneira de malha #4,8 mm foi classificado como agregado graúdo (AGR) e o material passante na peneira de malha #4,8 mm foi considerado agregado miúdo (AMR). O material retido na peneira de malha #25 mm foi novamente britado e peneirado, até todo material passar nesta peneira.

Após o peneiramento dos agregados reciclados resultantes da coleta 3, constatou-se que a quantidade de agregado miúdo gerado não seria suficiente para executar todas as combinações propostas para o programa experimental. Para obter a quantidade necessária de agregados miúdos, o material retido na peneira de malha #25 mm foi britado no britador de rolo do Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LTM-UFRGS).

O material foi passado três vezes no britador de rolo, até ser obtida a granulometria desejada. Os finos resultantes foram peneirados, visando eliminar alguma partícula de dimensão superior a 4,8 mm. O material fino resultante dessa britagem foi misturado com o resultante da britagem no britador de mandíbulas, possibilitando uma correta caracterização do agregado miúdo resultante.

4.5 MATERIAIS UTILIZADOS – SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO

4.5.1 Cimento

Para a produção dos concretos foi utilizado o cimento Portland CP IV 32 – RS. Normalmente as pesquisas com resíduos de construção e demolição utilizam cimento sem adição, visando não influenciar nos resultados nos ensaios. No entanto, foi utilizado o cimento CP IV, pois este é facilmente encontrado e de ampla utilização no estado.

As características químicas, físicas e mecânicas do cimento utilizado estão apresentadas nas tabelas 8 e 9. Os dados foram fornecidos pelo fabricante, com exceção da massa específica, que foi determinada através da NBR NM 23 (ABNT, 2001a) e da resistência à compressão, determinada através da NBR 7215 (ABNT, 1996).

Tabela 8: características químicas do cimento utilizado na pesquisa

Propriedades químicas		
Composição química	Resultado* (%)	Limites da NBR 5736 (ABNT, 1992)
Al ₂ O ₃	9,88	-
SiO ₂	35,27	-
Fe ₂ O ₃	3,81	-
CaO	38,14	-
MgO	4,7	≤ 6,5
SO ₃	2,75	≤ 4,0
CO ₂	2,6	≤ 3,0
K ₂ O	1,11	-
Na ₂ O	0,14	-
Perda ao fogo	3,74	≤ 4,5
Resíduos insolúveis	32,25	-

* dados do fabricante

Tabela 9: características físicas e mecânicas do cimento utilizado na pesquisa

Propriedades físicas e mecânicas			
Propriedades		Resultado	Limites da NBR 5736 (ABNT, 1991)
Tempo de pega	Início (min)*	225	≥ 1 h
	Final (min)*	305	≤ 12 h
Expansibilidade a quente		0	≤ 5
Água de consistência normal (%)		34,4	-
Blaine (cm ² /g)*		4765	-
Material retido #200 mesh (%)*		0,5	-
Material retido #325 mesh (%)*		3,4	-
Massa específica (g/cm ³)		2,71	-
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	17,6	$\geq 10,0$
	7 dias	23,6	$\geq 20,0$
	28 dias	32,4	$\geq 32,0$

* dados do fabricante

4.5.2 Agregados

Para a produção dos concretos foram utilizados agregados naturais e reciclados.

Agregado miúdo natural: foi utilizada areia quartzosa média. O material foi previamente seco ao ar e peneirado na peneira de malha #4,8 mm, retirando-se toda fração superior a este valor.

Agregado miúdo reciclado: obtido pela britagem e peneiramento do resíduo de construção e demolição coletado, utilizando-se a fração passante na peneira de malha #4,8 mm (figura 4a).

Agregado graúdo natural: foi empregada brita de origem basáltica. O agregado foi previamente lavado para retirar materiais pulverulentos ou outras impurezas que poderiam estar aderidas a este, e colocado para secar ao ar.

Agregado graúdo reciclado: assim como o agregado miúdo reciclado, foi obtido através da britagem e peneiramento do resíduo coletado. Foi empregado o material passante na peneira de malha #25 mm e retido na peneira de malha #4,8 mm (figura 4b). O agregado não foi lavado devido à sua facilidade de desagregação.



Figura 4: agregados reciclados: (a) agregado miúdo; (b) agregado graúdo

4.5.2.1 Caracterização dos agregados

4.5.2.1.1 *Composição granulométrica*

A análise granulométrica fornece dados importantes para a dosagem do concreto, como por exemplo, o módulo de finura. Quanto maior o módulo de finura dos agregados, mais graúdo é o agregado (NEVILLE, 1997). A granulometria do agregado influencia na trabalhabilidade e custo do concreto. A composição granulométrica dos agregados, tanto naturais como reciclados, foi determinada de acordo com as recomendações da NBR NM 248 (ABNT, 2003c).

4.5.2.1.2 *Massa específica e massa unitária*

O conhecimento da massa específica dos agregados permite calcular o consumo de materiais utilizados para a produção do concreto. Quando se trabalha com agregados reciclados é fundamental conhecer essa propriedade para uma correta dosagem do concreto, pois os materiais naturais e reciclados possuem diferentes valores de massa específica, logo a quantidade de material requerida na mistura é diferente.

Conforme a NBR NM 52 (ABNT, 2003a), a massa específica é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, incluindo os vazios internos do mesmo. Neste trabalho, a massa específica do agregado miúdo natural foi determinada de acordo com o método preconizado na norma NBR NM 52 (ABNT, 2003a). O agregado graúdo natural teve a sua massa específica determinada segundo procedimento descrito na norma NBR NM 53 (ABNT, 2003b). A massa específica do agregado miúdo reciclado foi determinada de acordo com a norma NBR 9776 (ABNT, 1987), que utiliza o frasco de Chapman; e pelo método de Neville (1995), modificado

por Leite (2001). O agregado graúdo reciclado teve sua massa específica determinada de acordo com a mesma norma que o agregado natural, e também pelo método de Leite (2001).

O método de ensaio sugerido por Leite (2001), descrito em forma de proposta de norma, utiliza um picnômetro ou balão volumétrico com capacidade de 1000 ml, balança com precisão mínima de 0,1 g e bomba de vácuo. O procedimento de execução do ensaio está apresentado a seguir:

- secar a amostra em estufa por 24 horas;
- resfriar a amostra em temperatura ambiente e pesar uma quantidade entre 800 e 1000 g, determinando-a (C);
- colocar água no recipiente de vidro e em seguida adicionar a amostra de material. A quantidade de água deve ser suficiente para deixar o agregado submerso;
- deixar o conjunto em repouso e coberto por 24 horas;
- aplicar vácuo por pelo menos 15 minutos, agitando o recipiente para permitir a saída de ar entre os grãos do agregado;
- acrescentar água ao recipiente até enchê-lo completamente e cobri-lo com uma placa de vidro. Determinar a massa desse conjunto com a placa de vidro (A);
- retirar o material do recipiente, lavá-lo e enchê-lo com água. Cobrir o recipiente com a placa de vidro e determinar a massa desse conjunto (B).

A massa específica do agregado é determinada a partir da equação 1.

$$\gamma = \frac{C}{B - A + C} \quad (\text{equação 1})$$

onde:

γ (kg/dm³ ou g/cm³) = massa específica do agregado

A (g) = massa da amostra + recipiente + água + placa de vidro

B (g) = massa do recipiente + água + placa de vidro

C (g) = massa da amostra seca em estufa

Para fazer a compensação de massas para a dosagem do concreto, a qual utiliza a massa específica dos agregados, utilizou-se para os agregados reciclados os resultados obtidos pelo método de Leite (2001). Optou-se por esse método, em função dos resultados encontrados por Cabral et al. (2005), que o comparou com os métodos normalizados, concluindo que o método de Leite (2001) fornece resultados mais coerentes para os agregados reciclados.

A massa unitária é definida, de acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2002), como a massa da unidade de volume do material a granel, nas condições de compactação e umidade em que o ensaio é realizado. Ela foi determinada para os agregados naturais e reciclados, de acordo com a prescrição desta norma.

4.5.2.1.3 Absorção de água dos agregados reciclados

Normalmente os agregados naturais apresentam baixas taxas de absorção de água, não sendo considerada sua influência na produção dos concretos. Nos agregados miúdos naturais normalmente utilizados os valores de taxa de absorção variam de 1 a 2,5%, sendo que o efeito desta absorção não é considerado, uma vez que o processo ocorre de forma lenta, pois os materiais possuem baixa porosidade. Por isso, não foi determinada a taxa de absorção dos agregados naturais.

No entanto, os agregados reciclados são muito porosos, absorvendo muita água, logo é fundamental determinar a taxa de absorção destes agregados. Dessa forma, é possível saber a quantidade de água que deve ser colocada nos agregados minutos antes da sua utilização na concretagem, evitando redução na relação água/cimento, problemas no abatimento e na moldabilidade do concreto devido à falta de água.

A absorção de água dos agregados miúdos reciclados foi determinada através do procedimento descrito na norma NBR NM 30 (ABNT, 2001c) e pelo método proposto por Leite (2001). A absorção de água dos agregados graúdos reciclados foi obtida apenas pelo método proposto por Leite (2001), pois o procedimento apresentado na norma NBR NM 53 (ABNT, 2003b) prevê uma secagem superficial do agregado, que poderia ocasionar perda de material por desagregação.

O método de ensaio sugerido por Leite (2001) permite obter a curva de absorção do agregado, apresentando a taxa de absorção deste ao longo do tempo. A partir da análise dessa curva é determinado o valor da taxa de absorção que deve ser utilizado para a pré-molhagem do agregado antes da concretagem. O procedimento utiliza um recipiente com fundo e tampa revestidos com uma malha de 0,044 mm de abertura. A amostra deve ser seca em estufa por 24 horas e resfriada à temperatura ambiente. A seguir, deve ser colocada no recipiente e submersa em água para verificação do ganho de massa, conforme a figura 5. Esse monitoramento é feito com auxílio de uma balança hidrostática com precisão de 0,1 g ou com uma balança comum

adaptada de forma a determinar a massa submersa do conjunto. Deve-se realizar o monitoramento num período de 24 horas.



Figura 5: execução do ensaio de absorção dos agregados reciclados

A taxa de absorção dos materiais foi determinada pelas equações 2 e 3, através das médias da taxa de absorção seca e da taxa de absorção submersa. Devem ser feitos dois ensaios para cada amostra de material.

$$A_{seca} (\%) = \frac{M_{sub-f} - M_{sub-0}}{M_{seca}} \quad (\text{equação 2})$$

$$A_{sub} (\%) = \frac{M_{sub-f} - M_{sub-0}}{M_{sub-0}} \quad (\text{equação 3})$$

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 gramas

M_{sub-0} = massa do material submerso no instante inicial, em gramas

M_{seca} = massa do material seco em estufa, em gramas

4.5.2.2 Separação densitária dos agregados reciclados

Visando verificar se a classificação dos agregados reciclados por densidades pode ser utilizada como parâmetro de controle desse material, foi realizado o ensaio para classificação densitária. Esta foi realizada baseando-se no procedimento do ensaio de afunda-flutua, explicado no sub-

item 3.3.1.2 e no procedimento para separação densitária dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição elaborado por Carrijo (2005) e Angulo (2005). Neste trabalho, o ensaio foi realizado no Laboratório de Processamento Mineral (LAPROM) da UFRGS, seguindo-se também os procedimentos adotados para o ensaio nesse laboratório.

As faixas de densidade estabelecidas foram baseadas na pesquisa de Angulo (2005), que adotou, em um dos procedimentos realizados, as densidades 1,9; 2,2 e 2,5 g/cm³. De acordo com o autor, a parcela flutuada na solução com densidade 1,9 g/cm³ poderia concentrar a cerâmica vermelha e a flutuada na solução com densidade 2,2 g/cm³ concentraria a argamassa. Na solução com densidade 2,5 g/cm³ poderiam ser separadas partículas de concreto (flutuadas) e de rochas naturais (afundadas).

No caso deste trabalho utilizou-se ao invés da densidade 2,5 g/cm³, solução com densidade 2,4 g/cm³. Para monitorar a densidade da solução utiliza-se um densímetro, o qual é mergulhado em uma proveta com a solução em repouso. O densímetro é um instrumento que se baseia no empuxo arquimediano. Constitui-se de um bulbo cilíndrico de vidro, selado e preenchido por lastro, contendo uma haste com escala, que dá o valor da densidade da suspensão na cota do centro de massa do densímetro, em função da fração de submergência (LUZ; LIMA, 2001).

Tendo em vista que no laboratório no qual foi realizado o ensaio não havia densímetro que alcançasse densidade superior a 2,4 g/cm³ e densímetros acima desta densidade não são mais fabricados no país, necessitando ser importados, optou-se trabalhar nessa máxima densidade possível. Poderia ter sido utilizado o bromofórmio puro, no entanto, como sua densidade é de 2,89 g/cm³, não seria possível separar as rochas dos concretos, pois haveria um intervalo muito grande de densidades.

O procedimento de ensaio iniciou com a colocação de determinada quantidade do agregado em um recipiente (béquer e/ou tambor) que continha solução de bromofórmio com o solvente adequado, na densidade inicial estipulada de 1,9 g/cm³. Cabe salientar que, devido à toxicidade do bromofórmio, os recipientes de ensaio foram colocados em capela para a exaustão dos gases tóxicos, conforme a figura 6. Em um primeiro momento, agitaram-se as partículas com bastão de vidro para a definição das parcelas afundadas e flutuadas. Entretanto, percebeu-se que a maioria das partículas, geralmente de cerâmica vermelha, após alguns segundos sem agitação, afundavam. Sabe-se que os agregados reciclados, especialmente aqueles originados de cerâmica vermelha, são altamente porosos. Portanto, é provável que estas partículas tenham absorvido o bromofórmio, alterando a sua verdadeira densidade.



Figura 6: capela para exaustão de gases tóxicos contendo os recipientes de ensaio

Dessa forma, o procedimento foi recommençado, colocando-se uma nova amostra no recipiente e, após o tempo aproximado de 10 segundos, as partículas flutuadas foram retiradas, sendo colocadas em um funil de vidro com papel filtro e, em seguida, a parcela afundada também foi retirada, repetindo o procedimento em outro papel. Após a recuperação do líquido denso, ambos os materiais foram colocados para secar. Após a secagem, a fração afundada foi colocada novamente no recipiente, contendo a solução de bromofórmio com densidade $2,2 \text{ g/cm}^3$. A figura 7 mostra partículas flutuadas de agregados miúdos e grãos durante o procedimento de ensaio.

O mesmo procedimento foi realizado e, finalmente, o material foi colocado em solução com densidade $2,4 \text{ g/cm}^3$. Ao final do ensaio, os materiais separados nas faixas de densidade adotadas foram secos em estufa e pesados. A figura 8 representa esquematicamente o procedimento realizado.



(a)



(b)

Figura 7: fração flutuada em uma determinada densidade; (a) agregado miúdo; (b) agregado grão

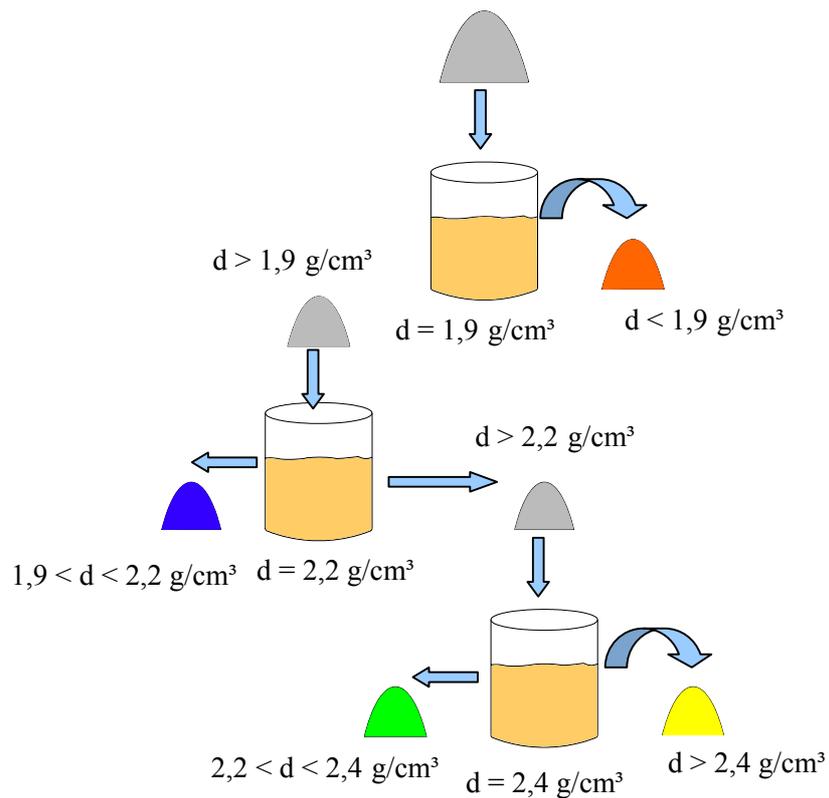


Figura 8: representação esquemática da separação por densidades realizada

Após a secagem e pesagem dos materiais já separados, as amostras de agregados graúdos foram classificadas por fases, através da catação. Dessa forma, identificaram-se as fases que compõem cada faixa de densidade.

4.5.3 Água

A água utilizada na pesquisa foi água com condições de potabilidade proveniente da rede de abastecimento público.

4.6 DOSAGEM EXPERIMENTAL

Para a produção dos concretos adotou-se o método de dosagem IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992). O método consiste em ajustar o teor ideal de argamassa para um traço intermediário e depois executar no mínimo mais dois traços, um mais pobre e outro mais rico em cimento. Deve-se fixar um valor de abatimento e devem ser moldados corpos-de-prova para determinação da resistência à compressão. Com esses resultados, é elaborado o diagrama de

dosagem, que correlaciona resistência à compressão, relação água/cimento, traço unitário, em massa, e consumo de cimento.

4.6.1 Ajuste do teor ideal de argamassa

A determinação do teor ideal de argamassa foi feita utilizando-se o traço 1:5 em massa, empregando agregados naturais. Com o concreto produzido com este ajuste a mistura obteve um teor ideal de argamassa de 52% e uma relação água/cimento de 0,55. A seguir, foi feito um traço mais rico (1:3,5) e um mais pobre (1:6,5). A trabalhabilidade do concreto foi determinada através do ensaio de abatimento descrito na NBR NM 67 (ABNT, 1998a), sendo que esta foi fixada em 100 ± 20 mm. Foram moldados seis corpos-de-prova por traço, para a realização do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias, para a obtenção do diagrama de dosagem, o qual está apresentado na figura 9.

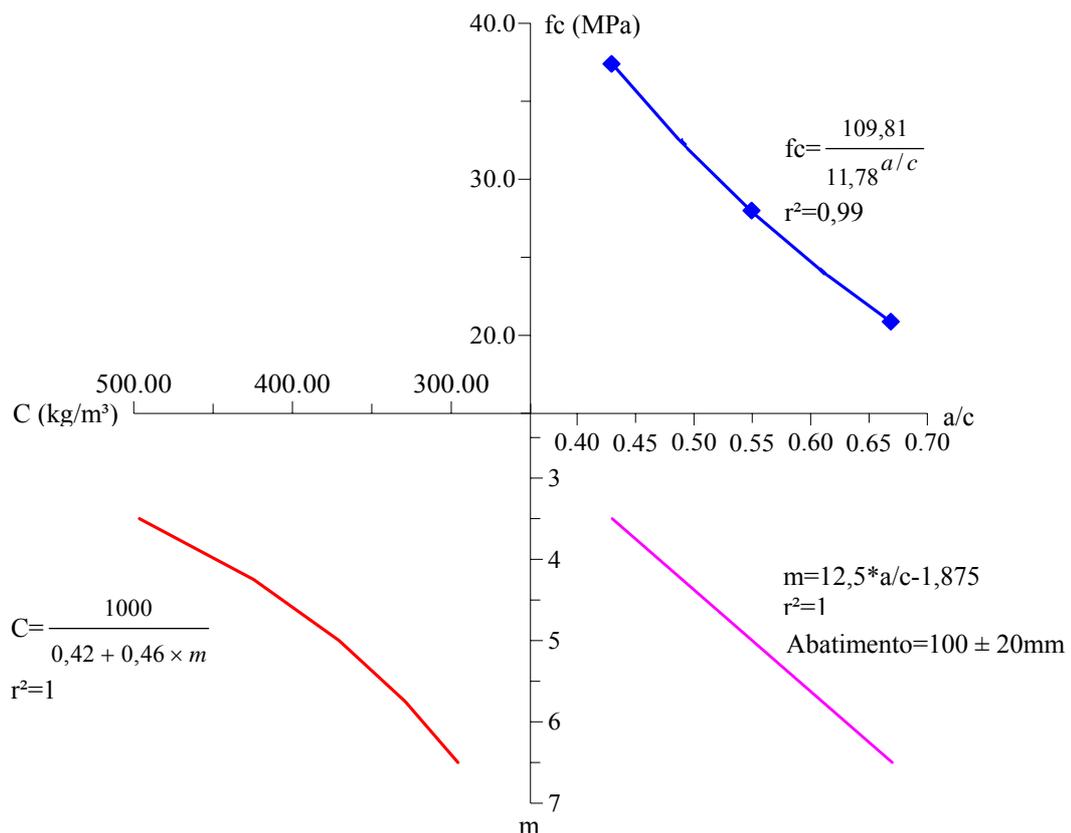


Figura 9: diagrama de dosagem

4.6.2 Definição dos traços

Os traços do concreto de referência foram estabelecidos a partir do diagrama de dosagem, definindo-se seus traços unitários. Os traços para a produção do concreto com agregados reciclados foram determinados a partir dos traços unitários do concreto de referência, levando-se em conta o percentual de substituição e a compensação dos volumes pela redução das massas dos agregados reciclados. A compensação foi calculada através da equação 4, que considera os valores de massa específica dos materiais. Como o material reciclado de cada coleta apresentou diferentes valores de massa específica, essa compensação foi realizada para a definição dos traços de cada coleta.

$$M_{ar} = M_{an} \times \frac{\gamma_{ar}}{\gamma_{an}} \quad (\text{equação 4})$$

onde:

M_{ar} = massa do agregado reciclado (kg)

M_{an} = massa do agregado natural (kg)

γ_{ar} = massa específica do agregado miúdo reciclado (kg/dm³)

γ_{na} = massa específica do agregado miúdo natural (kg/dm³)

Os traços unitário e em massa, para os materiais de cada coleta, estão apresentados nas tabelas 10, 11 e 12.

Tabela 10: traços unitários e em massa utilizados na produção dos concretos com os agregados reciclados provenientes da Coleta 1 (São Leopoldo)

Traço nº	a/c (inicial)	Traços unitários			% AMR	% AGR	Traços em massa			
		m	a	p			Areia natural (kg)	Areia reciclada (kg)	Brita natural (kg)	Brita reciclada (kg)
1	0,50	4,38	1,80	2,58	0	0	13,95	0,00	20,00	0,00
2	0,50	4,38	1,80	2,58	100	0	0,00	12,78	20,00	0,00
3	0,50	4,38	1,80	2,58	0	100	13,95	0,00	0,00	16,84
4	0,50	4,38	1,80	2,58	100	100	0,00	12,78	0,00	16,84
5	0,70	6,88	3,10	3,78	0	0	16,40	0,00	20,00	0,00
6	0,70	6,88	3,10	3,78	100	0	0,00	15,02	20,00	0,00
7	0,70	6,88	3,10	3,78	0	100	16,40	0,00	0,00	16,84
8	0,70	6,88	3,10	3,78	100	100	0,00	15,02	0,00	16,84
9	0,50	4,38	1,80	2,58	50	50	6,98	6,79	10,00	8,42
10	0,70	6,88	3,10	3,78	50	50	8,20	7,51	10,00	8,42
11	0,60	5,63	2,45	3,18	0	50	15,41	0,00	10,00	8,42
12	0,60	5,63	2,45	3,18	50	100	7,71	7,06	0,00	16,84
13	0,60	5,63	2,45	3,18	100	50	0,00	14,11	10,00	8,42
14	0,60	5,63	2,45	3,18	50	0	7,71	7,06	20,00	0,00
15	0,60	5,63	2,45	3,18	50	50	7,71	7,06	10,00	8,42

Tabela 11: traços unitários e em massa utilizados na produção dos concretos com os agregados reciclados provenientes da Coleta 2 (Porto Alegre)

Traço nº	a/c (inicial)	Traços unitários			% AMR	% AGR	Traços em massa			
		m	a	p			Areia natural (kg)	Areia reciclada (kg)	Brita natural (kg)	Brita reciclada (kg)
1	0,50	4,38	1,80	2,58	0	0	13,95	0,00	20,00	0,00
2	0,50	4,38	1,80	2,58	100	0	0,00	13,40	20,00	0,00
3	0,50	4,38	1,80	2,58	0	100	13,95	0,00	0,00	18,00
4	0,50	4,38	1,80	2,58	100	100	0,00	13,40	0,00	18,00
5	0,70	6,88	3,10	3,78	0	0	16,40	0,00	20,00	0,00
6	0,70	6,88	3,10	3,78	100	0	0,00	15,74	20,00	0,00
7	0,70	6,88	3,10	3,78	0	100	16,40	0,00	0,00	18,00
8	0,70	6,88	3,10	3,78	100	100	0,00	15,74	0,00	18,00
9	0,50	4,38	1,80	2,58	50	50	6,98	6,70	10,00	9,00
10	0,70	6,88	3,10	3,78	50	50	8,20	7,87	10,00	9,00
11	0,60	5,63	2,45	3,18	0	50	15,41	0,00	10,00	9,00
12	0,60	5,63	2,45	3,18	50	100	7,71	7,40	0,00	18,00
13	0,60	5,63	2,45	3,18	100	50	0,00	14,79	10,00	9,00
14	0,60	5,63	2,45	3,18	50	0	7,71	7,40	20,00	0,00
15	0,60	5,63	2,45	3,18	50	50	7,71	7,40	10,00	9,00

Tabela 12: traços unitários e em massa utilizados na produção dos concretos com os agregados reciclados provenientes da Coleta 3 (Novo Hamburgo)

Traço nº	a/c (inicial)	Traços unitários			% AMR	% AGR	Traços em massa			
		m	a	p			Areia natural (kg)	Areia reciclada (kg)	Brita natural (kg)	Brita reciclada (kg)
1	0,50	4,38	1,80	2,58	0	0	13,95	0,00	20,00	0,00
2	0,50	4,38	1,80	2,58	100	0	0,00	14,09	20,00	0,00
3	0,50	4,38	1,80	2,58	0	100	13,95	0,00	0,00	18,60
4	0,50	4,38	1,80	2,58	100	100	0,00	14,09	0,00	18,60
5	0,70	6,88	3,10	3,78	0	0	16,40	0,00	20,00	0,00
6	0,70	6,88	3,10	3,78	100	0	0,00	16,56	20,00	0,00
7	0,70	6,88	3,10	3,78	0	100	16,40	0,00	0,00	18,60
8	0,70	6,88	3,10	3,78	100	100	0,00	16,56	0,00	18,60
9	0,50	4,38	1,80	2,58	50	50	6,98	7,05	10,00	9,30
10	0,70	6,88	3,10	3,78	50	50	8,20	8,28	10,00	9,30
11	0,60	5,63	2,45	3,18	0	50	15,41	0,00	10,00	9,30
12	0,60	5,63	2,45	3,18	50	100	7,71	7,79	0,00	18,60
13	0,60	5,63	2,45	3,18	100	50	0,00	15,56	10,00	9,30
14	0,60	5,63	2,45	3,18	50	0	7,71	7,79	20,00	0,00
15	0,60	5,63	2,45	3,18	50	50	7,71	7,79	10,00	9,30

4.6.3 Produção dos concretos

A mistura dos materiais para a produção do concreto seguiu a ordem comumente empregada: após imprimação da betoneira, com cimento e areia, foi colocada a brita (natural e/ou reciclada), metade da água, o cimento, o restante da água e finalmente, a areia (natural e/ou reciclada). Não foi utilizado aditivo plastificante. Partindo-se das relações água/cimento iniciais, foi acrescentada água na mistura até alcançar o abatimento definido de 100 ± 20 mm, resultando em uma nova relação a/c para cada traço executado. Dessa forma, a relação a/c deixou de ser um fator controlável, tornando-se uma variável de resposta. Portanto, o valor de m (relação agregados secos/cimento em massa), relacionado diretamente com o fator a/c inicial, será considerado como fator controlável na análise dos resultados.

Como já foi mencionado anteriormente, os agregados reciclados possuem alta absorção. Isso foi compensado realizando-se uma pré-umidificação dos agregados 15 minutos antes da concretagem, conforme mostra a figura 10. O percentual de água colocada nos materiais variou de acordo com a taxa de absorção do material. Apesar de a relação a/c não ser fixa, esse procedimento foi adotado para que a absorção de água pelo agregado não prejudicasse a mistura

dos materiais. Caso a pré-molhagem não fosse realizada, o agregado iria absorver a água de amassamento até sua saturação, o que dificultaria que fosse alcançado o abatimento requerido.



(a)



(b)

Figura 10: pré-molhagem dos agregados reciclados; (a) agregado miúdo; (b) agregado graúdo

A verificação do abatimento do concreto foi realizada após a mistura dos materiais na betoneira (figura 11), seguindo o procedimento descrito na NBR NM 67 (ABNT, 1998a), definido em 100 ± 20 mm (figura 12).



Figura 11: aspecto do concreto produzido com agregado reciclado Figura 12: verificação do abatimento do concreto

Alcançado o valor de abatimento requerido, foram moldados 11 corpos-de-prova para cada traço produzido, de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2003e). Todos os corpos-de-prova moldados foram cilíndricos, de dimensões 9,5 x 19,0 cm (diâmetro x altura). A cura dos mesmos realizou-se em ambiente do laboratório, nas primeiras 24 horas e, depois de desmoldados, foram colocados em câmara úmida, com umidade relativa superior a 95% e temperatura de $23 \pm 1^\circ\text{C}$, até a idade dos ensaios.

A partir de dados obtidos durante a produção dos concretos, foi calculado o consumo de cimento real, para cada traço executado, de acordo com a equação 5.

$$C = \frac{\gamma}{1 + a + p + a/c} \quad (\text{equação 5})$$

onde:

C = consumo de cimento/m³

γ = massa específica do concreto, medida no canteiro em kg/m³

a = relação agregados miúdos secos/cimento em massa (kg/kg)

p = relação agregados graúdos secos/cimento em massa (kg/kg)

a/c = relação água/cimento em massa (kg/kg)

4.7 PROPRIEDADES AVALIADAS – MÉTODOS DE ENSAIO

4.7.1 Resistência à compressão axial

Para cada traço, quatro corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial, aos 28 dias, de acordo com os padrões estabelecidos pela NBR 5739 (ABNT, 1994a), sendo que dois deles eram os corpos-de-prova utilizados para previsão da carga de ruptura para o ensaio de módulo de deformação. Antes do ensaio, os corpos-de-prova eram capeados com enxofre, para regularizar as superfícies de aplicação de carga.

4.7.2 Resistência à tração por compressão diametral

Aos 28 dias de idade dos corpos-de-prova, estes foram submetidos ao ensaio para determinação da resistência à tração por compressão diametral, segundo especificação da NBR 7222 (ABNT, 1994b) – Argamassa e Concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. O ensaio foi realizado para dois corpos-de-prova de cada traço.

4.7.3 Módulo de deformação

O ensaio para determinação do módulo de deformação secante dos concretos foi realizado na CIENTEC – Fundação de Ciência e Tecnologia. Este seguiu o procedimento da NBR 8522 (ABNT, 2003d), aos 28 dias de idade dos corpos-de-prova, com cinco corpos-de-prova para

cada traço. Dois deles eram rompidos à compressão, conforme preconiza a norma, para a previsão da carga de ruptura.

O ensaio foi realizado segundo o item 7.3.3 desta norma, aplicando-se o carregamento de forma crescente à velocidade de $0,50 \pm 0,05$ MPa/s, efetuando-se pausas a cada 60 segundos para a realização das medidas de deformação. Para a medição das deformações utilizou-se extensômetro eletrônico, conforme mostra a figura 13.



Figura 13: sistema de medição das deformações através de extensômetro eletrônico

4.7.4 Absorção de água

A absorção de água dos concretos produzidos foi determinada seguindo a prescrição da norma NBR 9778 (ABNT, 2005a), pela qual se obtém a absorção de água por imersão. Para cada traço, foram ensaiados dois corpos-de-prova, sendo que o procedimento tinha início com a colocação destes em estufa, aos 63 dias de idade.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA OS RCD COLETADOS E AGREGADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados da composição dos resíduos de construção e demolição coletados em São Leopoldo (Coleta 1), Porto Alegre (Coleta 2) e Novo Hamburgo (Coleta 3), da separação por densidades e da caracterização dos agregados reciclados obtidos através do beneficiamento destes resíduos. Esta caracterização constituiu-se da determinação da composição granulométrica, massa específica, massa unitária e absorção de água, e foi realizada com os agregados originados pelos RCD de cada origem.

5.1 COMPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS COLETADOS

Na tabela 13 e nas figuras 14 a 16 estão apresentadas as composições percentuais dos RCD de cada coleta realizada, excluindo-se as impurezas e finos. Percebe-se que há variabilidade de composição entre cada coleta. Fato semelhante foi verificado por Zordan (1997) e Latterza (1998), ao analisarem amostras coletadas em um mesmo local entre setembro de 1996 e abril de 1997. Bianchini et al. (2005) também observaram diferença entre os materiais coletados em aterro de Ferrara, na Itália, em fevereiro e setembro de 1997.

É importante destacar o elevado percentual de argamassa encontrado na coleta 2, em comparação com as outras coletas, bem como o baixo percentual de rochas presente nela.

Tabela 13: constituintes percentuais dos resíduos de construção e demolição coletados

Material	Coleta 1 (%)	Coleta 2 (%)	Coleta 3 (%)
Argamassa	22,5	44,2	34,9
Concreto	26,9	18,3	27,3
Cerâmica vermelha	32,8	35,6	23,2
Cerâmica branca	0,4	0,1	0,2
Rochas	17,4	1,8	14,4

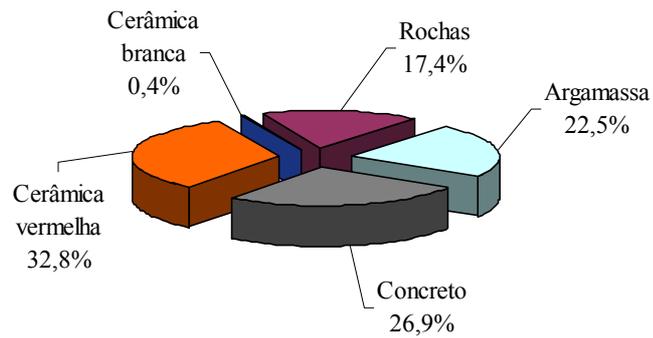


Figura 14: composição dos resíduos de construção e demolição da Coleta 1 (São Leopoldo)

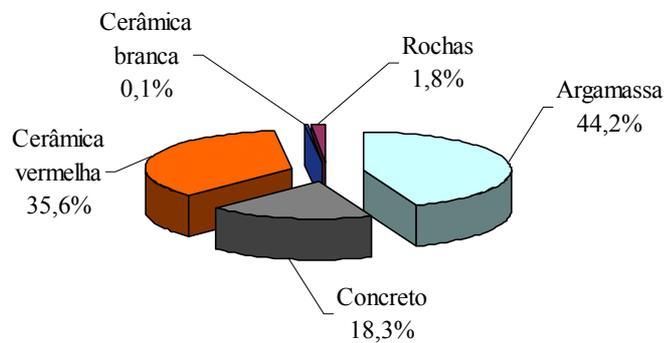


Figura 15: composição dos resíduos de construção e demolição da Coleta 2 (Porto Alegre)

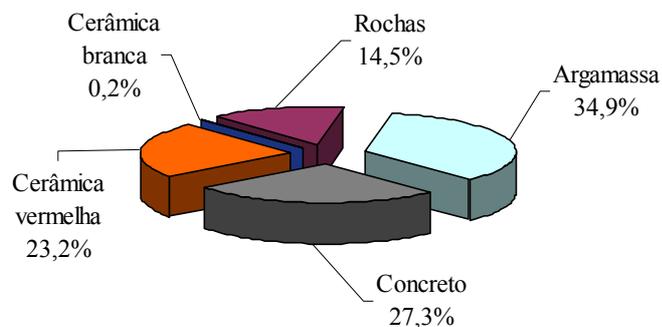


Figura 16: composição dos resíduos de construção e demolição da Coleta 3 (Novo Hamburgo)

A tabela 14 apresenta os constituintes dos RCD coletados agrupados em dois grupos: o primeiro, cerâmica e argamassa; e o segundo, concreto e rocha. A coleta 2 é composta de 80% de material cerâmico e argamassa, ou seja, materiais mais porosos e que, normalmente, demandam mais água durante a execução de concretos com agregados reciclados. Dividindo o RCD nesses dois grupos, verifica-se grande semelhança entre as coletas 1 e 3, compostas

predominantemente por cerâmica e argamassa, entretanto com grande percentual, mais de 40%, de concreto e rochas.

Tabela 14: percentuais dos materiais mais porosos (cerâmica + argamassa) e dos materiais menos porosos (concreto + rocha), para cada coleta

Coleta	Cerâmica + argamassa (%)	Concreto + rocha (%)
1	56	44
2	80	20
3	58	42

Nos percentuais apresentados não foram considerados as impurezas e finos encontrados nos resíduos coletados, entretanto é importante destacar que na coleta 2 havia 7% de impurezas e 6% de finos, ou seja, 13% do material coletado não pôde ser aproveitado. Entre estas impurezas estavam plástico, papel, folhas, gesso, cimento-amianto e vidro. Cabe ressaltar que a Resolução nº 307 (CONAMA, 2002) exige a separação dos resíduos da construção civil de acordo com as diferentes classes por ela estabelecidas, recomendando um determinado destino a cada uma dessas classes. A não separação acarreta na necessidade de uma separação dos resíduos antes da produção dos agregados, uma vez que as impurezas podem comprometer a qualidade do concreto.

5.2 SEPARAÇÃO POR DENSIDADE

Como os trabalhos de Carrijo (2005) e Angulo (2005), que propuseram a utilização da separação densitária para caracterização dos agregados reciclados, não realizaram este ensaio para os agregados miúdos, buscou-se verificar nesta pesquisa se o método é válido para estes agregados. Considerando que os agregados miúdos da coleta 1 foram todos utilizados na confecção dos concretos, o ensaio de “afunda-flutua” foi realizado apenas para amostras de materiais das coletas 2 e 3. Os resultados encontrados estão apresentados na tabela 15.

Tabela 15: resultados da separação por densidades para os agregados miúdos, através do ensaio de “afunda-flutua”

Coleta 2		Coleta 3	
Densidade	%	Densidade	%
<1,9	2,1	<1,9	0,7
1,9<d<2,2	3,5	1,9<d<2,2	4,0
2,2<d<2,4	30,0	2,2<d<2,4	22,2
>2,4	64,4	>2,4	73,1
Total	100	total	100
Diferença de massa	-2,43	Diferença de massa	-1,21

Percebe-se que a maior parte dos materiais ficou classificada em densidade superior a 2,4 g/cm³. Esta densidade concentra principalmente rochas e um pouco de concreto. No caso da coleta 3, é possível que, como a parcela retida na peneira de malha #25 mm foi britada em britador de rolo, parte do agregado miúdo seja composto por partículas de concreto e rochas.

Entretanto, isto não ocorreu com o agregado da coleta 2, cujas partículas finas foram obtidas apenas da britagem em britador de mandíbulas, sendo predominantemente compostas por cerâmica e argamassa. A concentração nessa faixa de densidade pode ser explicada pela alta absorção das partículas, fato que foi observado nos primeiros ensaios realizados com o agregado graúdo. No entanto, para o agregado miúdo a retirada das parcelas flutuadas não é tão rápida, pois o material é muito fino e muitas vezes fica aderido nas paredes do recipiente de ensaio. Dessa forma, é provável que as partículas tenham absorvido a solução de bromofórmio, alterando a sua densidade. Assim, os valores que constam na tabela 15 podem não apresentar os resultados reais.

A tabela 16 apresenta os resultados obtidos na separação por densidades, para os agregados graúdos. Estes se mostram coerentes quando comparados com a composição dos resíduos que originaram cada agregado ensaiado. O material da coleta 3, por exemplo, que apresentou o maior valor percentual de rochas e concreto em sua composição, concentrou na densidade superior a 2,4 g/cm³ mais de 40% do material ensaiado. Já o material da coleta 2, constituído principalmente por argamassa, apresentou como faixa de densidade predominante a entre 1,9 e 2,2 g/cm³, que deveria concentrar partículas de argamassa.

Tabela 16: resultados da separação por densidades para os agregados graúdos, através do ensaio de “afunda-flutua”

Coleta 1		Coleta 2		Coleta 3	
Densidade	%	Densidade	%	Densidade	%
<1,9	9,6	<1,9	10,0	<1,9	5,3
1,9<d<2,2	55,5	1,9<d<2,2	46,9	1,9<d<2,2	31,2
2,2<d<2,4	11,7	2,2<d<2,4	30,5	2,2<d<2,4	21,0
>2,4	23,2	>2,4	12,6	>2,4	42,5
Total	100	total	100	total	100
Diferença de massa	-1,54	Diferença de massa	-1,33	Diferença de massa	-0,43

Visando verificar se as faixas de densidades concentraram os materiais esperados, foi realizada a separação por fases em cada faixa de densidade, para todos os agregados graúdos. Os resultados percentuais estão apresentados nas figuras 17 a 19.

Nas três coletas, as fases argamassa e cerâmica vermelha ficaram concentradas nas três primeiras faixas de densidade, sendo que ambas as fases predominaram na faixa de densidade $1,9 < d < 2,2$. A presença de cerâmica vermelha nesta faixa de densidade pode ser justificada pelo tipo de tijolo ou telha, uma vez que algumas cerâmicas podem apresentar massa específica de até 2 g/cm^3 (PETRUCCI, 1987).

A presença de argamassa nestas três faixas de densidade e, em pequena quantidade, na faixa de densidade mais alta ($d > 2,4$) é devido ao fato que a densidade considerada de $1,9 \text{ g/cm}^3$ é uma média, e depende do tipo e função da argamassa.

As fases concreto e rocha estiveram concentradas na faixa de densidade $d > 2,4$. Apenas na coleta 2 foi encontrado concreto na faixa de densidade $2,2 < d < 2,4$. Quanto às rochas, na coleta 3 foi encontrada pequena quantidade na faixa de densidade $2,2 < d < 2,4$, o que pode significar a presença de algum tipo de rocha mais leve.

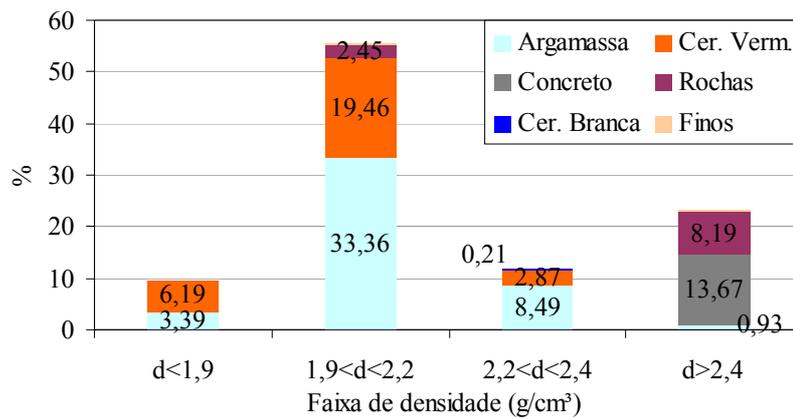


Figura 17: distribuição por fases dentro das faixas de densidades separadas para o material da coleta 1

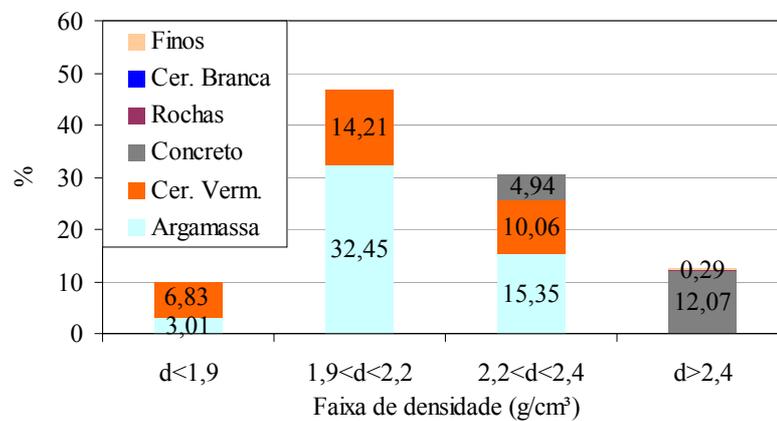


Figura 18: distribuição por fases dentro das faixas de densidades separadas para o material da coleta 2

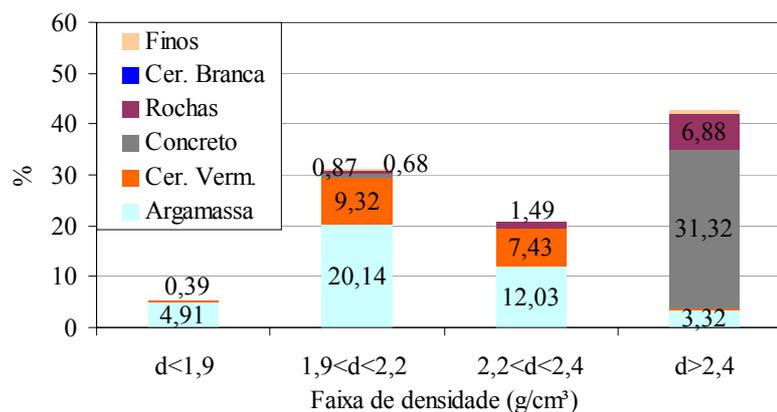


Figura 19: distribuição por fases dentro das faixas de densidades separadas para o material da coleta 3

A partir da separação por fases nas faixas de densidade foi possível identificar a composição dos agregados graúdos. A composição dos agregados miúdos foi estimada com base na composição antes da britagem e na composição do agregado graúdo. Na tabela 17 encontram-se agrupadas as fases cerâmica e argamassa, menos densas, e as fases concreto e rochas, mais densas, para cada coleta.

Tabela 17: composição dos agregados miúdos e graúdos reciclados

Coleta	Agregado miúdo reciclado (estimado)		Agregado graúdo reciclado	
	cerâmica+ argamassa (%)	concreto+ rocha (%)	cerâmica+ argamassa (%)	concreto+ rocha (%)
Coleta 1	36	64	76	24
Coleta 2	77	23	83	17
Coleta 3	58	42	58	42

Através dos dados estimados para o agregado miúdo apresentados na tabela 17, comprova-se que a separação por densidade não foi adequada para essa fração de agregado. Observa-se que a coleta 2 apresenta quase 80% de cerâmica e argamassa, materiais mais leves e que deveriam estar concentrados nas densidades inferiores a 2,4. Conforme mostrado na tabela 15, maior parte do material desta coleta foi encontrada na faixa de densidade $d > 2,4$. Portanto, pode-se dizer que o ensaio de “afunda-flutua” não funciona para os agregados miúdos reciclados.

No próximo capítulo, para cada propriedade será verificado se há relação entre a faixa de densidade predominante em cada coleta e o resultado dos ensaios no concreto endurecido.

5.3 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

5.3.1 Composição granulométrica

Os resultados das composições granulométricas dos agregados miúdos, natural e reciclados, estão apresentados na tabela 18. Observa-se que os agregados reciclados apresentaram módulos de finura diferentes entre si, e com relação ao agregado natural. Entretanto, as distribuições granulométricas dos agregados reciclados apresentam semelhanças entre si, com maior parte dos materiais retidos nas peneiras de malhas #2,4 e 0,3 mm.

Destaca-se também o grande percentual de material passante na peneira de malha #0,15 mm, o qual é muito superior à quantidade passante pelo agregado natural. Para melhor análise das composições granulométricas, são apresentadas, na figura 20, as curvas granulométricas dos agregados miúdos, juntamente com os limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2005b).

Tabela 18: composição granulométrica dos agregados miúdos utilizados

Peneira (mm)	Agregado miúdo natural		AMR coleta 1		AMR coleta 2		AMR coleta 3	
	% retida	% retida acumulada	% retida	% retida acumulada	% retida	% retida acumulada	% retida	% retida acumulada
4,75	3	3	0	0	5	5	2	2
2,36	9	12	22	22	24	29	19	21
1,18	18	30	13	35	18	47	17	38
0,6	24	54	17	52	16	63	16	54
0,3	37	91	23	75	22	85	22	76
0,15	8	99	16	91	10	95	15	91
< 0,15	1	100	9	100	5	100	9	100
Total	100	-	100	-	100	-	100	-
Dimensão máxima característica (mm)	4,75		4,75		4,75		4,75	
Módulo de finura	2,89		2,75		3,24		2,82	

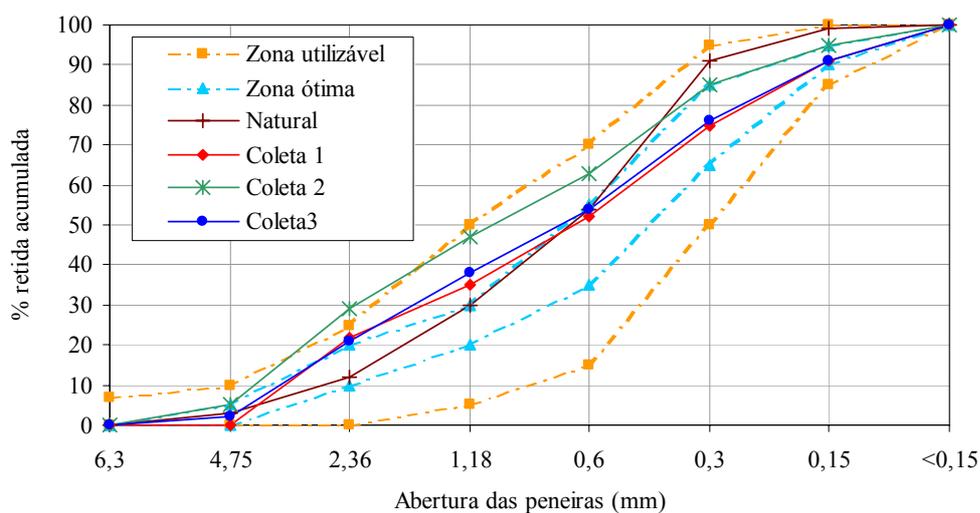


Figura 20: curvas granulométricas dos agregados miúdos utilizados e respectivos limites especificados pela NBR 7211 (ABNT, 2005b)

Através das curvas granulométricas, percebe-se que nenhum agregado encontra-se na zona ótima, entretanto apenas o agregado da coleta 2 está fora da zona utilizável estabelecida por

norma, estando acima do limite superior estabelecido para a peneira de malha #2,4 mm. Apesar disso, seu módulo de finura está dentro dos limites estipulados para a zona utilizável superior.

Na tabela 19 estão apresentados os resultados das composições granulométricas para os agregados graúdos natural e reciclados. Apenas um dos agregados reciclados apresentou módulo de finura menor que o do agregado natural, os demais apresentaram valores superiores.

Tabela 19: composição granulométrica dos agregados graúdos utilizados

Peneira (mm)	Agregado graúdo natural		AGR coleta 1		AGR coleta 2		AGR coleta 3	
	% retida	% retida acumulada	% retida	% retida acumulada	% retida	% retida acumulada	% retida	% retida acumulada
25	0	0	1	1	4	4	4	4
19	1	1	17	18	27	31	33	37
12,5	52	53	43	61	34	65	32	69
9,5	34	87	13	74	13	78	11	80
6,3	12	99	11	85	11	89	10	90
4,75	1	100	5	90	5	94	6	96
< 4,75	0	100	10	100	6	100	4	100
Total	100	100	100	-	100	-	100	-
Dimensão máxima característica (mm)	19		25		25		25	
Módulo de finura	6,88		6,82		7,03		7,13	

Todos os valores de módulo de finura encontrados são superiores aos encontrados por Leite (2001) e Vieira (2003), cujos agregados graúdos reciclados apresentaram módulos de finura inferiores ao do agregado natural empregado, sendo os valores obtidos 6,69 e 6,62, respectivamente. Topçu e Şengel (2004) também encontraram módulo de finura inferior ao do agregado natural empregado. Por outro lado, Gómez-Soberón (2002) e Oliveira e Vazquez (1996) encontraram valores de módulo de finura para os agregados reciclados estudados superiores aos dos agregados naturais. Estas variações podem ser explicadas em função do tipo de moinho utilizado para moagem e da composição do RCD.

Observando-se as curvas granulométricas dos agregados graúdos, apresentadas na figura 21, percebe-se que nenhum dos agregados reciclados se enquadrou nos limites estabelecidos pela norma NBR 7211 (ABNT, 2005b). Leite (2001) e Vieira (2003) também evidenciaram esse fato com os agregados graúdos reciclados pesquisados, os quais não se encaixaram em nenhuma

faixa de graduação estabelecida pela NBR 7211/1983, que estava em vigor quando da realização dos trabalhos.

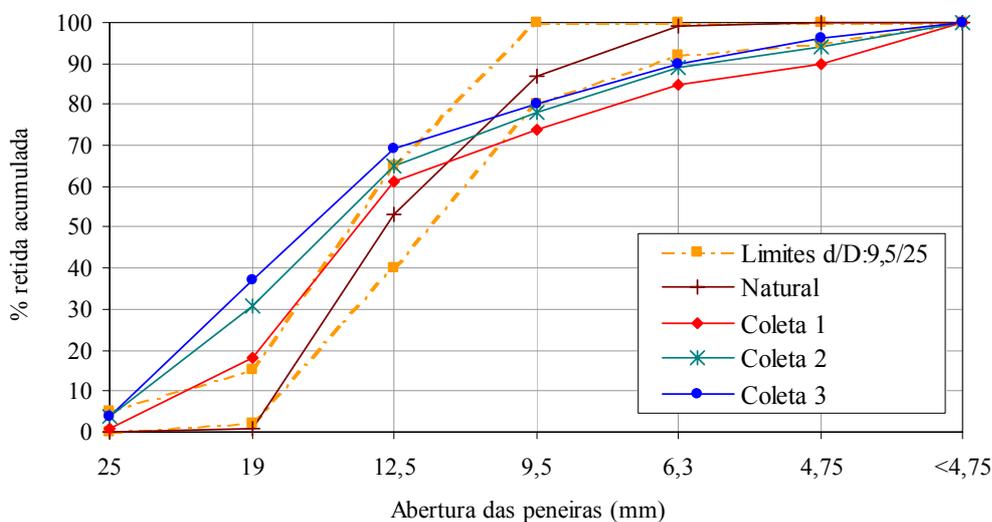


Figura 21: curvas granulométricas dos agregados graúdos utilizados e respectivos limites especificados pela NBR 7211 (ABNT, 2005b)

Apesar dos agregados graúdos reciclados e um dos agregados miúdos reciclados não se enquadrarem nas faixas estabelecidas por norma, estes foram utilizados sem correções em sua granulometria, pois o objetivo era utilizar os agregados da forma como ele era produzido, com o mínimo de beneficiamento possível.

5.3.2 Massa específica e massa unitária

Os resultados dos ensaios de massa específica e massa unitária realizados são apresentados na tabela 20. Percebe-se que o método descrito na norma fornece resultados de massa específica inferiores aos resultados obtidos pelo método de Leite (2001), para os agregados reciclados. Este fato também foi constatado por Cabral et al. (2005), que ensaiaram três amostras de agregados reciclados e uma de agregado natural, utilizando os métodos de norma e o proposto por Leite (2001). Nesse trabalho, os autores determinaram a massa específica dos agregados naturais por ambos os métodos, encontrando resultados praticamente iguais, o que comprova a validade do método de Leite (2001).

A maioria das pesquisas constata que normalmente o agregado reciclado apresenta massa específica inferior à dos agregados naturais. Leite (2001), Shayan e Xu (2003), Vieira (2003) e Khatib (2005) são alguns dos autores que comprovaram esse fato. Entretanto, isto não foi

observado para o agregado miúdo obtido pelo beneficiamento do resíduo da coleta 3, no ensaio realizado pelo método de Leite (2001). Como foi citado no item 4.4 deste trabalho, parte deste agregado foi obtida através de britagem em britador de rolos. Dessa forma, foram britadas partículas de concreto e rochas naturais. Os finos obtidos na britagem em britador de mandíbulas são predominantemente cerâmicos. Como este agregado é constituído por uma parcela de partículas originadas de concreto e rochas, a massa específica encontrada foi superior à dos demais agregados miúdos reciclados.

Tabela 20: resultados de massa específica e massa unitária dos agregados

Agregado	Miúdo				Graúdo			
	Natural	Coleta 1	Coleta 2	Coleta 3	Natural	Coleta 1	Coleta 2	Coleta 3
Massa específica – NBR NM 52 / NBR 9776 (kg/dm ³)	2,62	2,40	2,40	2,44	2,85	2,40	2,45	2,58
Massa específica - método de Leite, 2001 (kg/dm ³)	-	2,53	2,52	2,64	-	2,58	2,57	2,64
Massa unitária (kg/dm ³)	1,52	1,29	1,39	1,23	1,47	1,12	1,06	1,02

Os resultados obtidos para a massa unitária dos agregados reciclados, inferiores à dos agregados naturais, confirmam o que foi encontrado por diversos pesquisadores, como Topçu e Günçan (1995), Zordan (1997), Leite (2001) e Xiao et al. (2005). Observa-se que os agregados da coleta 3, tanto miúdos como graúdos, que apresentaram os maiores valores de massa específica, possuem as menores massas unitárias. Isto se deve provavelmente à forma e à granulometria dos agregados.

5.3.3 Absorção de água

Conforme mencionado anteriormente, o método proposto por Leite (2001) permite que se obtenha a curva de absorção dos agregados ao longo do tempo, dado importante para a realização da pré-molhagem dos mesmos. Entretanto, para os agregados miúdos das coletas 2 e 3, o método não se mostrou adequado.

Com os agregados miúdos obtidos a partir dos RCD da coleta 2, a dificuldade enfrentada no ensaio foi que, ao monitorar a massa ao longo do tempo, esta diminuía ao invés de aumentar, em três tentativas realizadas. Visando excluir a possibilidade de perda de material, o agregado foi peneirado, retirando-se para o ensaio a parcela retida na peneira de malha #0,075 mm.

Mesmo com esse procedimento, o comportamento observado foi o mesmo, decréscimo da massa.

Em outra tentativa, foi possível anotar a massa nos instantes iniciais, verificando-se aumento desta, sendo que o valor encontrado era coerente com os valores normalmente verificados em outras pesquisas com material reciclado e também, somente um pouco mais baixo que a absorção total obtida pelo método de norma. Assim, para a pré-molhagem desse material, utilizou-se 55% dessa absorção determinada nos instantes iniciais. Optou-se por esse valor com base em valores adotados em outras pesquisas, como os trabalhos de Leite (2001) e Vieira (2003), que empregaram 50% da absorção total. Outro motivo da não utilização do valor de absorção determinado em um minuto de ensaio foi evitar que houvesse um excesso de água no concreto.

Com os agregados miúdos obtidos pela britagem dos resíduos da coleta 3, a massa do material durante o ensaio diminuía um pouco nos instantes iniciais e depois permanecia estável. Após essa diminuição de massa, o material foi retirado do recipiente de ensaio e seco em estufa, de modo a determinar a perda de massa. Verificou-se que essa perda foi de 1,9%, sendo que a perda admissível apresentada na proposta de norma é de 5%. Dessa forma, verificou-se que o que ocasiona essa diminuição de massa durante o procedimento de ensaio não é a perda de material, mas sim a absorção muito rápida do agregado reciclado, fato que foi constatado a partir do método descrito a seguir.

Visando obter a curva de absorção dos agregados miúdos, foi realizada uma adaptação da norma NBR NM 30 (ABNT, 2001c). De posse dos dados obtidos pelo método descrito nessa norma, para a absorção em 24 horas, amostras do material foram colocadas imersas em água, sendo retiradas após os tempos de imersão escolhidos para se obter a curva de absorção. Este procedimento só foi realizado para os materiais da coleta 2 e 3, pois já não havia material da coleta 1 disponível. Na figura 22 estão apresentadas as curvas de absorção obtidas por esse procedimento.

Observa-se nessa figura que a absorção aos dez segundos de imersão corresponde a aproximadamente 80% da absorção total em 24 horas, para ambos os materiais. Conclui-se, portanto, que a absorção de água pelos agregados ensaiados ocorreu instantaneamente e, por isso, a massa permanecia estável durante o ensaio pelo método de Leite (2001). Como a absorção ocorria de forma muito rápida, quando a primeira leitura era realizada, após a estabilização da balança, já não havia variação de massa.

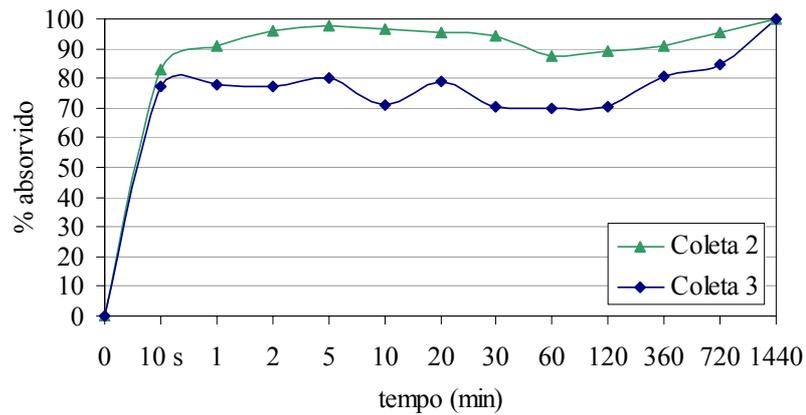


Figura 22: curvas de absorção dos agregados miúdos reciclados, conforme adaptação da norma NBR NM 30 (ABNT, 2001c)

Também pode ser visualizado na figura 22 que ocorreram reduções na porcentagem de água absorvida com o passar do tempo. No entanto, estas variações são pequenas e são devidas à variabilidade do ensaio.

Para os agregados graúdos reciclados, o método de ensaio proposto por Leite (2001) permitiu a elaboração das curvas de absorção dos agregados, mostradas na figura 23. Observa-se que os agregados das três coletas absorveram mais de 50% da massa total de água antes dos 30 minutos. Além disso, dos 10 aos 30 minutos o percentual de absorção não variou muito para os três agregados.

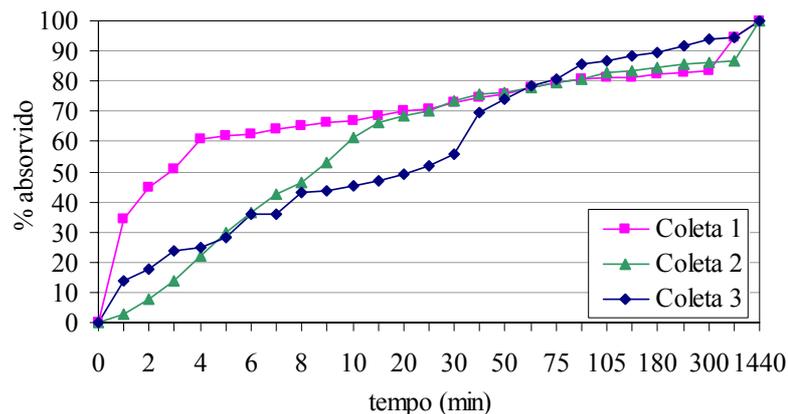


Figura 23: curvas de absorção dos agregados graúdos reciclados obtidas pelo método de Leite (2001)

Com base nas curvas de absorção visualizadas na figura, determinou-se o percentual de água a ser utilizado na pré-molhagem dos agregados, a partir da taxa de absorção do material aos 15

minutos de ensaio. Assim, os valores empregados foram, aproximadamente, 70% da absorção total para as coletas 1 e 2 e 50% da absorção total para a coleta 3.

Na tabela 21 estão apresentados os resultados da absorção total dos agregados reciclados e os respectivos valores utilizados na pré-molhagem dos mesmos. Com exceção da coleta 1, o agregado miúdo reciclado possui maior absorção que o agregado graúdo reciclado. A inversão nessa coleta pode ser explicada pela composição dos agregados miúdos e graúdos, mostrada na tabela 17. Nela pode-se visualizar que o agregado graúdo da coleta 1 é predominantemente composto por cerâmica e argamassa e o agregado miúdo concentra em sua maioria concreto e rochas. Nas demais coletas, o agregado miúdo é composto principalmente por cerâmica e argamassa.

No entanto, a coleta 2 também possui grande percentual de agregado graúdo composto por cerâmica e argamassa, mas sua absorção é bem inferior à do agregado graúdo da coleta 1. Conforme pode ser verificado nas figuras 17 e 18, a coleta 2 apresenta partículas de cerâmica e argamassa de maior densidade e, portanto, menos porosas, o que pode justificar os distintos valores de absorção destas coletas.

Tabela 21: resultado dos ensaios de absorção dos agregados reciclados

Agregado	Miúdo			Graúdo		
	Coleta 1	Coleta 2	Coleta 3	Coleta 1	Coleta 2	Coleta 3
Absorção total - 24 horas (%)	6,0	7,4	11,7	10,0	4,3	5,1
Absorção inicial -utilizada na pré-molhagem (%)	3,0	4,1	9,2	7,0	3,0	2,5

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA OS CONCRETOS PRODUZIDOS

Após a caracterização dos agregados das três coletas foram executadas quinze combinações de concretos para cada uma delas. Neste capítulo serão apresentadas as análises dos resultados dos ensaios realizados nos concretos, os quais foram resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, módulo de deformação secante e absorção de água por imersão.

Os resultados obtidos nos ensaios experimentais, apresentados no apêndice A, foram analisados estatisticamente, avaliando-se a influência das variáveis independentes nos concretos produzidos. Para cada variável de resposta estudada, foi feita a avaliação dos efeitos médios e análise de variância, a fim de verificar se os fatores controláveis (coleta, m, %AMR e %AGR) e suas interações foram significativos, ou não. Para as análises, utilizou-se o *software* Statistica. A partir dessas análises, foram obtidos modelos matemáticos de comportamento para cada propriedade estudada, através de análise de regressão não-linear realizada no *software* SPSS. Para a obtenção dos modelos, foram utilizadas as médias dos resultados dos corpos-de-prova moldados para cada propriedade avaliada.

Nos modelos, os valores das variáveis independentes **m**, **AMR** e **AGR** foram codificados, através da equação 6, e estes valores estão apresentados na tabela 22. Para a variável **coleta**, os valores utilizados foram codificados através da equação 7, variando de acordo com a propriedade estudada, e serão apresentados juntamente com o resultado de cada uma das propriedades. A análise de variância dos modelos apresentados neste trabalho e os parâmetros calculados para os fatores analisados encontram-se no apêndice C.

$$NC = \frac{NR - MI}{((LSI - LII)/2)} \quad (\text{equação 6})$$

onde:

NC = nível codificado

NR = nível real

MI = média do intervalo investigado

LSI = limite superior do intervalo investigado

LII = limite inferior do intervalo investigado

$$NC = \frac{MC}{MCS} \quad (\text{equação 7})$$

onde:

NC = nível codificado

MC = média dos resultados obtidos na coleta para a propriedade avaliada

MCS = média da coleta cuja média é a mais alta para a propriedade avaliada

Tabela 22: níveis codificados das variáveis independentes **m**, **AGR** e **AMR**

Codificação dos níveis				
m	nível real	4,38	5,63	6,88
	nível codificado	-1	0	1
AGR	nível real	0%	50%	100%
	nível codificado	-1	0	1
AMR	nível real	0%	50%	100%
	nível codificado	-1	0	1

6.1 RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO

Conforme já mencionado anteriormente, a relação a/c não foi mantida fixa, sendo adicionada água à mistura partindo-se das relações a/c iniciais de 0,5; 0,6 e 0,7. Portanto, considerando que a relação a/c também é uma variável de resposta, foi elaborado o modelo apresentado na equação 8. A análise de variância (apêndice B, tabela 41) mostrou que todas as variáveis independentes apresentaram efeito significativo sobre a relação a/c. Além disso, também se mostraram significativas, as interações **coleta x AGR**, **coleta x AMR** e **m x AGR**, entretanto a inserção das duas primeiras interações não melhorou o ajuste do modelo, não sendo, portanto, esses termos considerados. Foi obtido um coeficiente de determinação (R^2) de 0,94 para o modelo.

$$a/c = C \times 0,73 \times \left(1 + \frac{AGR}{13,50}\right) \times \left(1 + \frac{AMR}{20,60}\right) \times \left(1 + \frac{m}{5,81}\right) \times [1 + (0,0095 \times AGR \times m)] \quad (\text{equação 8})$$

onde:

a/c = relação água/cimento

C = coeficiente relativo à coleta, codificado segundo a tabela 23

AGR = percentual de agregado graúdo reciclado, codificado segundo a tabela 22

AMR = percentual de agregado miúdo reciclado, codificado segundo a tabela 22

m = relação agregados secos/cimento em massa, codificada segundo a tabela 22

Tabela 23: níveis codificados da variável **coleta** para a relação a/c

Coleta	Nível codificado
1	0,92
2	1,00
3	0,93

6.1.1 Efeito isolado da coleta sobre a relação água/cimento

A figura 24 apresenta o efeito isolado da **coleta** sobre a relação a/c. Esta figura foi obtida variando os valores codificados de variável coleta e mantendo as demais variáveis no ponto médio do intervalo de cada uma delas.

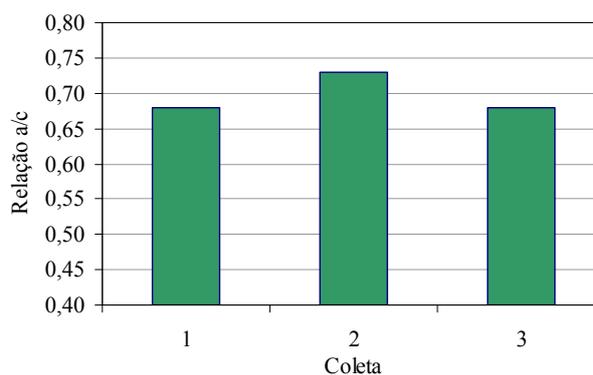


Figura 24: relação a/c em função da origem do RCD

Observa-se que na coleta 2 a relação a/c foi superior à das coletas 1 e 3, ou seja, o agregado obtido do beneficiamento do RCD da coleta 2 necessitou de mais água na mistura para alcançar o abatimento desejado. Este fato pressupõe que estes agregados são mais porosos, absorvendo maior quantidade de água. Pela tabela 14, verifica-se que 80% do material constituinte da coleta 2 é composto por cerâmica e argamassa, enquanto que nas outras coletas este valor ficou em torno de 55%, justificando a relação a/c mais alta apresentada por esta coleta.

6.1.2 Efeito isolado de m sobre a relação água/cimento

A figura 25 mostra o efeito isolado de **m** sobre a relação **a/c**. Essa figura foi obtida variando os valores codificados de **m** e fixando as demais variáveis no ponto médio do valor codificado, com exceção da variável coleta, cujo valor codificado foi considerado 1.

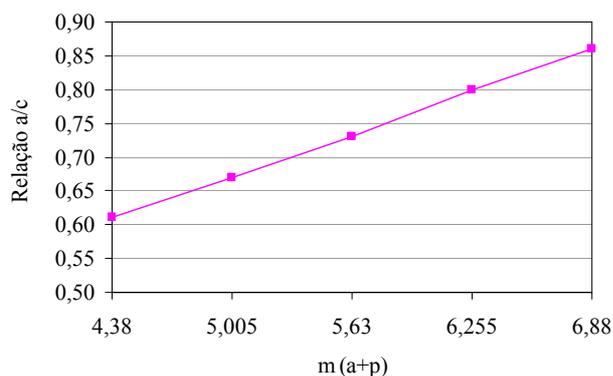


Figura 25: relação a/c em função de m

Conforme mencionado no item 4.6.3, o valor de **m** está relacionado diretamente com a relação **a/c** inicial, uma vez que ele foi determinado através da equação $m = (12,5 \times a/c) - 1,875$, obtida no diagrama de dosagem. Portanto, já era esperado que a relação **a/c** aumentasse à medida que fosse aumentado o valor de **m**, conforme mostra a figura 25.

6.1.3 Efeito isolado do teor de substituição do agregado miúdo reciclado e do agregado graúdo reciclado sobre a relação água/cimento

Os efeitos isolados dos teores de substituição de **AMR** e **AGR** foram calculados a partir da equação 8, variando os níveis codificados de **AMR** e **AGR** separadamente e fixando as demais variáveis no seu ponto médio, com exceção da variável coleta, cujo valor codificado foi considerado 1. O nível codificado de **AGR**, quando analisado o efeito isolado de **AMR**, foi mantido no seu ponto mínimo, ou seja, 0% de substituição, e o mesmo foi realizado na situação oposta. A figura 26 apresenta a tendência de comportamento da relação **a/c** sob a influência dos teores de substituição dos agregados naturais pelos reciclados.

Observa-se nesta figura que o aumento do teor de substituição de ambos agregados reciclados, miúdo e graúdo, provocou aumento na relação **a/c**, sendo que este foi maior com o aumento do

teor de substituição do AGR. Portanto, o agregado graúdo reciclado necessitou de mais água para alcançar a trabalhabilidade estipulada.

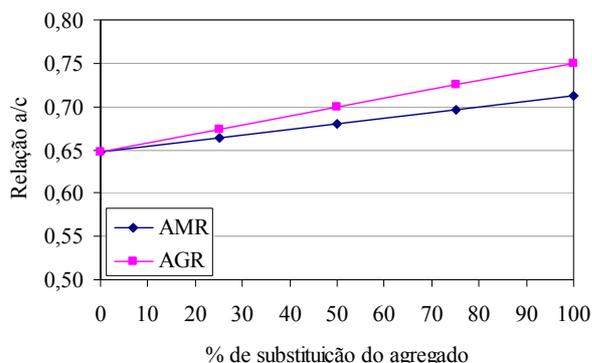


Figura 26: relação a/c em função do teor de substituição dos agregados

Leite (2001) observou que a inserção de agregado graúdo reciclado nas misturas causou redução no abatimento dos concretos, enquanto o agregado miúdo reciclado aumentou os valores de abatimento. Conforme a autora, a forma mais irregular e a textura mais áspera dos agregados graúdos reciclados contribuem para a redução nos valores de abatimento, devido ao maior travamento e empacotamento entre as partículas de agregado graúdo nas misturas de concreto com agregados reciclados, quando comparado aos concretos com agregados naturais.

Outro fator a considerar é a composição dos agregados reciclados. Na tabela 17, verifica-se que os agregados graúdos reciclados das três coletas apresentam maior quantidade de cerâmica e argamassa que os agregados miúdos reciclados.

6.1.4 Efeito da interação $m \times$ AGR sobre a relação água/cimento

A figura 27(a), que representa a relação a/c em função da interação $m \times$ AGR, foi obtida a partir da equação 8, variando os valores codificados de AGR para os valores codificados de m , mantendo o valor codificado da variável AMR no seu ponto mínimo e da variável coleta no seu ponto máximo, ou seja, 1. O inverso foi feito para a obtenção da figura 27(b), que representa a relação a/c em função do valor de m .

Observa-se nestas figuras uma pequena influência da interação $m \times$ AGR sobre a relação a/c. Esta tende a aumentar à medida que se aumenta o teor de AGR, para qualquer valor de m . O percentual de acréscimo no valor da relação a/c é de 14,8%, quando o valor de m é 4,38, e de

18,7% quando o valor de m é 6,88, ou seja, o aumento na quantidade de agregado graúdo reciclado na mistura exerce mais influência na relação a/c de traços mais pobres.

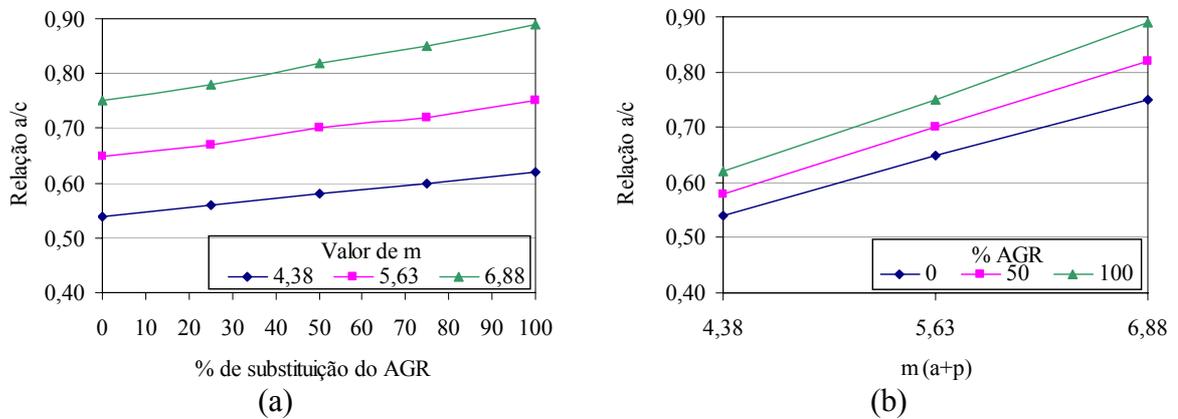


Figura 27: relação a/c em função da interação $m \times$ AGR: (a) a/c em função de AGR, para os diferentes valores de m ; (b) a/c em função de m , para os diferentes teores de AGR

6.1.5 Efeito das interações coleta x AMR e coleta x AGR sobre a relação água/cimento

O efeito das interações **coleta x AMR** e **coleta x AGR** pode ser visualizado nas figuras 28(a) e 27(b), respectivamente. Da mesma forma que foi verificado no efeito isolado dos agregados, o aumento no percentual de substituição, para ambas as frações, provoca aumento na relação a/c.

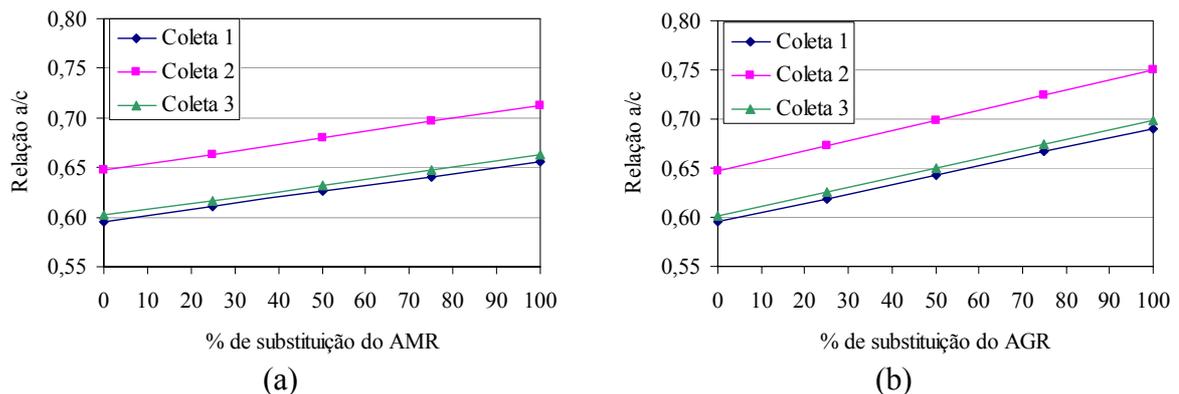


Figura 28: relação a/c em função dos teores de substituição dos agregados, para as diferentes coletas: (a) a/c em função de AMR; (b) a/c em função de AGR

O aumento no percentual de AMR provoca maior acréscimo, em termos percentuais, na relação a/c das coletas 1 e 3, sendo este 10,0%, enquanto que para a coleta 2 foi 9,2%. Em termos absolutos, para as três coletas, o acréscimo foi o mesmo. Em termos percentuais, quando 100% de AGR é colocado na mistura, a relação a/c da coleta 1 é a menos influenciada, enquanto que a

da coleta 3 sofre maior influência. Em termos absolutos, o aumento da relação a/c com o aumento do percentual de AGR é praticamente o mesmo para as três coletas. Como essas interações apresentaram uma significância fraca, não se pode atribuir as diferenças de comportamento à composição dos agregados ou às características destes. Essa significância pode estar relacionada a dificuldades de moldagem dos concretos, que levaria à colocação de mais água nas misturas.

Mesmo considerando separadamente os efeitos das duas frações de agregados, a coleta 2 continua apresentando a maior relação a/c. Observando na tabela 17 a composição dos agregados das três coletas, verifica-se que a coleta 2 apresenta grande percentual de cerâmica e argamassa em ambas as frações. Conseqüentemente, um concreto contendo estes agregados porosos, mesmo que não utilizados conjuntamente, vai necessitar de maior quantidade de água para alcançar um determinado abatimento, do que concretos com menor quantidade de agregados porosos.

6.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

A resistência à compressão axial é considerada uma das propriedades mais importantes do concreto, uma vez que esta é especificada nos projetos estruturais e no controle da qualidade, e está relacionada diretamente à capacidade de um material resistir à tensão sem ruptura. Além disso, os códigos nacionais e internacionais costumam associar as demais resistências e propriedades à resistência à compressão.

Pode-se dizer que a resistência é inversamente proporcional à porosidade do material, ou seja, quanto maior a porosidade, menor tende a ser a resistência. No caso do concreto, deve-se considerar a porosidade da pasta de cimento endurecida, do agregado e a presença de microfissuras na zona de transição entre o agregado grão e matriz. Em concretos com agregados de baixa porosidade ou resistentes, a resistência do material é influenciada pela porosidade da matriz da pasta de cimento e da zona de transição (MEHTA; MONTEIRO, 1994). No entanto, sabe-se que os materiais que constituem o agregado reciclado conferem a ele uma alta porosidade, o que influencia, portanto, na resistência do concreto produzido com estes.

A equação 9 apresenta o modelo ajustado que descreve o comportamento dos concretos produzidos com agregados reciclados quanto à resistência à compressão. Este modelo possui um coeficiente de determinação (R^2) de 0,91. Para a análise de variância e elaboração do

modelo foram utilizados também os resultados de resistência à compressão dos corpos-de-prova rompidos na CIENTEC, utilizados para a previsão da carga de ruptura antes do ensaio de módulo de deformação. Foi feita análise de variância entre os resultados obtidos nos dois laboratórios, constatando-se que não houve diferença significativa entre eles e, por isso, os quatro resultados de cada traço foram utilizados.

$$f_c = C \times 22,5 \times \left(\frac{0,5}{a/c}\right)^{0,67} \times \left(1 - \frac{AGR}{7,44}\right) \times \left(1 - \frac{AMR}{9,69}\right) \times \left(1 - \frac{m}{8,61}\right) \times [1 - (-0,04 \times AGR \times m)] \times [1 - (0,008 \times AMR \times m)] \quad (\text{equação 9})$$

onde:

f_c = resistência à compressão (MPa)

C = coeficiente relativo à coleta, codificado segundo a tabela 24

a/c = relação água/cimento real

AGR = percentual de agregado graúdo reciclado, codificado segundo a tabela 22

AMR = percentual de agregado miúdo reciclado, codificado segundo a tabela 22

m = relação agregados secos/cimento em massa, codificada segundo a tabela 22

Tabela 24: níveis codificados da variável **coleta** para f_c

Coleta	Nível codificado
1	1,00
2	0,99
3	0,94

Pela análise de variância (apêndice B, tabela 42), todos os fatores controláveis apresentaram efeito significativo sobre a resistência à compressão. Também se mostraram significativas as interações **coleta x m**, **coleta x AGR**, **coleta x AMR**, **m x AGR**, **m x AMR** e **AGR x AMR**. No entanto, a inserção desta última interação e das interações das variáveis m , AGR e AMR com a variável coleta, não melhorou o ajuste do modelo, e, portanto, esses termos não foram considerados.

6.2.1 Efeito isolado de m sobre a resistência à compressão axial do concreto

Conforme já mencionado, o valor de m é obtido através de uma equação que o relaciona com a relação a/c . Como nesse trabalho foi considerada a variável m ao invés da relação a/c , os gráficos serão apresentados em função de m . A figura 29 mostra o efeito isolado dessa variável

sobre a resistência à compressão do concreto. Pode-se dizer que os valores de m , 4,38; 5,005; 5,63; 6,255 e 6,88; equivalem, respectivamente, às relações a/c 0,50; 0,55; 0,60; 0,65 e 0,70. A figura foi obtida variando os valores codificados de m e a/c e mantendo as demais variáveis no seu ponto médio, exceto a variável coleta que foi mantida no nível 1.

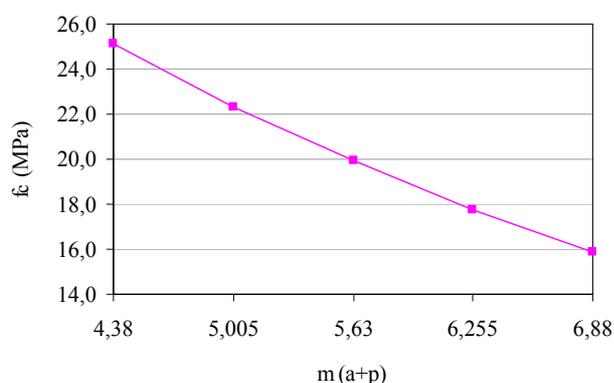


Figura 29: resistência à compressão em função do valor de m

Observa-se na figura que a resistência à compressão tende a reduzir à medida que o valor de m aumenta. Como é possível substituir os valores de m pelas relações a/c citadas anteriormente, essa tendência de comportamento comprova a Lei de Abrams da relação água/cimento, que diz que a resistência à compressão é inversamente proporcional à relação a/c . O aumento da relação a/c causa enfraquecimento da matriz do concreto devido ao aumento da porosidade, diminuindo assim a resistência. No entanto, essa figura mostra apenas uma tendência de comportamento, devendo ser considerados os outros fatores que se mostraram significativos quando da interação com m , como será apresentado a seguir.

6.2.2 Efeito isolado do teor de substituição do agregado miúdo reciclado e do agregado graúdo reciclado sobre a resistência à compressão axial do concreto

Geralmente a influência do agregado não é considerada na resistência do concreto convencional, pois a ruptura deste tende a ocorrer na matriz ou na zona de transição. Como os agregados reciclados são menos resistentes que os naturais, a ruptura pode ocorrer no próprio agregado. Além disso, outras características do agregado influenciam na resistência do concreto, como o tamanho, forma, textura, granulometria e mineralogia.

Na figura 30 são mostrados os efeitos isolados dos percentuais de substituição dos agregados naturais pelos reciclados. Para a obtenção deste gráfico, variou-se o nível codificado de AMR ou AGR, em cada caso, mantendo as variáveis m e a/c em seus níveis médios, AGR ou AMR no nível inferior e utilizando para a variável coleta o nível codificado 1.

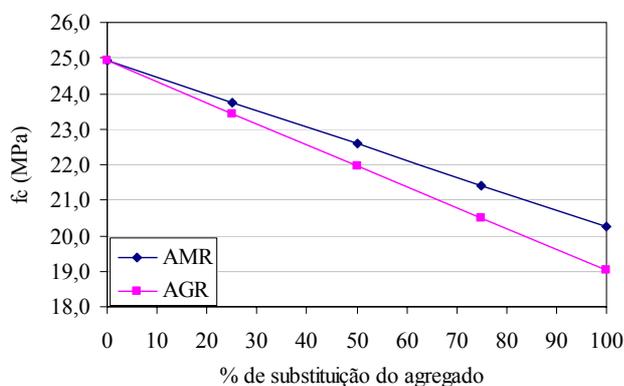


Figura 30: resistência à compressão em função do teor de substituição dos agregados

Conforme a figura, quanto maior o percentual de agregados reciclados, grãos ou miúdos, menor tende a ser a resistência. Quando 100% de AMR é colocado na mistura, a resistência reduz aproximadamente 18% com relação ao concreto de referência. Quando 100% de AGR é colocado na mistura, a redução na resistência chega a 24%. Essa maior influência do AGR sobre a resistência à compressão pode estar relacionada com a composição destes agregados, que apresentam maior quantidade de cerâmica e argamassa do que concreto e rochas.

Cabral et al. (2006) também observaram uma maior influência negativa dos agregados grãos reciclados sobre a resistência do concreto, quando comparados com os agregados miúdos reciclados. Os autores constataram que a cerâmica vermelha é que provoca a maior redução na resistência. Segundo Khalaf e DeVenny (2004), isto pode ser explicado pela forma do agregado de cerâmica, que possui aparência mais angular, não permitindo um adequado empacotamento dos grãos, o que resulta em concretos com maior quantidade de vazios. Outro fator a considerar é a resistência do agregado de cerâmica, inferior à dos demais agregados reciclados.

6.2.3 Efeito das interações $m \times$ AMR e $m \times$ AGR sobre a resistência à compressão axial do concreto

A figura 31 mostra o efeito do percentual de substituição do AMR, em função de m , sobre a resistência à compressão do concreto. A figura 31(a) foi obtida variando os valores codificados de AMR para cada valor de m , na equação 9, mantendo a variável AGR no ponto mínimo. Para

a obtenção da figura 31(b), variaram-se os valores de m para cada AMR, sempre mantendo AGR no nível codificado -1.

De acordo com as figuras, para os três valores de m estudados, quanto maior o percentual de substituição do agregado miúdo reciclado, menor a resistência à compressão. A redução no valor da resistência, em termos percentuais, foi maior para os valores mais altos de m . Embora essa interação tenha se mostrado significativa, esta significância é bastante fraca, o que pode ser verificado nos percentuais de redução de resistência com o aumento de m , que variaram entre 17,3% a 19,8%, quando os teores de substituição passavam de 0 para 100% de AMR.

Um fator a considerar é a granulometria do material reciclado. Conforme Neville (1997), um aumento de 10 a 25% no teor de partículas menores que 150 μm , no caso de pedra britada, causa decréscimo na resistência à compressão do concreto. Portanto, como os agregados miúdos reciclados utilizados nesta pesquisa apresentaram grande quantidade de partículas de diâmetro inferior a 150 μm , conforme apresentado na tabela 18, isto pode ter influenciado na resistência dos concretos.

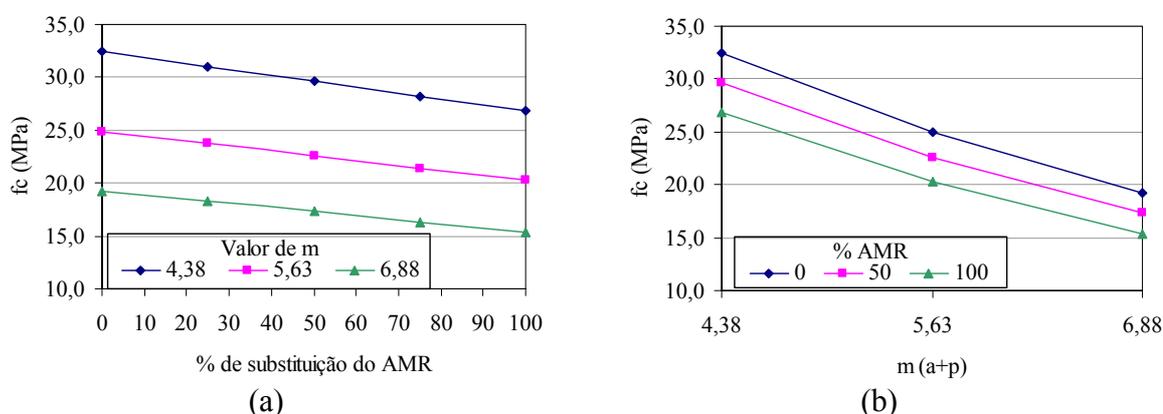


Figura 31: resistência à compressão em função da interação $m \times$ AMR: (a) f_c em função de AMR, para os diferentes valores de m ; (b) f_c em função de m , para os diferentes teores de AMR

Observando a figura 31(b), percebe-se que o comportamento da curva $f_c \times m$ para o concreto com agregados reciclados é praticamente igual ao comportamento do concreto de referência, ou seja, a resistência tende a reduzir quanto maior o valor de m . Entretanto, quanto maior o percentual de AMR na mistura, maior a redução da resistência à compressão com o aumento de m . O decréscimo nos valores das resistências variou de 40,7 a 42,5%, à medida que se acrescentam agregados miúdos reciclados na mistura, comprovando a significância bastante fraca desta interação, conforme já mencionado.

O efeito da interação $m \times \text{AGR}$ está mostrado nas figuras 32(a) e 32(b). Para a obtenção da figura 32(a) variaram-se os valores codificados de AGR para cada valor de m , na equação 9, mantendo AMR no ponto mínimo. A figura 32(b) foi obtida variando-se os valores de m para cada AGR, sempre mantendo AMR no nível codificado -1.

Percebe-se nessas figuras que, para todos os valores de m , a resistência à compressão é reduzida com o aumento do percentual de agregado graúdo reciclado. A taxa de decréscimo da resistência varia de acordo com o valor de m . Esta é maior para $m=4,38$, em torno de 30%, enquanto que para $m=6,88$, este decréscimo é de 17%.

Leite (2001) também observou que à medida que se aumentava a relação a/c , diminuía a influência do agregado graúdo reciclado sobre a resistência, chegando a verificar pequeno aumento desta para relações a/c superiores a 0,70. A autora atribui isto ao fato que quando se aumenta a relação a/c , aumenta também a porosidade da matriz e da zona de transição do concreto. Dessa forma, os valores da densidade e resistência do agregado reciclado, na maioria das vezes mais baixos que os do agregado natural, tornam-se semelhantes aos da matriz do concreto, e, assim, o agregado graúdo reciclado deixa de ser o elo frágil do sistema.

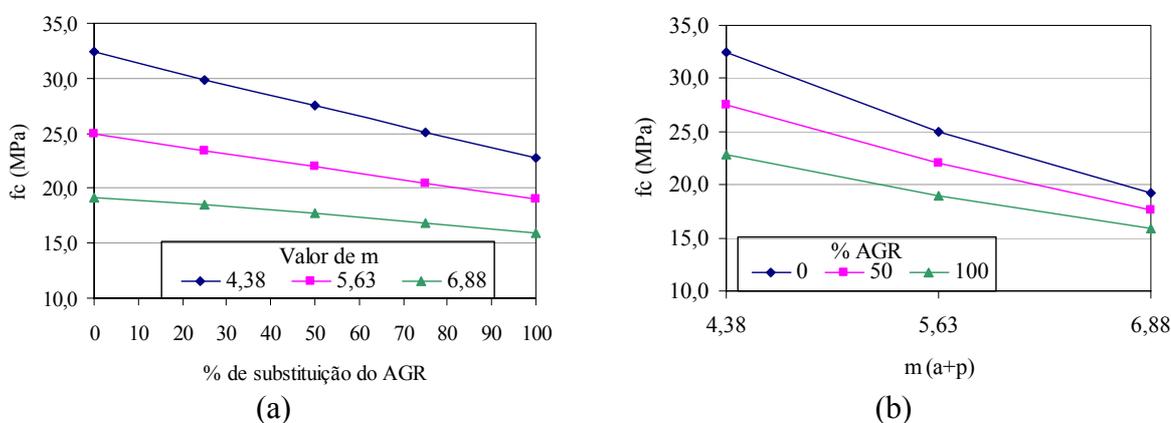


Figura 32: resistência à compressão em função da interação $m \times \text{AGR}$: (a) f_c em função de AGR, para os diferentes valores de m ; (b) f_c em função de m , para os diferentes teores de AGR

Na figura 32(b) pode-se perceber que o efeito do aumento do valor de m , ou seja, aumento da relação a/c na resistência do concreto, é mais significativo para o concreto de referência, tendo reduzido 41%. Para o concreto com 100% de agregado graúdo reciclado a redução da resistência com o aumento do valor de m foi da ordem de 30%. Esta comparação confirma o que foi escrito acima, ou seja, o aumento da água na mistura faz com que o agregado reciclado deixe de ser a parte mais fraca do sistema.

6.2.4 Efeito da interação AMR x AGR sobre a resistência à compressão axial do concreto

As figuras 33(a) e 33(b) mostram o efeito da interação AMR x AGR sobre a resistência à compressão. A figura 33(a) foi obtida variando-se os valores codificados dos teores de substituição de AMR para cada teor de AGR utilizado e para a figura 33(b) variou-se os teores de substituição de AGR para cada teor de AMR. Em ambos os casos, os valores de m e a/c foram mantidos em seu nível médio e o valor da coleta foi mantido em 1.

Nesta interação a inserção de AMR provoca uma menor redução da resistência quando se utiliza 100% de AGR do que quando não há AGR na mistura. O aumento no percentual de AMR provoca maior influência, em termos percentuais, nos concretos com 50% de AGR. O mesmo ocorre na situação oposta, ou seja, concretos que já contêm 100% de AMR são menos prejudicados quando da inserção de AGR do que concretos que não contêm AMR. Essas diferenças, no entanto, são pequenas, tanto em termos absolutos, como em termos percentuais, como mostram as figuras 33(a) e 33(b).

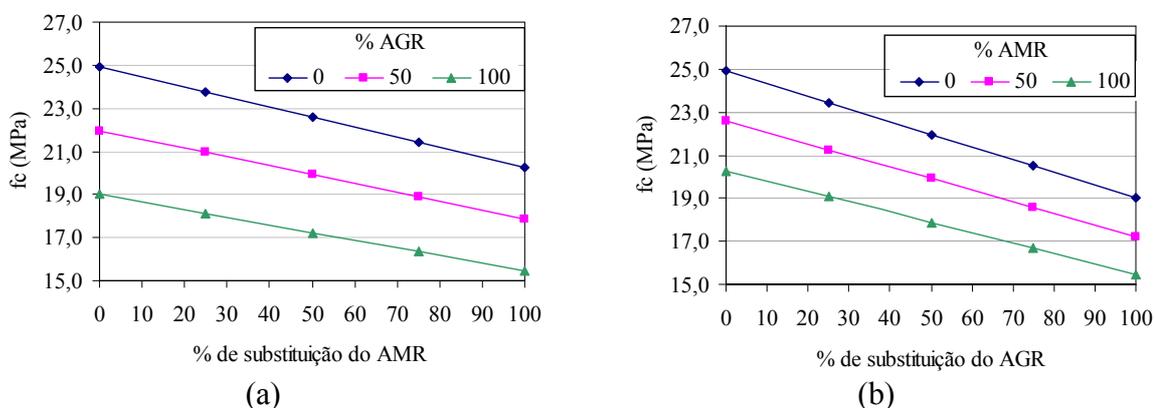


Figura 33: resistência à compressão em função da interação AMR x AGR: (a) f_c em função de AMR, para os diferentes teores de AGR; (b) f_c em função de AGR, para os diferentes teores de AMR

6.2.5 Verificação da validade da caracterização dos agregados por diferentes faixas de densidade como parâmetro de controle da resistência à compressão do concreto

A seguir, serão apresentados os efeitos relativos à variável coleta e suas interações, assim como a relação existente entre os resultados de cada coleta e a caracterização dos agregados, a partir dos dados analisados no capítulo 5.

A figura 34 apresenta o efeito isolado da variável coleta sobre a resistência à compressão do concreto. Esta foi obtida variando os valores codificados da coleta e mantendo as demais variáveis no ponto médio de cada uma delas.

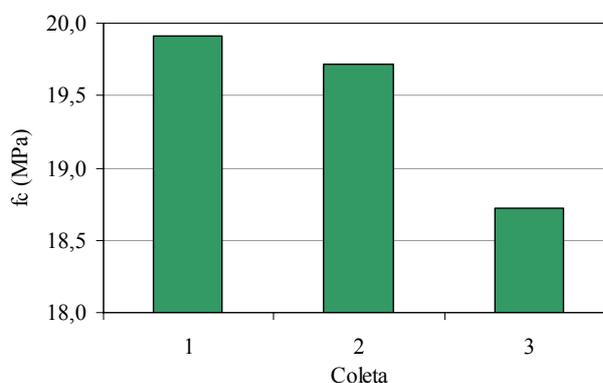


Figura 34: resistência à compressão em função da origem do RCD

Pode-se observar nesta figura que as coletas 1 e 2 apresentam valores de resistência à compressão superiores aos da coleta 3, sendo que o valor mais alto foi o da coleta 1. Pela análise de variância, a diferença entre as coletas 1 e 2 não foi significativa, sendo que a resistência da coleta 2 foi apenas 1% menor que a da coleta 1. A resistência da coleta 3 foi 6% menor que a da coleta 1.

Um dos fatores que influencia na resistência à compressão é a relação a/c. O valor da resistência à compressão apresentado pelo concreto produzido com o material da coleta 2 não era esperado, uma vez que a relação a/c desta coleta foi superior à das demais coletas. Entretanto, a quantidade de cerâmica presente nesta coleta, que contribuiu para o aumento da relação a/c, pode ter provocado um efeito pozolânico, que por menor que tenha sido, contribuiu para o aumento da resistência do concreto, como já comprovado no trabalho de Leite (2001).

A baixa resistência à compressão apresentada pelo concreto produzido com os materiais da coleta 3 pode ser explicada por características dos agregados, como forma e granulometria. Observando a tabela 20, verifica-se o baixo valor da massa unitária dos agregados desta coleta em relação à massa específica dos mesmos. Isto deve ter provocado dificuldades na moldagem devido ao empacotamento ruim causado pela forma dos grãos e, dessa forma, não possibilitou um adequado preenchimento dos espaços vazios.

A figura 35, a seguir, apresenta o efeito interação **m x coleta** sobre a resistência à compressão dos concretos produzidos nesta pesquisa. Essa figura foi obtida variando-se os níveis codificados das variáveis m e coleta, e mantendo as demais variáveis fixas em seu ponto médio codificado.

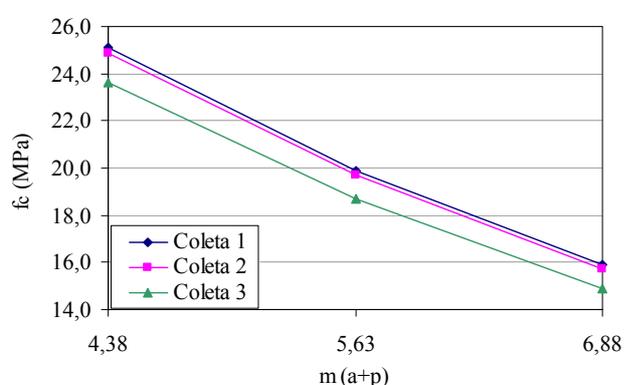


Figura 35: resistência à compressão em função da interação m x coleta

Percebe-se nesta figura que, para os três valores de m, as coletas 1 e 2 apresentam valores de resistência à compressão semelhantes. A significância verificada refere-se à diferença entre essas coletas e a coleta 3. O aumento do valor de m provocou maiores reduções na resistência para os concretos da coleta 2. Quanto maior o valor de m, maior a diferença percentual entre a resistência das coletas 1 e 3.

Nas figuras 36(a) e 36(b) estão mostrados os efeitos das interações **coleta x AMR** e **coleta x AGR**, respectivamente. Observa-se na figura 36(a) que para todas as coletas o aumento no percentual de AMR na mistura provocou redução na resistência à compressão, sendo que esta é um pouco maior para a coleta 3. Verificando a composição estimada dos agregados miúdos reciclados utilizados, que consta na tabela 17, percebe-se que ocorreu uma inversão do comportamento, uma vez que a coleta 3 apresenta maior quantidade de concreto e rochas do que a coleta 2. Conforme já mencionado neste trabalho, o AMR da coleta 3 apresentou baixa massa unitária e alta massa específica, o que provoca um empacotamento ruim, não permitindo que os concretos produzidos com estes agregados tenham um bom desempenho quanto à resistência à

compressão. Além disso, as partículas de cerâmica presentes no AMR da coleta 2 podem ter ocasionado uma atividade pozolânica, provocando um efeito benéfico no concreto ao invés do efeito maléfico que poderia ter ocorrido devido à porosidade deste material.

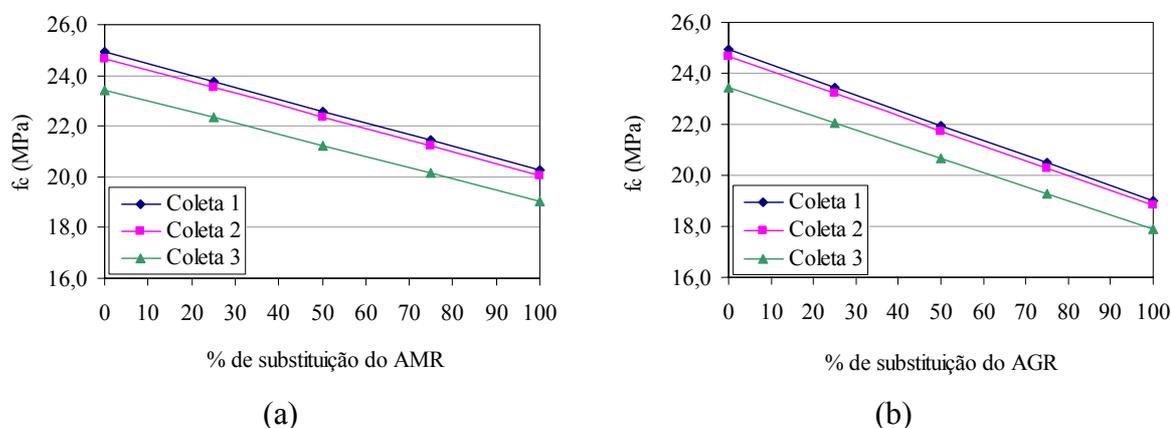


Figura 36: resistência à compressão em função dos teores de substituição dos agregados, para as diferentes coletas: (a) f_c em função de AMR; (b) f_c em função de AGR

Verifica-se na figura 36(b) que o aumento do percentual de AGR, para todas as coletas, provoca redução na resistência à compressão. Assim como na utilização apenas de AMR e da utilização conjunta de ambas as frações de agregados, a coleta 3 apresentou os menores valores de resistência.

Conforme a separação por densidades, mostrada na tabela 16, a coleta 3 apresenta maior quantidade de partículas com densidade superior a 2,4. Segundo Angulo (2005) e Carrijo (2005), quanto maior a densidade dos agregados, maior será a sua resistência. Entretanto, neste trabalho verificou-se que a resistência à compressão dos concretos com agregados reciclados é influenciada por diversos fatores, como composição, forma e granulometria dos agregados, não dependendo exclusivamente da densidade.

Dessa forma, pode-se dizer que a densidade dos agregados reciclados não é um parâmetro que permite controlar a resistência dos concretos, uma vez que esta propriedade depende de diversos fatores relacionados com as características dos agregados.

6.2.6 Relação entre a resistência à compressão e o consumo de cimento

A análise do consumo de cimento é muito importante quando se pretende avaliar a viabilidade econômica de um concreto, uma vez que o cimento possui custo superior ao dos demais constituintes. Dessa forma, visando estudar o consumo de cimento em relação à resistência à compressão, a partir dos resultados experimentais e análise de variância destes (apêndice B,

tabela 43), foi elaborada a equação 10, que representa o comportamento do consumo de cimento dos concretos com agregados reciclados. Foi obtido para o modelo um coeficiente de determinação (R^2) de 0,98.

$$C_{\text{cim}} = 310,24 + C - (226,25 \times AGR) - (197,37 \times AMR) - (58,96 \times m) + (4,34 \times AGR \times m) + (2,78 \times AMR \times m) + (2,89 \times AGR \times AMR) + (209,78 \times C \times AGR) + (189,87 \times C \times AMR) \quad (\text{equação 10})$$

onde:

C_{cim} = consumo de cimento (kg/m^3)

C = coeficiente relativo à coleta, codificado segundo a tabela 25

AGR = percentual de agregado graúdo reciclado, codificado segundo a tabela 22

AMR = percentual de agregado miúdo reciclado, codificado segundo a tabela 22

m = relação agregados secos/cimento em massa, codificada segundo a tabela 22

Tabela 25: níveis codificados da variável **coleta** para o consumo de cimento

Coleta	Nível codificado
1	1,00
2	0,98
3	1,00

A figura 37 relaciona o consumo de cimento com a resistência à compressão, para alguns traços. Como as três coletas apresentaram a mesma tendência de comportamento, para a obtenção dos dados empregados no gráfico, utilizaram-se os coeficientes relativos à coleta 1.

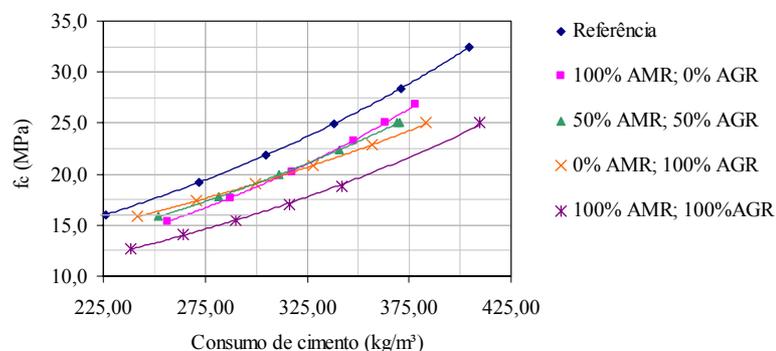


Figura 37: resistência à compressão x consumo de cimento

Observa-se na figura que, para uma mesma resistência, o concreto com agregado reciclado consumiu mais cimento que o concreto com agregado natural. Para uma resistência à compressão de 25 MPa, por exemplo, os traços com agregado reciclado que apresentaram menor consumo de cimento foram os com apenas 100% de AMR e com 50% de ambas as frações, cujo aumento do consumo em relação ao concreto de referência foi em torno de 7,5%. Pode-se dizer que o agregado graúdo reciclado possui uma influência maior sobre o consumo de cimento que o agregado miúdo reciclado.

Entretanto, para uma resistência à compressão em torno de 16 MPa, o traço contendo 100% de AGR foi o que apresentou menor consumo de cimento, entre os concretos com agregado reciclado. A substituição total de ambas as frações de agregados, por prejudicar muito a resistência à compressão, provocou aumento no consumo de cimento para atingir a mesma resistência do concreto de referência.

Carrijo (2005) também verificou aumento do consumo de cimento com a utilização de agregados reciclados, sendo que o aumento percentual do consumo variou de 3 a 47%, dependendo da densidade do agregado.

Visando uma melhor visualização de qual combinação com agregados reciclados possui a melhor relação entre o consumo de cimento e a resistência, foi elaborada a tabela 26. Utilizaram-se novamente os coeficientes da coleta 1 para a obtenção dos dados.

Tabela 26: relação entre o consumo de cimento e a resistência à compressão dos concretos

a/c	% AGR	Ccim/resistência		
		% AMR		
		0	50	100
0,50	0	12,5	13,2	14,1
	50	13,8	14,7	15,9
	100	15,6	16,7	18,1
0,60	0	13,6	14,5	15,7
	50	14,5	15,6	17,0
	100	15,7	17,1	18,8
0,70	0	14,1	15,3	16,7
	50	14,6	15,9	17,5
	100	15,2	16,8	18,8

Para relações a/c mais baixas, ou seja, resistências à compressão mais altas, a relação consumo/resistência foi menor para os traços contendo apenas AMR e para os traços contendo

50% de ambas as frações. No caso de relações a/c mais altas, os traços contendo apenas AGR apresentaram menor relação consumo/resistência.

Dessa forma, quando se utilizam agregados reciclados, deve-se ter cuidado na escolha dos teores de substituição a serem empregados, de acordo com a resistência desejada. A utilização de 100% de ambas as frações de agregados, apesar de trazer benefícios ambientais, uma vez que se reduz o consumo de recursos naturais e resíduos depositados em aterros, aumenta o consumo de cimento, aumentando o custo financeiro da obra e os danos ambientais causados pela produção deste.

6.2.7 Considerações gerais

Para uma análise geral do comportamento dos concretos com agregados reciclados quanto à resistência à compressão, foi elaborada a figura 38, que relaciona a relação a/c com a resistência, para algumas combinações com agregados reciclados. Este foi obtido a partir da equação 10, utilizando os níveis codificados das variáveis m, AMR e AGR, valores fixos de a/c (0,50; 0,55; 0,60; 0,65; 0,70) e para a variável coleta o nível codificado 1.

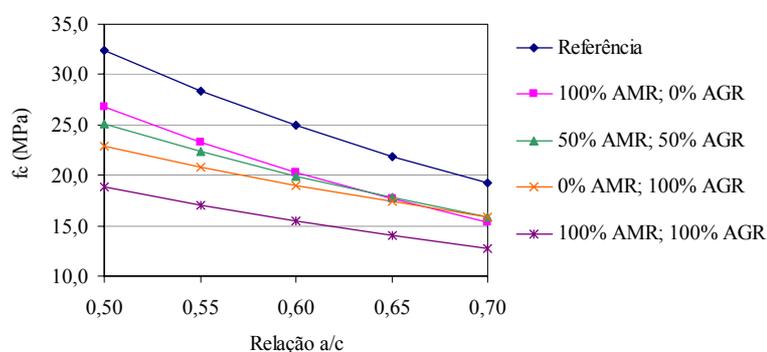


Figura 38: curvas de resistência à compressão em função da relação a/c

Pela análise da figura, pode-se dizer que os concretos produzidos com agregados reciclados seguem a tendência de comportamento da Lei de Abrams, ou seja, à medida que aumenta a relação a/c, diminui a resistência. Este mesmo comportamento também foi verificado por outros autores, como Leite (2001) e Vieira (2003).

As combinações contendo apenas agregados miúdos ou apenas agregados graúdos e contendo 50% de cada um dos agregados, à medida que se aumentou a relação a/c, apresentaram resultados de resistência à compressão cada vez mais próximos, chegando a se igualar quando a

relação a/c é 0,70. Estes mesmos traços também apresentaram resistência à compressão semelhantes na pesquisa de Leite (2001), para relações a/c maiores que 0,70.

A tabela 27 apresenta o resultado de resistência à compressão e relação com o concreto de referência das 27 combinações contempladas a partir das variáveis estudadas, desconsiderando a variável coleta.

Tabela 27: comparação geral das resistências à compressão dos concretos com diferentes teores de substituição do agregado natural pelo reciclado

a/c	Traço	fc (MPa)	Varição da resistência em relação ao concreto de referência
0,50	Referência	32,4	-
	0% AMR; 50% AGR	27,5	0,85
	0% AMR; 100% AGR	22,8	0,70
	50% AMR; 0% AGR	29,6	0,91
	50% AMR; 50% AGR	25,1	0,77
	50% AMR; 100% AGR	20,9	0,65
	100% AMR; 0% AGR	26,8	0,83
	100% AMR; 50% AGR	22,7	0,70
	100% AMR; 100% AGR	18,9	0,58
0,60	Referência	24,9	-
	0% AMR; 50% AGR	22,0	0,88
	0% AMR; 100% AGR	19,0	0,76
	50% AMR; 0% AGR	22,6	0,91
	50% AMR; 50% AGR	19,9	0,80
	50% AMR; 100% AGR	17,2	0,69
	100% AMR; 0% AGR	20,3	0,82
	100% AMR; 50% AGR	17,9	0,72
	100% AMR; 100% AGR	15,5	0,62
0,70	Referência	19,2	-
	0% AMR; 50% AGR	17,7	0,92
	0% AMR; 100% AGR	15,9	0,83
	50% AMR; 0% AGR	17,3	0,90
	50% AMR; 50% AGR	15,9	0,83
	50% AMR; 100% AGR	14,3	0,74
	100% AMR; 0% AGR	15,4	0,80
	100% AMR; 50% AGR	14,1	0,73
	100% AMR; 100% AGR	12,7	0,66

A partir dos resultados mostrados na tabela, verifica-se que as resistências para os concretos com agregados reciclados variaram entre 12,7 e 29,6 MPa, dependendo da relação a/c e dos

teores de substituição dos agregados. O pior desempenho observado foi para o traço com 100% de substituição dos agregados miúdo e graúdo conjuntamente. Comparando com seus respectivos concretos de referência, observa-se que quanto menor a relação a/c, mais baixa a relação com o concreto sem agregados reciclados.

Ainda com relação aos resultados visualizados na tabela 27, todas as combinações com agregados reciclados apresentaram valores de resistências inferiores ao do concreto de referência. Entretanto, para as combinações contendo apenas 50% de um dos agregados foram obtidos os melhores desempenhos, seguidas pelas combinações com 50% de ambos agregados e com 100% de agregado miúdo reciclado. Com base nisso, pode-se dizer que o agregado graúdo reciclado provoca maior influência negativa sobre a resistência à compressão do concreto que o agregado miúdo reciclado.

6.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

O conhecimento da resistência à tração é importante para a estimativa da carga em que ocorre a fissuração. A avaliação dessa propriedade pode colaborar para a correta compreensão do comportamento do concreto armado, apesar de o projeto não levar em conta de forma explícita a resistência à tração.

A equação 11 apresenta o modelo que descreve o comportamento do concreto para a resistência à tração por compressão diametral, cujo coeficiente de determinação (R^2) obtido foi 0,83. Pela análise de variância (apêndice B, tabela 44), apenas as variáveis **m**, **AGR** e **AMR**, e a interação **m x AGR**, mostraram-se significativas para essa propriedade.

$$f_{tD} = 1,86 \times \left(1 - \frac{AGR}{6,81}\right) \times \left(1 - \frac{AMR}{9,86}\right) \times \left(1 - \frac{m}{4,87}\right) \times [1 - (-0,016 \times m \times AGR)] \quad (\text{equação 11})$$

onde:

f_{tD} = resistência à tração por compressão diametral (MPa)

AGR = percentual de agregado graúdo reciclado, codificado segundo a tabela 22

AMR = percentual de agregado miúdo reciclado, codificado segundo a tabela 22

m = relação agregados secos/cimento em massa, codificada segundo a tabela 22

6.3.1 Efeito isolado de m sobre a resistência à tração por compressão diametral do concreto

Na figura 39 pode ser visualizado o efeito isolado da variável m e, conseqüentemente, da relação a/c , sobre a resistência à tração por compressão diametral. Os resultados para montagem da figura foram obtidos a partir da equação 11, onde foram variados os valores codificados de m e mantidas as demais variáveis nos seus respectivos pontos médios codificados.

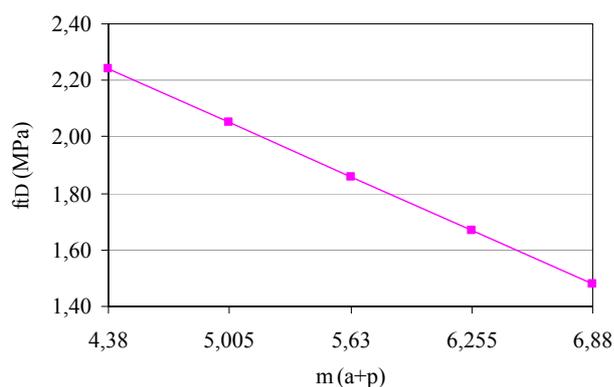


Figura 39: resistência à tração por compressão diametral em função do valor de m

Percebe-se pela figura que a resistência à tração, assim como a resistência à compressão, tende a reduzir com o aumento do valor de m . O percentual de redução foi de 33,9 para a resistência à tração e de 36,6 para a resistência à compressão, quando m aumenta de 4,38 para 6,88. Ravindrarajah et al. (1987) também observaram que mudanças na relação a/c têm mais influência na resistência à compressão que na resistência à tração.

6.3.2 Efeito isolado do teor de substituição do agregado miúdo reciclado e do agregado graúdo reciclado sobre a resistência à tração por compressão diametral do concreto

A partir da equação 11 foram calculados os valores de resistência à tração sob o efeito isolado do teor de substituição dos agregados, miúdos e graúdos. A figura 40 mostra a tendência de comportamento do concreto sob o efeito dessas variáveis.

Observa-se na figura que quanto maior o teor de substituição do agregado, menor a resistência à tração. Assim como na resistência à compressão, o agregado graúdo reciclado exerce maior influência negativa sobre a resistência à tração. A redução da resistência em relação ao concreto de referência é de 18,3% para 100% de AMR e de 25,5% para 100% de AGR.

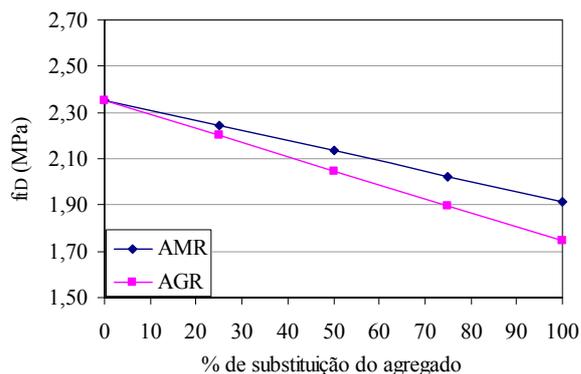


Figura 40: resistência à tração por compressão diametral em função do teor de substituição dos agregados

Conforme Mehta e Monteiro (1994), na resistência à tração as fissuras se propagam em direção transversal à aplicação da tensão e a ruptura é causada apenas pela união de algumas fissuras. Como o agregado reciclado é mais frágil que o natural, as fissuras tendem a se propagar também nos agregados, reduzindo a resistência à tração.

6.3.3 Efeito da interação m x AGR sobre a resistência à tração por compressão diametral do concreto

A figura 41 mostra o efeito do percentual de substituição do AGR, em função de m , sobre a resistência à tração por compressão diametral do concreto. Para a obtenção da figura 41(a) variaram-se os valores codificados de AGR para cada valor de m , na equação 11, mantendo AMR no ponto mínimo. A figura 41(b) foi obtida variando-se os valores de m para cada AGR, sempre mantendo AMR no nível codificado -1.

Da mesma forma que foi verificada na resistência à compressão, para todos os valores de m , a resistência à tração é reduzida com o aumento do percentual de agregado graúdo reciclado. O percentual de decréscimo da resistência varia de acordo com o valor de m , sendo maior para $m=4,38$, em torno de 28%, e menor para $m=6,88$, cujo decréscimo é de aproximadamente 23%, quando o percentual de AGR passa de 0 para 100%.

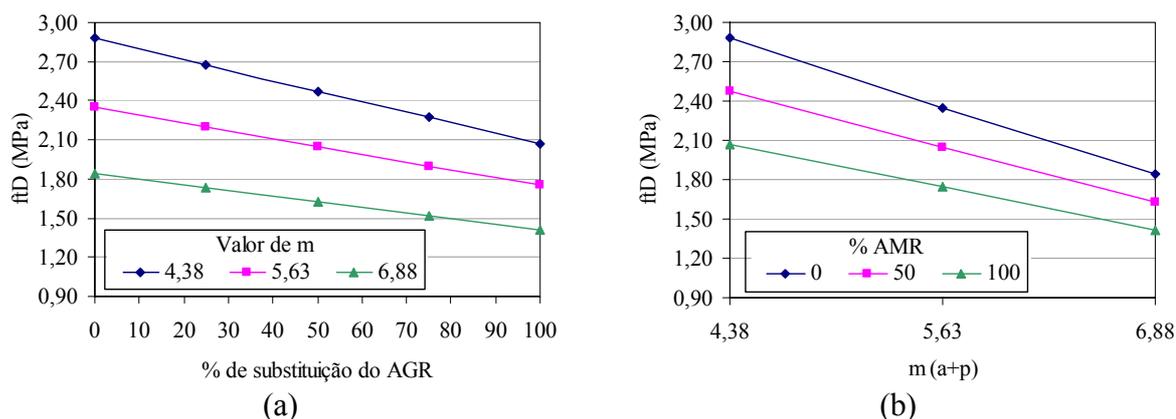


Figura 41: resistência à tração por compressão diametral em função da interação $m \times$ AGR: (a) f_{tD} em função de AGR, para os diferentes valores de m ; (b) f_{tD} em função de m , para os diferentes teores de AGR

Observou-se que para menores valores de m , ou seja, quanto menor a relação a/c , maior a influência do agregado graúdo reciclado sobre a resistência à tração. Como a resistência do agregado reciclado é menor que a do agregado natural, o elo mais fraco do sistema matriz, agregado e zona de transição passa a ser o agregado, que acaba por limitar a resistência à tração do concreto quando alcança sua capacidade limite e fissura. Com o aumento da relação a/c , esse efeito é reduzido, pois a matriz do concreto também tem sua porosidade intrínseca aumentada, diminuindo a influência de um agregado de resistência mais baixa.

Este mesmo fato foi observado por Leite (2001), tanto para a resistência à tração por compressão diametral, como para a resistência à tração na flexão. Para a resistência à tração por compressão diametral a redução na resistência foi muito pouco significativa com o aumento no percentual de AGR, sendo 8% e 5% quando a relação a/c varia de 0,40 para 0,80, respectivamente. Já as reduções na resistência à tração na flexão verificadas com o aumento de AGR foram muito altas, 43% para a relação a/c 0,40 e 21% para a relação a/c 0,80.

6.3.4 Relação entre as resistências à tração e à compressão

A resistência à compressão é a propriedade normalmente utilizada em projetos estruturais. Entretanto, em algumas situações, como projetos de placas de rodovias e aeroportos, a determinação da resistência à tração torna-se importante. Esses dois tipos de resistência estão intimamente relacionados, no entanto, não há uma proporcionalidade direta. À medida que a resistência à compressão aumenta, a resistência à tração também aumenta, mas a uma razão decrescente (NEVILLE, 1997).

A relação entre essas duas resistências pode ser influenciada por diversos fatores, como tempo de cura, relação a/c e tipo de agregado. De acordo com Mehta e Monteiro (1994), quanto maior a resistência à compressão, menor a relação f_t/f_c . Os autores relatam relações que variam entre 11 e 7%, para concretos com resistências entre 7 e 62 MPa. Leite (2001) também observou uma diminuição da relação f_t/f_c com o aumento da resistência à compressão, entretanto, a autora encontrou maiores resultados desta relação para os concretos com agregados reciclados.

A tabela 28 apresenta a relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão dos concretos aos 28 dias. Os dados para a tabela foram obtidos a partir dos valores de resistência determinados através das equações 9 e 11, utilizando como coeficiente da coleta o nível codificado referente à coleta 1 e variando os níveis codificados das demais variáveis.

Pelos resultados apresentados na tabela, observa-se que a relação f_t/f_c variou muito pouco, entre 8,8 e 9,7%, num intervalo de resistência à compressão de 13 a 34 MPa. Este intervalo está dentro da faixa apresentada por Mehta e Monteiro (1994) para concretos com agregados naturais. No entanto, estes valores são diferentes das relações f_t/f_c para concretos com agregados reciclados verificadas na bibliografia. Katz (2003), por exemplo, para um intervalo de resistência à compressão entre 26 e 42 MPa, encontrou uma relação f_t/f_c na faixa de 9 a 13%. Leite (2001) encontrou valores muito superiores, entre 11 e 31%.

Tabela 28: relação entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão dos concretos aos 28 dias

a/c	% AGR	f_tD/f_c (%)		
		% AMR		
		0	50	100
0,50	0	8,9	8,8	8,8
	50	9,0	8,9	8,9
	100	9,4	9,0	9,0
0,60	0	9,4	9,4	9,5
	50	9,3	9,3	9,4
	100	9,2	9,2	9,2
0,70	0	9,6	9,6	9,7
	50	9,2	9,3	9,4
	100	8,9	9,0	9,1

A partir dos dados de resistência utilizados para a elaboração da tabela 28, foi definido um modelo que relaciona a resistência à tração por compressão diametral com a resistência à compressão, mostrado na equação 12. Foi obtido um R^2 de 0,97 para o modelo.

$$f_{tD} = 0,12 \times (f_c)^{0,92} \quad (\text{equação 12})$$

onde:

f_{tD} = resistência à tração por compressão diametral (MPa)

f_c = resistência à compressão axial (MPa)

Este modelo foi elaborado a partir de fórmulas sugeridas por outros autores, do tipo: $f_t = k \times (f_c)^n$, onde k e n são constantes. Neville (1997) cita alguns autores que elaboraram equações com essa mesma estrutura, como Gardner e Poon (1976), Raphael (1984) e Oluokun (1991). Segundo o autor, foram sugeridos valores de n entre $\frac{1}{2}$ e $\frac{3}{4}$.

6.3.5 Considerações gerais

Com o objetivo de realizar uma comparação geral da resistência à tração por compressão diametral dos concretos com agregados reciclados com os concretos de referência, elaborou-se a figura 42, que relaciona a resistência com a relação a/c. Também foi elaborada a tabela 29, que apresenta o resultado de resistência à tração por compressão diametral e a relação com o concreto de referência das combinações contempladas a partir das variáveis estudadas.

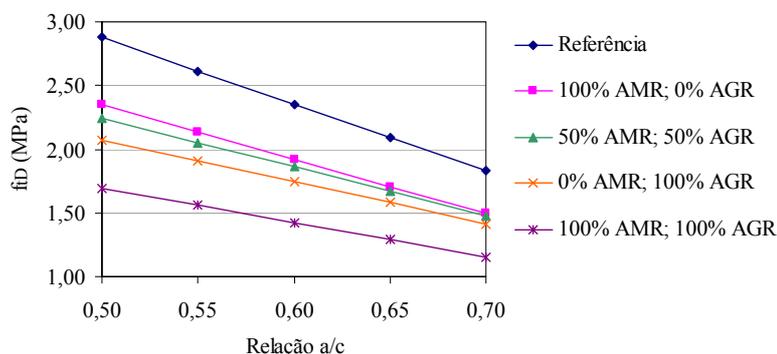


Figura 42: curvas de resistência à tração por compressão diametral em função da relação a/c

Tabela 29: comparação geral das resistências à tração por compressão diametral dos concretos com diferentes teores de substituição do agregado natural pelo reciclado

a/c	Traço	ftD (MPa)	Varição da resistência em relação ao concreto de referência
0,50	Referência	2,88	-
	0% AMR; 50% AGR	2,47	0,86
	0% AMR; 100% AGR	2,07	0,72
	50% AMR; 0% AGR	2,61	0,91
	50% AMR; 50% AGR	2,24	0,78
	50% AMR; 100% AGR	1,88	0,65
	100% AMR; 0% AGR	2,35	0,82
	100% AMR; 50% AGR	2,01	0,70
	100% AMR; 100% AGR	1,69	0,59
0,60	Referência	2,35	-
	0% AMR; 50% AGR	2,05	0,87
	0% AMR; 100% AGR	1,75	0,74
	50% AMR; 0% AGR	2,13	0,91
	50% AMR; 50% AGR	1,86	0,79
	50% AMR; 100% AGR	1,59	0,68
	100% AMR; 0% AGR	1,92	0,82
	100% AMR; 50% AGR	1,67	0,71
	100% AMR; 100% AGR	1,43	0,61
0,70	Referência	1,84	-
	0% AMR; 50% AGR	1,63	0,89
	0% AMR; 100% AGR	1,41	0,77
	50% AMR; 0% AGR	1,67	0,91
	50% AMR; 50% AGR	1,48	0,80
	50% AMR; 100% AGR	1,28	0,70
	100% AMR; 0% AGR	1,50	0,82
	100% AMR; 50% AGR	1,33	0,72
	100% AMR; 100% AGR	1,15	0,63

Através dos dados apresentados na tabela acima, percebe-se que todos os traços com agregados reciclados apresentaram redução da resistência à tração quando comparados com o concreto de referência. Essa redução foi semelhante para as diferentes relações a/c, quando se compara uma mesma combinação, variando de 9 a 41% de acordo com o teor de substituição dos agregados naturais pelos reciclados. No entanto, a redução é um pouco menor para os traços com relações a/c mais altas, exceto para as combinações contendo apenas agregados miúdos reciclados, onde

o aumento da relação a/c não influenciou na relação com a resistência do concreto com agregado natural.

O traço com agregado reciclado que apresentou melhor desempenho foi o que continha 50% de AMR e 0% de AGR, cuja relação com o concreto de referência foi de 0,91 para as três relações a/c estudadas. Outra combinação que obteve bom desempenho foi a de 50% de AGR e 0% de AMR, com uma relação em torno de 0,87 com o concreto de referência. Estes traços foram os mesmos que apresentaram o melhor desempenho para a resistência à compressão, conforme foi apresentado no item 6.2.7.

Como na resistência à tração por compressão diametral a variável coleta não teve efeito significativo, isto significa que as variações na composição dos RCD e na densidade dos agregados não chegaram a influenciar esta propriedade, assim como outras características dos materiais utilizados. Dessa forma, conclui-se que as diferenças medidas pela separação por densidades e pela composição dos RCD não podem ser utilizadas como parâmetros de controle da resistência à tração por compressão diametral dos concretos com agregados reciclados, pois não se refletiram nos resultados obtidos.

6.4 MÓDULO DE DEFORMAÇÃO

Toda tensão é acompanhada de uma deformação. A relação entre tensões e deformações é muito importante no projeto de estruturas de concreto. O concreto é um material heterogêneo e multifásico, onde a fração volumétrica, a massa específica e o módulo de deformação dos seus principais componentes e as características da zona de transição influenciam no seu comportamento elástico. Como a massa específica está relacionada com a porosidade de um material, os fatores que influenciam a porosidade do agregado, da matriz da pasta de cimento e da zona de transição irão afetar o módulo de deformação. Sabe-se que os agregados reciclados, por um lado, apresentam alta porosidade e, por outro, proporcionam melhoria na zona de transição do concreto. Portanto os agregados reciclados irão influenciar no módulo de deformação dos concretos produzidos com eles.

A equação 13 apresenta o modelo ajustado para o módulo de deformação secante, correspondente a 80% da tensão última, cujo coeficiente de determinação (R^2) obtido foi 0,89. Para a análise dos dados, devido à variabilidade dos resultados, foram utilizados apenas dois

resultados por traço para a obtenção da média, sendo desconsiderado o valor que mais se afastou do valor médio do módulo de deformação.

$$E_{sec} = C \times 13,49 \times \left(\frac{0,5}{a/c}\right)^{0,48} \times \left(1 - \frac{AGR}{5,76}\right) \times \left(1 - \frac{AMR}{5,49}\right) \times \left(1 - \frac{m}{8,67}\right) \times [1 - (-0,04 \times AGR \times m)] \quad (\text{equação 13})$$

onde:

E_{sec} = módulo de deformação secante correspondente à 80% f_c (GPa)

C = coeficiente relativo à coleta, codificado segundo a tabela 30

a/c = relação água/cimento real

AGR = percentual de agregado graúdo reciclado, codificado segundo a tabela 22

AMR = percentual de agregado miúdo reciclado, codificado segundo a tabela 22

m = relação agregados secos/cimento em massa, codificada segundo a tabela 22

Tabela 30: níveis codificados da variável **coleta** para E_{sec}

Coleta	Nível codificado
1	0,92
2	0,95
3	1,00

Pela análise de variância (apêndice B, tabela 45), todos os fatores controláveis apresentaram efeito significativo sobre o módulo de deformação. Além deles, foram significativas as interações **coleta x AGR**, **coleta x AMR**, **m x AGR**, **m x AMR** e **AGR x AMR**. No entanto, a inserção das interações no modelo, exceto a interação $m \times AGR$, não melhorou o ajuste dele, e, portanto, esses termos não foram considerados.

6.4.1 Efeito isolado de m sobre o módulo de deformação do concreto

O efeito de m sobre o módulo de deformação do concreto está apresentado na figura 43, obtida através da equação 13, variando-se os valores codificados de m e mantendo as demais variáveis fixas.

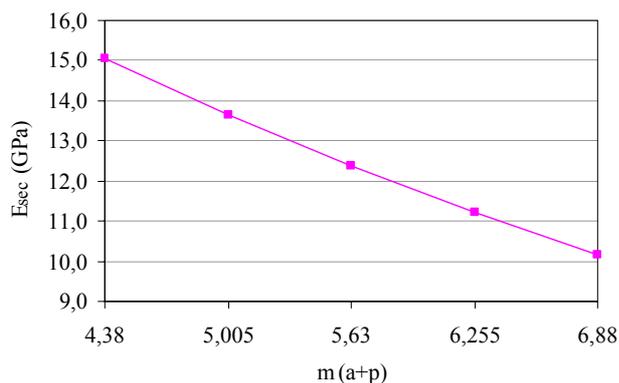


Figura 43: módulo de deformação em função do valor de m

Assim como na resistência à compressão e na resistência à tração, o módulo de deformação tende a diminuir à medida que o valor de m aumenta. Quando este passa de 4,38 para 6,88 ocorre uma redução de 32% no valor do módulo de deformação. A porosidade da matriz da pasta de cimento e, principalmente, do agregado, determina o seu módulo de deformação. Sabe-se que a porosidade é influenciada pela relação a/c. Logo, como um aumento no valor de m significa um aumento na relação a/c, aumenta a porosidade da matriz, reduzindo conseqüentemente o módulo de deformação.

6.4.2 Efeito isolado do teor de substituição do agregado miúdo reciclado e do agregado graúdo reciclado e efeito da interação AMR x AGR sobre o módulo de deformação do concreto

Conforme se pode visualizar na figura 44, que mostra o efeito isolado de AMR e de AGR sobre o módulo de deformação, tanto o agregado miúdo reciclado como o agregado graúdo reciclado provocam diminuição do módulo de deformação do concreto. Esta diminuição é praticamente igual para ambos agregados, em torno de 30%.

Gonçalves (2001) verificou uma grande influência da fração miúda no módulo de deformação do concreto. Através de resultados encontrados na bibliografia e obtidos em seu trabalho experimental, o autor constatou que a influência do agregado miúdo reciclado, em alguns momentos, é superior à do agregado graúdo reciclado.

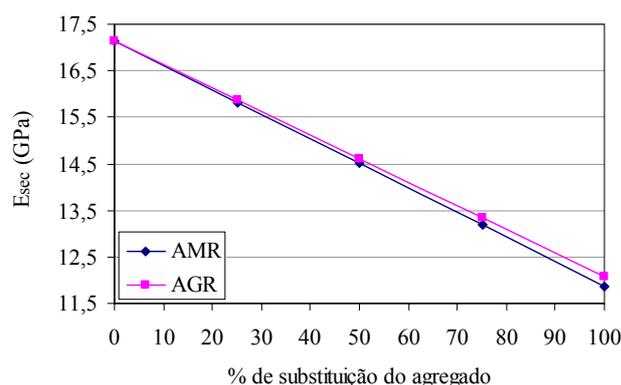


Figura 44: módulo de deformação em função do teor de substituição dos agregados

Na figura 45 pode ser visualizado o efeito da interação AMR x AGR sobre o módulo de deformação. O aumento no teor de substituição de AMR provoca maior influência sobre o módulo de deformação dos concretos que já contém agregados graúdos reciclados do que no concreto com agregados graúdos naturais. Da mesma forma, em concretos com 50 ou 100% de AMR, o aumento no percentual de AGR na mistura provoca maior redução no valor do módulo de deformação que em concretos contendo apenas agregados graúdos naturais.

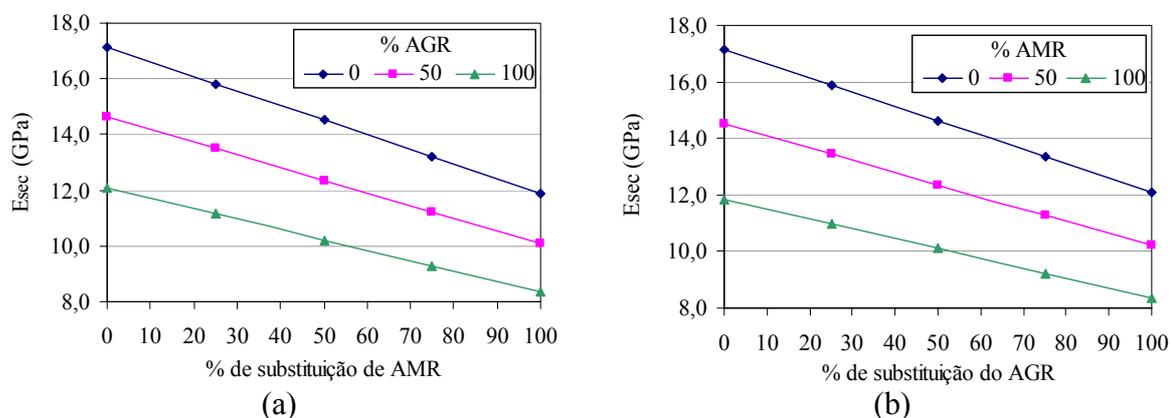


Figura 45: módulo de deformação em função da interação AMR x AGR: (a) Esec em função de AMR, para os diferentes teores de AGR; (b) Esec em função de AGR, para os diferentes teores de AMR

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), agregados densos possuem módulo de deformação alto e, portanto, quanto maior a quantidade de agregados densos numa mistura de concreto, maior será o módulo de deformação do concreto. Como os agregados reciclados, tanto graúdos como miúdos, são mais porosos e menos densos que os agregados naturais, pode-se dizer que eles provocam uma diminuição do módulo de deformação do concreto, fato que foi confirmado nos resultados experimentais obtidos.

Xiao et al. (2005) também atribuem ao menor módulo de deformação do agregado reciclado os resultados de módulo de deformação obtidos para o concreto. Os autores observaram uma redução de 45% no módulo de deformação do concreto quando o percentual de agregado graúdo de concreto era 100%. Debieb e Kenai (2007) obtiveram reduções superiores a 30, 40 e 50%, quando o agregado natural era substituído pelo agregado reciclado de cerâmica vermelha nas frações graúda, miúda ou a combinação das duas, respectivamente. As diferenças nos percentuais de redução observados nas diversas pesquisas são devidas aos diferentes módulos de deformação dos agregados reciclados utilizados.

6.4.3 Efeito das interações $m \times$ AMR e $m \times$ AGR sobre o módulo de deformação do concreto

A partir da equação 13 foram obtidas as figuras 46(a) e 46(b), que representam o módulo de deformação em função da interação $m \times$ AMR. Pela figura 46(a), percebe-se que, para os três valores de m considerados nesta pesquisa, o módulo de deformação tende a reduzir quanto maior o percentual de substituição do agregado miúdo reciclado. A redução nos valores do módulo foi semelhante para todos os valores de m , variando apenas meio ponto percentual, fato que pode ser justificado pela fraca significância apresentada por esta interação.

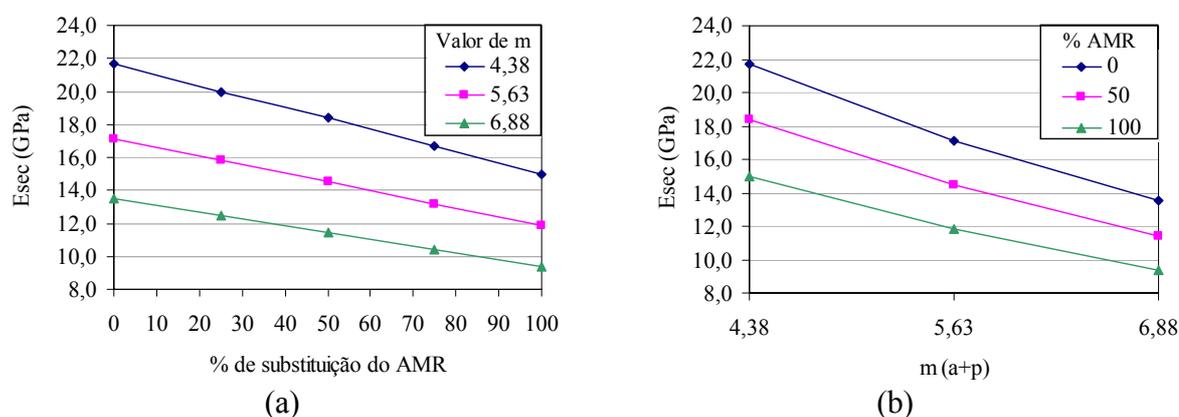


Figura 46: módulo de deformação em função da interação $m \times$ AMR:
 (a) E_{sec} em função de AMR, para os diferentes valores de m ; (b) E_{sec} em função de m , para os diferentes teores de AMR

Na figura 46(b), observa-se que o comportamento da curva $E_{sec} \times m$ para o concreto com agregados reciclados é praticamente igual ao comportamento do concreto de referência, reduzindo-se o módulo de deformação com o aumento do valor de m . Esta redução foi maior para os concretos contendo 50% de AMR e menor para os concretos com 100% de AMR.

O efeito da interação **m x AGR** sobre o módulo de deformação está mostrado na figura 47. Na figura 47(a), pode-se observar que o comportamento ocorrido para a interação **m x AMR** se repete para a interação **m x AGR**, ou seja, para os três valores de **m**, o aumento no percentual de **AGR** provoca redução no módulo. O percentual de redução diminui com o aumento do valor de **m**. Quando o valor de **m** é 4,38, o aumento do teor de substituição de **AGR** de 0 para 100% provoca uma redução de 35% no módulo de deformação. Para um valor de **m** de 6,88, o aumento do teor de **AGR** reduz em 24% o valor do módulo.

Na figura 47(b) visualiza-se o efeito do aumento do valor de **m**, ou seja, aumento da relação **a/c** no módulo de deformação do concreto. Assim como na resistência à compressão, esse efeito é mais significativo para o concreto de referência, cuja redução foi de 37,8% quando o valor de **m** aumenta de 4,38 para 6,88. Para o concreto com 100% de agregado graúdo reciclado a redução do módulo de deformação com o aumento do valor de **m** foi de 27,0%.

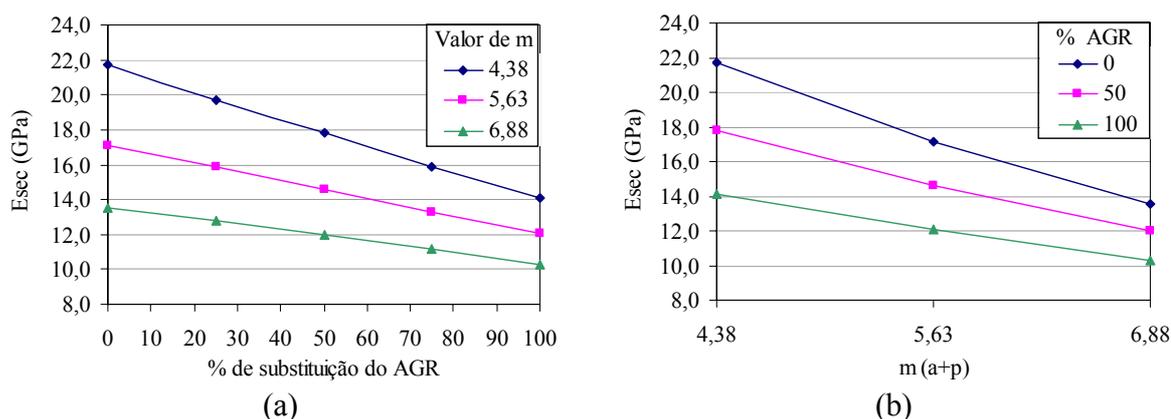


Figura 47: módulo de deformação em função da interação **m x AGR**: (a) E_{sec} em função de **AGR**, para os diferentes valores de **m**; (b) E_{sec} em função de **m**, para os diferentes teores de **AGR**

6.4.4 Verificação da validade da caracterização dos agregados por diferentes faixas de densidade como parâmetro de controle do módulo de deformação secante do concreto

A partir dos dados analisados no capítulo 5, relativos à caracterização dos agregados e resíduos coletados, os efeitos relativos à variável coleta e suas interações serão relacionados a seguir com as características dos agregados reciclados.

A figura 48 apresenta o efeito isolado da variável coleta sobre o módulo de deformação do concreto. Esta foi obtida variando os valores codificados da variável coleta e mantendo as demais variáveis no ponto médio de cada uma delas.

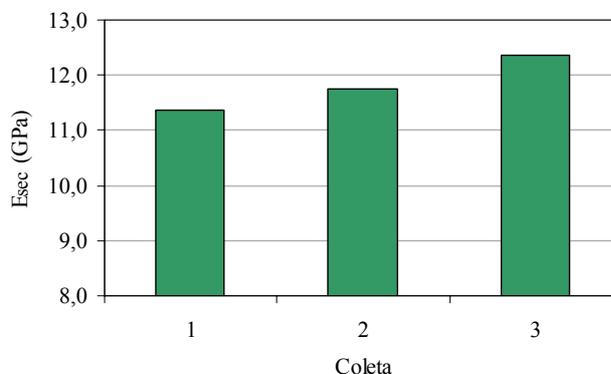


Figura 48: módulo de deformação em função da origem do RCD

Pela análise desta figura, percebe-se que a coleta 3 apresentou o valor mais alto do módulo de deformação. Para a coleta 1, foi obtido módulo de deformação 8% menor que o da coleta 3 e para a coleta 2, o módulo de deformação encontrado foi quase 6% menor que o da coleta 3. Conforme mencionado anteriormente, agregados mais densos resultam em concretos com maiores módulos de deformação. Este fato foi confirmado nesta pesquisa, uma vez que os agregados da coleta 3 apresentaram os maiores valores de massa específica.

Na figura 49 são mostrados os efeitos dos teores de substituição dos agregados miúdos e graúdos para cada coleta de material. Assim como já foi observado no efeito isolado da coleta sobre o módulo, a coleta 3 apresentou os resultados mais altos, seguida pelas coletas 2 e 1, respectivamente.

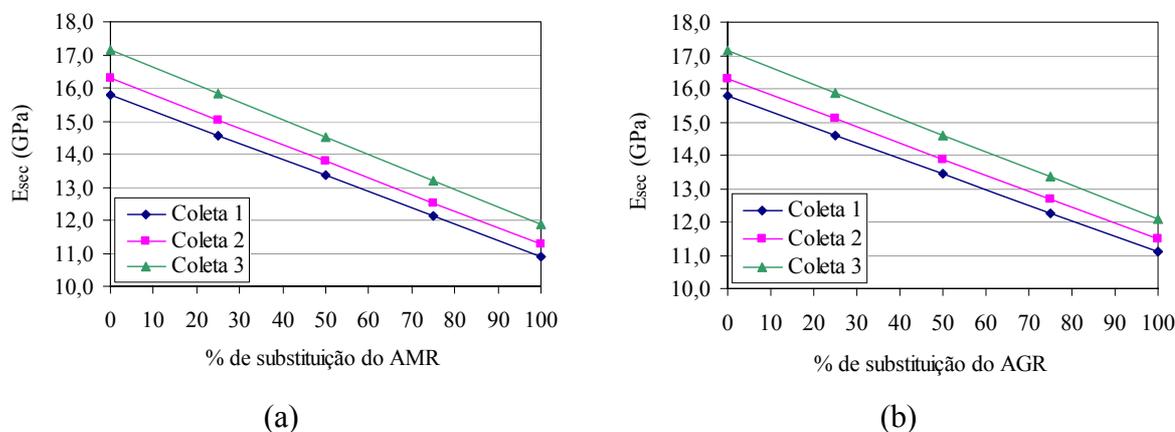


Figura 49: módulo de deformação em função dos teores de substituição dos agregados, para as diferentes coletas: (a) E_{sec} em função de AMR; (b) E_{sec} em função de AGR

Pode-se observar nas figuras que para todas as coletas ocorreu redução no módulo com o aumento do percentual de agregados reciclados. A redução foi semelhante para as três coletas, sendo maior para a coleta 1.

Na figura 49(b), referente à influência dos agregados graúdos reciclados no módulo de deformação, verificou-se que a coleta 3 apresenta maior módulo de deformação. Conforme a separação por densidades, mostrada na tabela 16, a coleta 3 apresenta maior quantidade de partículas com densidade superior a 2,4, o que justifica esse comportamento. Carrijo (2005) e Angulo (2005) também verificaram que os agregados com maior densidade apresentam melhores resultados de módulo de deformação.

No caso das coletas 1 e 2, as quais apresentaram uma diferença de apenas 2,5% entre seus módulos de deformação, o fato de ter-se observado melhor desempenho para a coleta 2 também pode ser explicado pela densidade dos agregados. Apesar de a coleta 1 apresentar maior percentual de material graúdo na faixa de densidade $d > 2,4$ que a coleta 2, esta última apresenta maior percentual de material nas duas faixas de densidade superiores (43%) que a primeira coleta (35%). Isso pode explicar essa pequena diferença entre os valores dos módulos, uma vez que as massas específicas dos materiais (graúdos e miúdos) destas coletas são praticamente iguais.

Dessa forma, pode-se dizer que a densidade dos agregados reciclados é uma característica determinante do módulo de deformação do concreto, podendo ser utilizada como parâmetro de controle do comportamento, uma vez que esta propriedade depende principalmente de características dos agregados.

Quanto à composição dos RCD, não se verifica uma relação com o módulo de deformação, uma vez que, por exemplo, partículas de cerâmica podem apresentar diferentes densidades e nessa propriedade a densidade do agregado é que mais influencia no comportamento. Logo, não é possível relacionar se um agregado de cerâmica ou de argamassa vai resultar no melhor comportamento, uma vez que, dependendo da qualidade destes materiais, suas densidades podem variar.

6.4.5 Relação entre o módulo de deformação e a resistência à compressão do concreto

Sabe-se que existe uma relação entre o módulo de deformação e a resistência à compressão do concreto, sendo que o primeiro aumenta com o acréscimo do segundo. A relação entre estas duas propriedades é importante no caso de projetos estruturais. A fim de estabelecer esta relação para os concretos com agregados reciclados, foi elaborado o modelo da equação 14, que relaciona o módulo de deformação, em GPa, e a resistência à compressão, em MPa, para o intervalo de resistência $11,9 < f_c < 32,4$ MPa. O coeficiente de correlação (R^2) obtido para o modelo foi 0,86.

$$E_{sec} = 5,74 \times (f_c)^{0,5} - 13,39 \quad (\text{equação 14})$$

onde:

E_{sec} = módulo de deformação (GPa)

f_c = resistência à compressão axial (MPa)

Apesar de a expressão sugerida por normas nacionais e internacionais seguir o formato $e_c = k \times (f_c)^{0,5}$, a inserção do termo “13,39” foi baseada no modelo obtido por Leite (2001), que empregou mais um termo no modelo que relaciona o módulo de deformação e a resistência à compressão de concretos com agregados reciclados.

6.4.6 Considerações gerais

Visando realizar uma análise geral do comportamento do módulo de deformação dos concretos com agregados reciclados, comparando-os com o concreto de referência, elaborou-se a figura 50, a partir da equação 13. A figura mostra as curvas do módulo de deformação, para alguns traços estudados, em função da relação a/c.

Pode ser visualizado nesta figura que, assim como nas outras propriedades avaliadas, nenhum traço superou o concreto de referência e o concreto com 100% de substituição de ambas as frações de agregados foi o que apresentou pior de desempenho. Os outros traços observados na figura apresentaram resultados do módulo de deformação muito semelhantes entre si, entretanto, cada um deles teve comportamento diferente com o aumento da relação a/c.

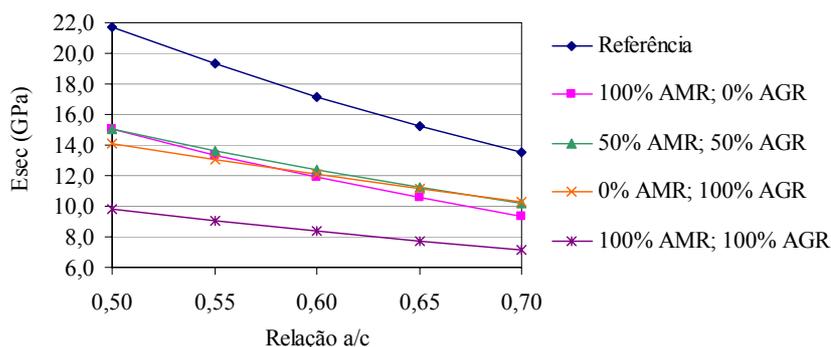


Figura 50: curvas do módulo de deformação em função da relação a/c

Na tabela 31 são mostradas as relações entre o módulo de deformação dos concretos com agregados reciclados e o seu respectivo concreto de referência. Observa-se que quanto maior a relação a/c, menor a redução do módulo em relação ao concreto de referência. Para os traços contendo apenas agregado miúdo reciclado, a relação permanece a mesma, independente da relação a/c.

Os valores de redução obtidos superam os apresentados na bibliografia, onde são apontadas reduções de até 40% para o módulo de deformação de concretos com agregados reciclados. Para alguns traços estudados, encontrou-se redução de até 55%. Os traços contendo 50% de AMR, ou 50% de AGR são os que mais se aproximam do concreto de referência, apresentando reduções que variam entre 11 e 18%, dependendo da relação a/c.

Tabela 31: comparação geral dos módulos de deformação dos concretos com diferentes teores de substituição do agregado natural pelo reciclado

a/c	Traço	Esec (GPa)	Varição do módulo em relação ao concreto de referência
0,50	Referência	21,7	-
	0% AMR; 50% AGR	17,8	0,82
	0% AMR; 100% AGR	14,1	0,65
	50% AMR; 0% AGR	18,4	0,85
	50% AMR; 50% AGR	15,0	0,69
	50% AMR; 100% AGR	11,9	0,55
	100% AMR; 0% AGR	15,0	0,69
	100% AMR; 50% AGR	12,3	0,57
	100% AMR; 100% AGR	9,8	0,45
0,60	Referência	17,1	-
	0% AMR; 50% AGR	14,6	0,85
	0% AMR; 100% AGR	12,1	0,70
	50% AMR; 0% AGR	14,5	0,85
	50% AMR; 50% AGR	12,4	0,72
	50% AMR; 100% AGR	10,2	0,60
	100% AMR; 0% AGR	11,9	0,69
	100% AMR; 50% AGR	10,1	0,59
	100% AMR; 100% AGR	8,4	0,49
0,70	Referência	13,5	-
	0% AMR; 50% AGR	12,0	0,89
	0% AMR; 100% AGR	10,3	0,76
	50% AMR; 0% AGR	11,4	0,85
	50% AMR; 50% AGR	10,2	0,75
	50% AMR; 100% AGR	8,7	0,65
	100% AMR; 0% AGR	9,4	0,69
	100% AMR; 50% AGR	8,3	0,61
	100% AMR; 100% AGR	7,1	0,53

6.5 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

A taxa de deterioração de muitos tipos de concreto depende da sua porosidade capilar. A absorção de água é um dos principais mecanismos de entrada de água no concreto endurecido e a presença de água no concreto é necessária para que a maioria dos mecanismos de deterioração ocorra (HANSEN, 1992). Segundo Neville (1997), a absorção não pode ser usada como uma medida de qualidade do concreto, entretanto, a maioria dos bons concretos apresenta taxa de

absorção inferior a 10%. Quando se avalia a absorção de água, pode-se dizer que está se procurando determinar o total dos poros permeáveis na estrutura de concreto.

A análise de variância dos resultados experimentais mostrou que a influência de cada variável sobre a absorção de água do concreto foi diferente para cada coleta. Com isso, não foi possível trabalhar com apenas um modelo para essa propriedade, assim como foi feito nas demais, onde se utilizou um coeficiente referente à coleta. Dessa forma, realizou-se análise de variância (apêndice B, tabelas 46 a 48) para os resultados de cada coleta e elaborou-se um modelo para cada coleta. As equações 15, 16 e 17 constam na tabela 32.

Tabela 32: modelos ajustados para estimativa da absorção de água por imersão dos concretos com agregados reciclados

Equações	R ²	Equação n°
$A_{C1} = (10,26 \times a/c) \times [1 - (-0,56 \times AGR)] \times [1 - (-0,21 \times AMR)] \times [1 - (0,12 \times m)] \times [1 - (0,28 \times AGR \times AMR)] \times [1 - (0,05 \times m \times AMR)] \times [1 - (0,12 \times m \times AGR)]$	0,90	(equação 15)
$A_{C2} = (5,58 \times a/c) \times [1 - (-0,13 \times AGR)] \times [1 - (-0,19 \times AMR)] \times [1 - (0,10 \times m)] \times [1 - (-0,007 \times AGR \times AMR)] \times [1 - (-0,04 \times m \times AMR)] \times [1 - (-0,07 \times m \times AGR)]$	0,90	(equação 16)
$A_{C3} = (7,14 \times a/c) \times [1 - (-0,10 \times AGR)] \times [1 - (-0,16 \times AMR)] \times [1 - (0,10 \times m)] \times [1 - (0,19 \times AGR \times AMR)] \times [1 - (0,006 \times m \times AMR)] \times [1 - (-0,001 \times m \times AGR)]$	0,53	(equação 17)

onde:

A_{C1} = absorção de água para a coleta 1 (%)

A_{C2} = absorção de água para a coleta 2 (%)

A_{C3} = absorção de água para a coleta 3 (%)

a/c = relação água/cimento real

AGR = percentual de agregado graúdo reciclado, codificado segundo a tabela 22

AMR = percentual de agregado miúdo reciclado, codificado segundo a tabela 22

m = relação agregados secos/cimento em massa, codificada segundo a tabela 22

Procurou-se manter o mesmo formato de equação para o modelo de cada coleta, alterando-se apenas os coeficientes. Como os elementos significativos em cada coleta não foram os mesmos, foram inseridas as variáveis e interações na equação, buscando o melhor ajuste para o modelo. Mesmo assim, observa-se que o coeficiente de determinação para o modelo da coleta 3 foi

baixo. Portanto, os resultados e tendências obtidos através do modelo desta coleta podem não representar corretamente o comportamento dos concretos quanto à absorção de água.

6.5.1 Efeito isolado da coleta sobre a absorção de água do concreto

Na figura 51 é mostrado o efeito da variável coleta sobre a absorção de água. A figura foi obtida mantendo as variáveis no ponto médio de cada uma delas, na equação correspondente a cada coleta.

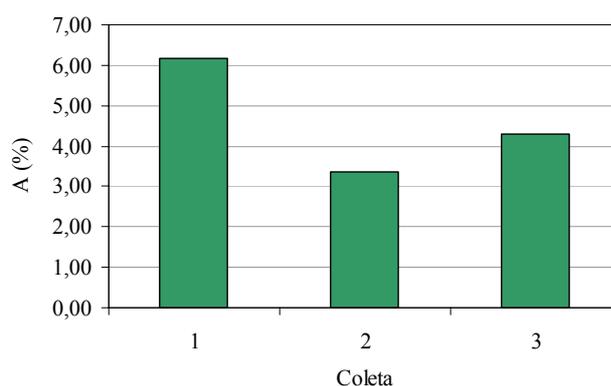


Figura 51: absorção de água em função da origem do RCD

Observa-se que a coleta 2 apresentou o menor valor de absorção, ou seja, o melhor desempenho quanto a essa propriedade. A coleta 3 teve uma absorção de água 27,8% maior que a da coleta 2 e a coleta 1 apresentou a maior taxa de absorção, 83,9% superior à da coleta 2.

Alguns autores, como Gonçalves (2001) e Buttler (2003), atribuem à maior quantidade de argamassa aderida nas partículas do agregado reciclado as maiores taxas de absorção, ou seja, a argamassa seria a responsável pelo aumento da absorção do concreto. Entretanto, isto não se confirma nesta pesquisa, uma vez que a coleta 2 possuía 44% de argamassa em sua composição e a coleta 3 possuía 35%, e estas coletas apresentaram absorção inferior à da coleta 1, que continha 22% de argamassa. Mesmo considerando a argamassa do concreto, a coleta 2 permanece com maior quantidade de argamassa que as demais coletas.

Uma possível explicação seria que a absorção de concretos com agregados reciclados estaria sendo influenciada apenas pelo agregado graúdo. Sabe-se que em concretos com agregados convencionais, os quais são mais densos e apresentam absorção muito baixa, a absorção de água dos concretos depende da porosidade da matriz. Já em concretos com agregados reciclados, que são menos densos e, conseqüentemente, mais porosos, a absorção dos agregados também influencia. Leite (2001) observou, através de análise de microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários, que no concreto com agregados reciclados a matriz e a zona de transição

praticamente se confundem. Além disso, os produtos de hidratação cobrem a superfície dos agregados reciclados, densificando a zona de transição. A autora comprovou que ocorre a formação de produtos de hidratação na superfície porosa e rugosa do agregado devido à absorção da pasta de cimento pelo material reciclado. Dessa forma, os agregados miúdos reciclados absorvem a pasta de cimento, fechando seus poros. No caso dos agregados graúdos reciclados, devido à sua dimensão, isto não acontece e, por isso, é possível que a absorção dos concretos fique condicionada apenas à porosidade dos agregados graúdos.

Observando a tabela 21, que apresenta as taxas de absorção dos agregados reciclados, verifica-se que os agregados graúdos da coleta 1 possuem maior absorção que os das outras duas coletas, os quais apresentam valores muito próximos entre si, da mesma forma como foi observado na absorção dos concretos.

6.5.2 Efeito da interação $m \times$ coleta sobre a absorção de água do concreto

Pela análise da figura 52, verifica-se que à medida que se aumenta o valor de m , a absorção também aumenta, para todas as coletas. Apesar de seguir o mesmo comportamento para as três coletas, o aumento da absorção com o aumento do valor de m é menor para a coleta 1, ficando em torno de 10%. Para as coletas 2 e 3, o aumento da absorção com o aumento de m foi semelhante, em torno de 14,5%.

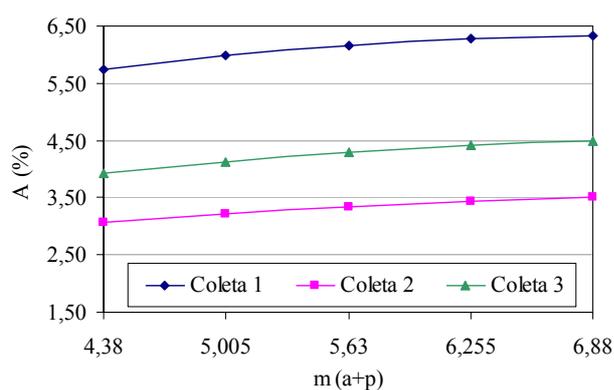


Figura 52: absorção de água em função do valor de m

Conforme já mencionado neste trabalho, quando se considera o aumento do valor de m , pode-se considerar o aumento da relação a/c . A relação a/c determina a porosidade da pasta de cimento endurecida. Quanto maior for a relação a/c , maior será a porosidade, influenciando

negativamente nas propriedades do concreto, fato que foi verificado para todas as propriedades avaliadas nesta pesquisa.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), a água adicionada na mistura é indiretamente responsável pela porosidade capilar da pasta endurecida de cimento. A quantidade de água determina, primeiramente, o espaço total e, após a água ser consumida pelas reações de hidratação do cimento ou evaporação para o ambiente, determina o espaço vazio. Este permite que a água seja absorvida pelo concreto.

6.5.3 Efeito das interações coleta x AMR e coleta x AGR sobre a absorção de água do concreto

Não há um consenso na bibliografia sobre qual fração do agregado reciclado, miúda ou graúda, causa maior influência sobre a absorção de água. Neste trabalho, pela análise das figuras 53(a) e 53(b), inicialmente não é possível determinar claramente qual fração do agregado exerce maior influência sobre a absorção.

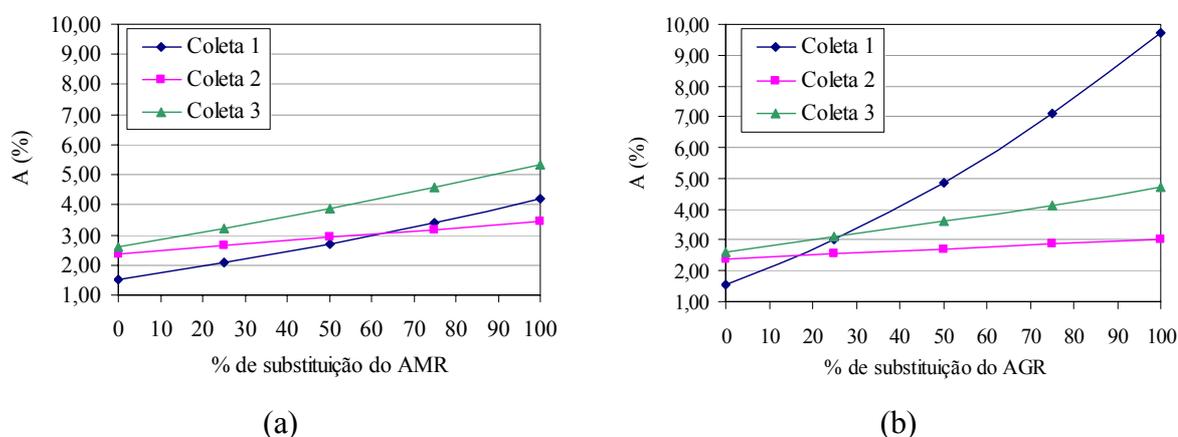


Figura 53: absorção de água em função dos diferentes teores de substituição dos agregados, considerando cada coleta: (a) A em função de AMR; (b) A em função de AGR

Observa-se nas figuras que, para a coleta 1, o AGR exerceu maior influência na absorção que o AMR. Já para as coletas 2 e 3, o aumento na absorção de água foi maior para concretos com agregados miúdos reciclados. Entretanto, a análise de variância da coleta 3 mostrou que a influência do agregado graúdo reciclado é mais significativa que do agregado miúdo reciclado. É importante lembrar que o modelo obtido para essa coleta apresentou baixo coeficiente de determinação e isto deve ter influenciado no comportamento verificado na figura.

Com base nos fatos relatados acima e nos baixos aumentos percentuais da absorção ocorridos com a inserção de agregados reciclados nos concretos da coleta 2, pode-se dizer que provavelmente o agregado graúdo reciclado influencia mais na absorção dos concretos, conforme já foi apresentado no item 6.5.1.

Na figura 53(b) observa-se que para percentuais de agregado graúdo reciclado superiores a 25%, a coleta 1 apresenta a maior absorção. Esta coleta, conforme verificado na tabela 17, possui 76% de materiais mais porosos na composição dos agregados graúdos. A coleta 2, apesar de ser composta por 83% de cerâmica e argamassa, possui partículas mais densas, conforme foi verificada na separação por densidades (tabela 16). Como os agregados graúdos desta coleta são menos porosos, este pode ser o motivo para que a absorção de seus concretos tenha sido inferior à da coleta 1.

6.5.4 Efeito das interações $m \times$ AMR e $m \times$ AGR sobre a absorção de água do concreto, para cada coleta

Nas figuras 54 e 55 pode ser visualizado o efeito da interação $m \times$ AMR na absorção de água do concreto, para as coletas 1 e 2. Observam-se comportamentos diferenciados entre as duas coletas.

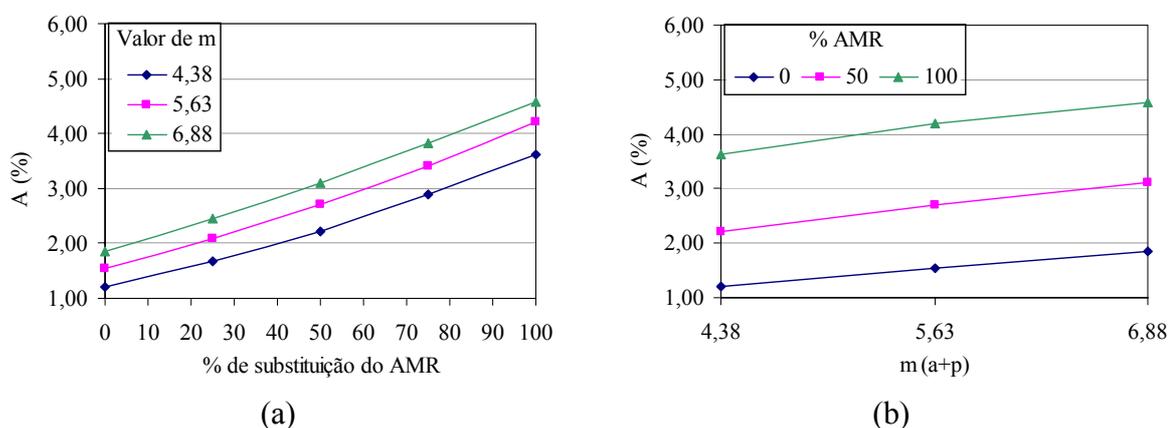


Figura 54: absorção de água em função da interação $m \times$ AMR, para a coleta 1: (a) A em função de AMR, para os diferentes valores de m; (b) A em função de m, para os diferentes teores de AMR

Para ambas as coletas, o aumento do percentual de AMR na mistura provoca aumento na absorção. No entanto, na coleta 1, para $m=4,38$, apesar de apresentar a absorção mais baixa, o aumento no percentual de agregados reciclados provoca maior acréscimo na absorção que para

os outros valores de m . Na coleta 2 observa-se a situação oposta, ou seja, o aumento no teor de agregado miúdo reciclado provoca mais influência na absorção quanto maior o valor de m .

Observando-se a figura 55(b), correspondente à coleta 2, percebe-se que para qualquer percentual de substituição de AMR, a absorção é maior quando $m=5,63$. Quando $m=6,88$, a absorção é inferior à de $m=4,38$ para 0 e 50% de AMR.

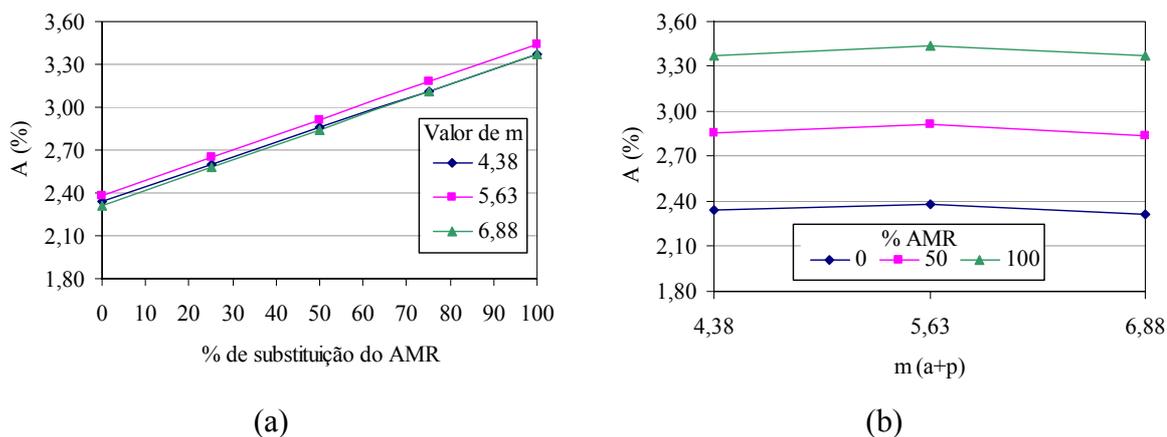


Figura 55: absorção de água em função da interação $m \times$ AMR, para a coleta 2: (a) A em função de AMR, para os diferentes valores de m ; (b) A em função de m , para os diferentes teores de AMR

O efeito da interação $m \times$ AGR para a coleta 2 é mostrado na figura 56. Para as outras coletas esta interação não foi significativa e, dessa forma, não serão apresentadas as interações. Observa-se na figura 56(a) que o aumento no percentual de substituição do AGR provoca aumento no valor da absorção. Quando m é 6,88, o que significa uma relação a/c de 0,70, observa-se maior aumento da absorção, quanto maior o percentual de AGR na mistura, em relação aos demais valores de m , conforme a figura 56(a). Para esta relação a/c , o percentual de aumento da absorção é superior ao causado pela inserção de agregado miúdo reciclado na mistura. É provável que devido às características dos agregados reciclados da coleta 2, para relações a/c mais altas, o maior efeito negativo é causado pelo agregado graúdo.

Na figura 56(b), constata-se que a absorção aumenta com o aumento do valor de m nos concretos com agregados reciclados, sendo que o acréscimo é maior quanto maior o percentual de AGR.

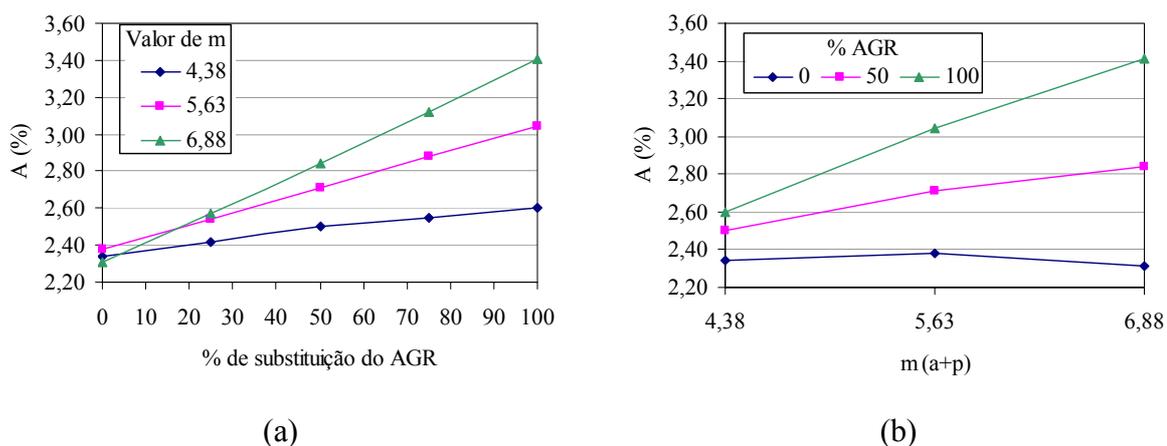


Figura 56: absorção de água em função da interação m x AGR, para a coleta 2: (a) A em função de AGR, para os diferentes valores de m; (b) A em função de m, para os diferentes teores de AGR

6.5.5 Efeito da interação AMR x AGR sobre a absorção de água do concreto, para cada coleta

O efeito da interação AMR x AGR também foi diferente para cada coleta, conforme pode ser visualizado nas figuras 57 a 59. Para os percentuais 0 e 50% de qualquer fração do agregado reciclado, miúda ou graúda, a absorção tende a aumentar com o aumento do percentual da outra fração de agregado reciclado. Para o percentual de 100% verificam-se comportamentos distintos, que serão relatados a seguir.

Na coleta 1, apresentada na figura 57(a), para 100% de AGR, quando o percentual de AMR aumenta de 0 para 25%, ocorre um aumento de apenas 0,92% na absorção, e em seguida, esta decresce com o aumento do percentual do agregado, reduzindo 17% quando se aumenta o percentual de AMR de 25 para 100%. A figura 57(b) mostra que para 100% de AMR, quando se considera o aumento de AGR, a absorção tende a aumentar, no entanto, a taxa de acréscimo vai se reduzindo a partir de 50% de AGR. Esse comportamento pode ter explicação na melhoria da matriz e da zona de transição quando do uso combinado das duas frações do agregado, uma vez que os finos presentes em grande quantidade no agregado miúdo promovem fechamento dos poros, reduzindo a porosidade desses concretos. Outra possibilidade estaria relacionada com a composição dos agregados. No caso da figura 57(a), quando há 100% de AGR, o qual é predominantemente composto por cerâmica e argamassa, a inserção de AMR, que apresenta mais de 60% de concreto e rocha, além de promover o fechamento dos poros, reduz a absorção

pois estes materiais são menos porosos que os primeiros. Já na figura 57(b), como o agregado graúdo reciclado prejudica mais a absorção que o agregado miúdo, a sua inserção apenas reduz a taxa de absorção devido ao uso combinado das duas frações.

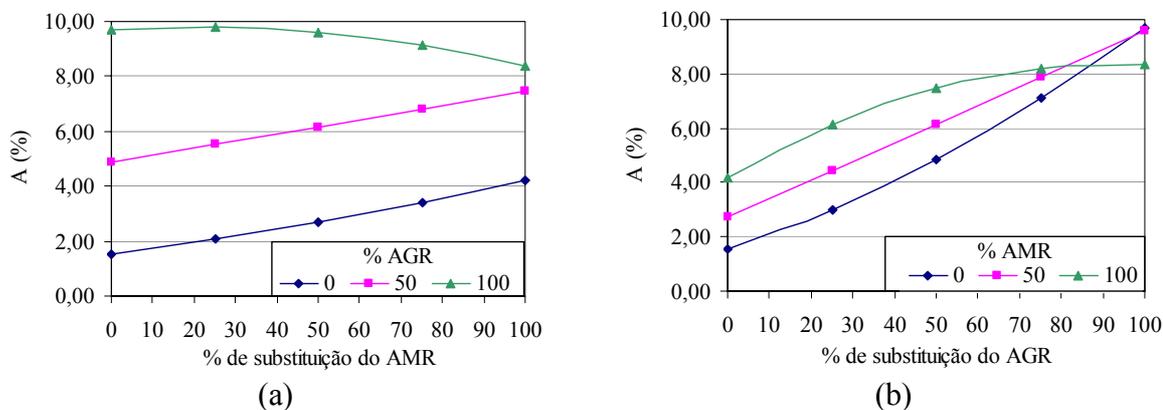


Figura 57: absorção de água em função da interação AMR x AGR, para a coleta 1: (a) A em função de AMR, para os diferentes teores de AGR; (b) A em função de AGR, para os diferentes teores de AMR

A figura 58 mostra o comportamento da absorção com o aumento dos percentuais dos agregados reciclados, para a coleta 2. Para todos os percentuais e para ambas as frações de agregados, o aumento da quantidade de agregado reciclado tende a aumentar a absorção. O aumento no percentual de AMR provoca maior aumento na absorção para 100% de AGR. Da mesma forma, o aumento no percentual de AGR provoca maior influência nos concretos com 100% de AMR. Nesta coleta, a utilização de ambas frações de agregados conjuntamente não provocou redução da absorção ou de sua taxa de acréscimo, uma vez que os agregados desta coleta apresentam alto percentual de cerâmica e argamassa tanto nos agregados miúdos como nos graúdos.

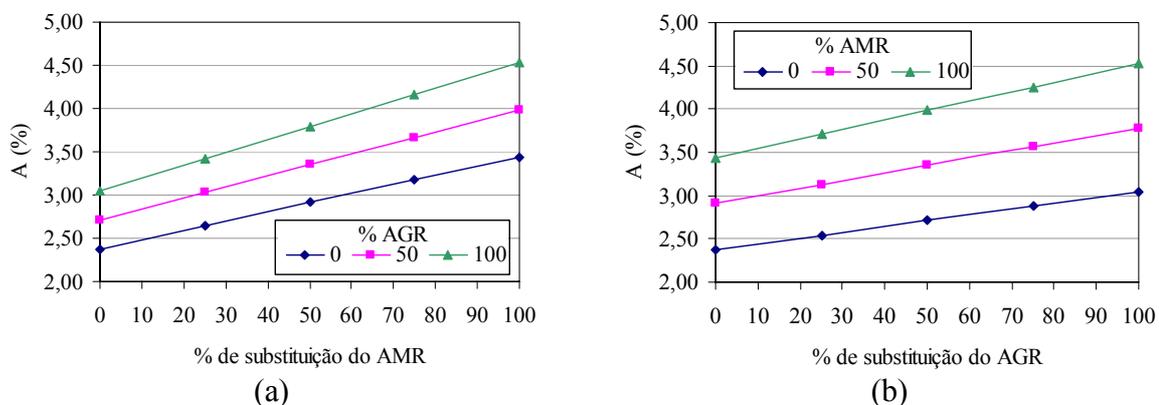


Figura 58: absorção de água em função da interação AMR x AGR, para a coleta 2: (a) A em função de AMR, para os diferentes teores de AGR; (b) A em função de AGR, para os diferentes teores de AMR

Na figura 59(a), referente à coleta 3, observa-se que para 75% de AMR, os valores de absorção, para qualquer percentual de substituição do AGR, são praticamente iguais. Neste mesmo gráfico percebe-se que a maior taxa de aumento da absorção ocorre para o concreto sem agregado graúdo reciclado, no qual o acréscimo é de 103% quando se aumenta o percentual de AMR de 0 para 100%. Para 50% de AGR, o acréscimo é de apenas 38%.

Para 100% de AGR, ocorre situação semelhante à verificada na coleta 1. Quando o percentual de AMR aumenta de 0 para 25%, ocorre um aumento de apenas 0,85% na absorção, e em seguida esta decresce com o aumento do percentual do agregado, reduzindo 6,7% quando se aumenta o percentual de AMR de 25 para 100%.

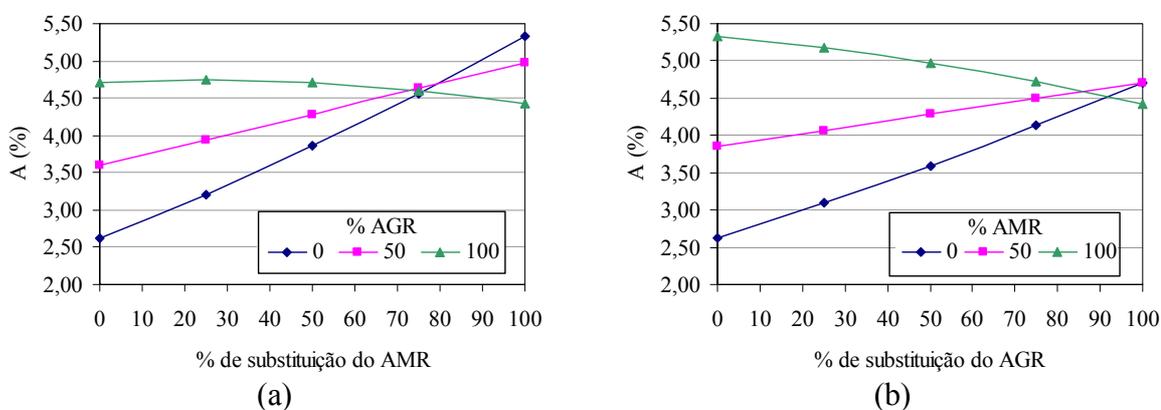


Figura 59: absorção de água em função da interação AMR x AGR, para a coleta 3: (a) A em função de AMR, para os diferentes teores de AGR; (b) A em função de AGR, para os diferentes teores de AMR

Na figura 59(b), verifica-se que o aumento no percentual de AGR é mais significativo sobre a absorção de água para os concretos sem agregado miúdo reciclado, cuja taxa de acréscimo encontrada foi de aproximadamente 80%. Observa-se que para 100% de AGR o valor da absorção para 0 e 50% de AMR é o mesmo. Para 100% de AMR, ocorre decréscimo de 16,7% na absorção quando o percentual de AGR aumenta de 0 para 100%.

A melhoria da absorção quando 100% de um dos agregados reciclados é utilizado pode ser explicado pela composição dos agregados desta coleta. Ambas as frações de agregados da coleta 2 apresentam alto percentual de concreto e rochas, em torno de 42%, ou seja, o fechamento dos poros é promovido por materiais menos porosos. No entanto, é importante lembrar que como o modelo correspondente à coleta 3 apresentou um coeficiente de determinação baixo, é possível que estes gráficos não representem corretamente o comportamento dos concretos desta coleta quanto à absorção de água.

6.5.6 Considerações gerais

Para uma análise geral do comportamento dos concretos produzidos com agregados reciclados, para todas as propriedades avaliadas foi elaborada a curva de comportamento em função da relação a/c, para alguns traços estudados. Como a absorção de água apresentou resultados distintos entre coletas, estão apresentados a seguir, nas figuras 60, 61 e 62, as curvas da absorção em função da relação a/c, para cada coleta.

Pode ser visualizado nas figuras que em todas as coletas os concretos com agregados reciclados apresentaram absorção de água superior à do concreto de referência. Apenas na coleta 3 todos os traços tiveram a mesma tendência de comportamento quanto à absorção de água.

Na coleta 1, apresentada na figura 60, o traço com 100% de ambas as frações de agregado reciclado apresentou redução da absorção de água com o aumento da relação a/c. O traço contendo apenas 100% de AGR apresentou redução na absorção para relações a/c acima de 0,6. Entretanto, estes dois traços apresentaram os maiores valores de absorção.

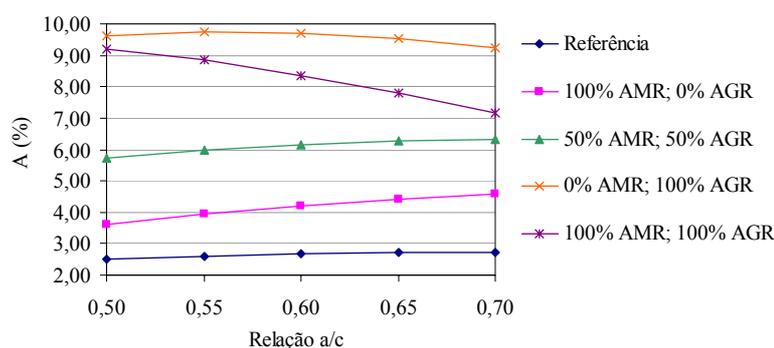


Figura 60: curvas da absorção de água por imersão em função da relação a/c, para a coleta 1

Para a coleta 2, mostrada na figura 61, a combinação com maior valor de absorção e maior percentual de acréscimo com o aumento da relação a/c foi a que continha apenas agregados reciclados. Este fato já era o esperado, uma vez que quanto maior a quantidade de agregados reciclados utilizados e maior a relação a/c, maior a absorção. Além disso, conforme já mencionado, os agregados da coleta 2 apresentaram alto percentual de cerâmica e argamassa na composição de ambas as frações dos agregados, ou seja, há grande quantidade de material poroso nesta mistura.

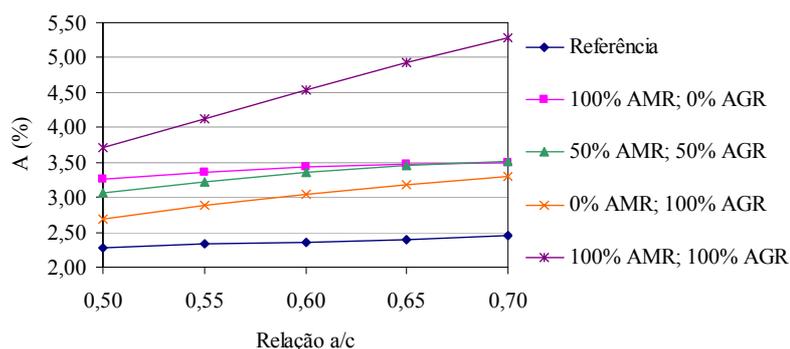


Figura 61: curvas da absorção de água por imersão em função da relação a/c, para a coleta 2

Na coleta 3, nenhuma combinação apresentou redução na absorção com o aumento da relação a/c, conforme se observa na figura 62. Para esta coleta, o traço com pior desempenho, ou seja, maior absorção, foi o traço com apenas 100% de agregado miúdo reciclado.

Nesta coleta, conforme já verificado no item anterior, o uso combinado de ambas frações dos agregados deve ter promovido um melhor fechamento dos poros, e dessa forma, o traço contendo 100% de ambos os agregados não apresentou o pior desempenho, como era esperado.

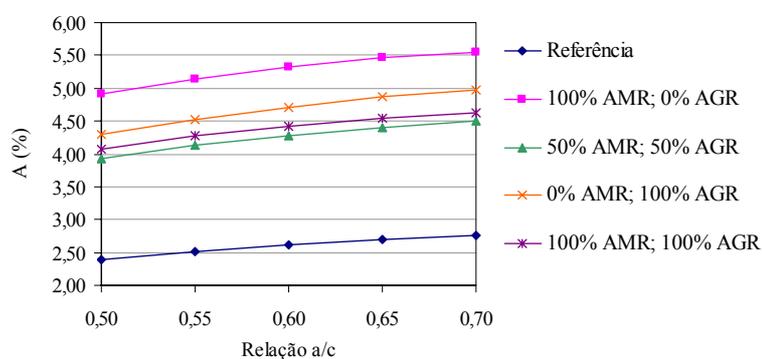


Figura 62: curvas da absorção de água por imersão em função da relação a/c, para a coleta 3

Visando estabelecer uma comparação com o concreto de referência, elaborou-se a tabela 33, que apresenta a relação entre a absorção de água dos concretos com agregados reciclados e seus respectivos concretos de referência, para cada coleta.

Tabela 33: relação entre a absorção de água dos concretos com agregados reciclados e os concretos de referência

a/c	Traço	Relação Areциclado/Areferência		
		Coleta 1	Coleta 2	Coleta 3
0,50	0% AMR; 50% AGR	1,80	1,08	1,37
	0% AMR; 100% AGR	4,03	1,13	1,79
	50% AMR; 0% AGR	0,93	1,20	1,48
	50% AMR; 50% AGR	2,40	1,28	1,64
	50% AMR; 100% AGR	4,20	1,35	1,80
	100% AMR; 0% AGR	1,52	1,36	2,05
	100% AMR; 50% AGR	3,06	1,47	1,92
	100% AMR; 100% AGR	3,85	1,55	1,70
0,60	0% AMR; 50% AGR	1,86	1,04	1,37
	0% AMR; 100% AGR	3,71	1,16	1,80
	50% AMR; 0% AGR	1,03	1,11	1,47
	50% AMR; 50% AGR	2,35	1,28	1,63
	50% AMR; 100% AGR	3,67	1,44	1,80
	100% AMR; 0% AGR	1,60	1,31	2,03
	100% AMR; 50% AGR	2,84	1,52	1,89
	100% AMR; 100% AGR	3,19	1,73	1,69
0,70	0% AMR; 50% AGR	1,90	0,99	1,37
	0% AMR; 100% AGR	3,33	1,19	1,80
	50% AMR; 0% AGR	1,12	1,03	1,46
	50% AMR; 50% AGR	2,28	1,27	1,62
	50% AMR; 100% AGR	3,13	1,54	1,79
	100% AMR; 0% AGR	1,65	1,26	2,00
	100% AMR; 50% AGR	2,62	1,57	1,87
	100% AMR; 100% AGR	2,59	1,91	1,67

A coleta 1 foi a que apresentou as relações mais altas com o concreto de referência, chegando a alcançar valores superiores a 4. No entanto, essa coleta também apresentou um traço com relação inferior a 1, ou seja, uma absorção menor que a do concreto de referência.

A coleta 2 foi a que apresentou as relações mais baixas, a maioria compreendida entre 1 e 2. A coleta 3 também apresentou relações baixas, sendo que apenas o traço com 100% de AMR e 0% de AGR apresentou relação superior a 2, para as três relações a/c estudadas.

Observando-se a tabela, não foi possível determinar o traço com melhor e pior desempenho. Estes desempenhos variaram de acordo com a coleta e, no caso do pior desempenho, de acordo com a relação a/c. Para as coletas 2 e 3, o concreto que mais se aproximou do concreto de

referência foi aquele com apenas 50% de agregado graúdo reciclado. Já para a coleta 1, foi o concreto com apenas 50% de agregado miúdo reciclado.

Através dos dados apresentados, verificou-se que a absorção de água dos concretos é influenciada tanto pela composição como pela densidade dos agregados. Como o modelo da coleta 3 não representou adequadamente seu comportamento, não foi possível perceber uma influência muito significativa da densidade, uma vez que esta coleta se diferenciava das outras quanto a essa característica do agregado. Entretanto, como a porosidade dos agregados é um dos fatores determinantes da porosidade dos concretos, e a densidade está diretamente ligada a ela, pode-se dizer que esta característica está relacionada com a absorção dos concretos.

No entanto, apenas a densidade dos agregados não é suficiente pra determinar qual concreto apresentará menor absorção, uma vez que esta propriedade também pode ser influenciada pela granulometria dos agregados.

6.6 DESEMPENHO DE ALGUNS TRAÇOS PARA CONCRETOS COM A MESMA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Visando realizar uma comparação do desempenho dos concretos para faixas de resistência, elaborou-se a tabela 34. Nela encontram-se os valores de resistência à tração por compressão diametral, módulo de deformação secante (80% f_c), absorção de água e consumo de cimento de concretos com resistência à compressão de 12, 15, 20, 25 e 30 MPa, para algumas combinações estudadas nesta pesquisa.

Quanto à resistência à tração, observa-se que para concretos com menor resistência à compressão (12 e 15 MPa), o traço com melhor desempenho foi o que continha 100% de AMR enquanto que o traço com 100% de AGR apresentou o resultado mais baixo. Para resistências à compressão mais altas, o concreto de referência passa a apresentar melhor desempenho, enquanto que o pior resultado é do traço com 100% de ambas as frações de agregados reciclados.

Em relação ao módulo de deformação, independente da resistência à compressão, o concreto de referência apresentou os melhores resultados. Dos concretos com agregados reciclados, o traço contendo 100% de AGR apresentou melhor desempenho, apresentando relação com o concreto de referência variando entre 87 e 93%, dependendo da resistência do concreto. A diferença com

o concreto de referência aumenta quanto maior a resistência do concreto. O traço contendo 100% de ambas frações de agregados reciclados obteve o pior desempenho.

Tabela 34: desempenho dos concretos com agregados reciclados em função da resistência à compressão

fc (MPa)	Traço	ft (MPa)	Esec (GPa)	A (%)	C _{cim} (kg/m ³)
12	Referência	0,98	8,0	2,29	156,69
	0% AMR; 100% AGR	0,89	7,4	7,63	156,13
	50% AMR; 50% AGR	1,02	7,3	6,20	181,80
	100% AMR; 0% AGR	1,14	6,9	4,72	202,65
	100% AMR; 100% AGR	1,07	6,3	6,77	223,00
15	Referência	1,37	9,9	2,13	209,52
	0% AMR; 100% AGR	1,30	9,0	8,97	223,27
	50% AMR; 50% AGR	1,38	8,9	6,33	237,80
	100% AMR; 0% AGR	1,46	8,4	4,60	251,06
	100% AMR; 100% AGR	1,39	7,5	8,21	282,63
20	Referência	1,92	12,9	1,82	282,16
	0% AMR; 100% AGR	1,84	11,6	9,75	315,67
	50% AMR; 50% AGR	1,87	11,4	6,15	312,66
	100% AMR; 0% AGR	1,90	10,8	4,22	314,58
	100% AMR; 100% AGR	1,76	9,4	9,35	356,78
25	Referência	2,36	15,8	1,54	338,96
	0% AMR; 100% AGR	2,22	14,0	9,38	383,38
	50% AMR; 50% AGR	2,24	13,8	5,76	369,24
	100% AMR; 0% AGR	2,24	13,0	3,78	362,99
	100% AMR; 100% AGR	2,02	11,1	9,41	409,66
30	Referência	2,72	18,7	1,30	385,18
	0% AMR; 100% AGR	2,49	16,2	8,53	434,46
	50% AMR; 50% AGR	2,52	16,1	5,29	413,45
	100% AMR; 0% AGR	2,52	15,2	3,36	401,71
	100% AMR; 100% AGR	2,20	12,7	8,94	446,48

O melhor desempenho quanto à absorção de água foi o do concreto de referência, entretanto o pior resultado foi, dependendo da resistência, do concreto com 100% de ambas as frações de agregados (25 e 30 MPa) ou do concreto contendo 100% de AGR (12, 15 e 20 MPa). Observa-se novamente que o agregado graúdo reciclado parece influenciar mais na absorção dos concretos que os agregados miúdos reciclados, conforme constatado neste trabalho.

Com relação ao consumo de cimento, para concretos de resistência à compressão 12 e 15 MPa, o traço com agregado reciclado com menor consumo foi o contendo apenas 100% de AGR. Para os concretos de 25 e 30 MPa, o menor consumo entre os concretos com agregados

reciclados foi verificado para o traço com apenas 100% de AMR. Já os concretos com 20 MPa apresentaram consumo de cimento semelhante, exceto o concreto com 100% de ambas frações de agregado, onde o consumo foi 26% superior ao concreto de referência.

Nota-se que o traço com agregado reciclado que apresentou o melhor desempenho variou de acordo com a propriedade considerada. Isso se deve ao fato que cada propriedade é influenciada por diferentes aspectos.

6.7 COMPARAÇÃO DOS MODELOS DE COMPORTAMENTO ELABORADOS COM OUTROS ENCONTRADOS NA BIBLIOGRAFIA

Visando encontrar um modelo que seja adequado para representar o comportamento de todo concreto com agregado reciclado, foi feita uma comparação entre outros modelos encontrados na bibliografia. Das propriedades avaliadas, apenas a absorção não será abordada neste item, uma vez que não foram encontrados modelos para ela.

6.7.1 Resistência à compressão axial

A figura 63 apresenta o comportamento de concretos com agregados reciclados quanto à resistência à compressão, em função da relação a/c, para três outras pesquisas realizadas nos últimos anos no país, comparando com este trabalho.

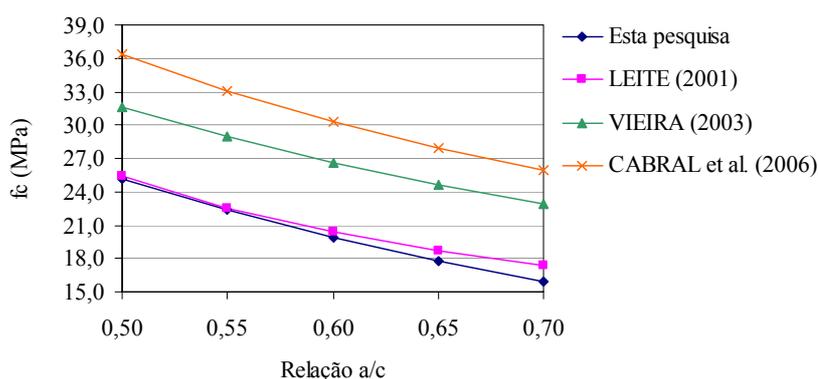


Figura 63: comparação da resistência à compressão em função da relação a/c com outras pesquisas

Os concretos de todas as pesquisas seguem uma tendência de comportamento semelhante à Lei de Abrams, conforme já foi mencionado neste trabalho. A redução da resistência com o

aumento da relação a/c, no entanto, foi diferente para cada pesquisa. Isso se deve aos distintos tipos de cimento utilizados em cada trabalho.

Quando se comparam os efeitos isolados dos teores de agregados reciclados, para uma relação a/c de 0,60, pode-se perceber nas figuras 64(a) e 64(b) que há uma grande diferença de comportamento entre os modelos. Quando se aumenta o percentual de agregado miúdo reciclado na mistura, Leite (2001) e Vieira (2003) verificaram aumento na resistência à compressão. Cabral et al. (2006) propôs um modelo separando os principais constituintes do agregado reciclado. Em concretos contendo apenas agregado miúdo reciclado de cerâmica também foi verificado aumento na resistência. Já quando da utilização combinada de cerâmica, concreto e argamassa ou somente de concreto, observa-se redução da resistência, da mesma forma que nesta pesquisa.

Verificam-se na bibliografia diferentes efeitos provocados pelo agregado miúdo reciclado na resistência à compressão, da mesma forma que se observou na figura. Através do trabalho de Cabral et al. (2006), constata-se que essa diferença se deve à composição dos agregados reciclados. No entanto, é importante também levar em consideração a forma e a granulometria do material, conforme já enfatizado neste trabalho.

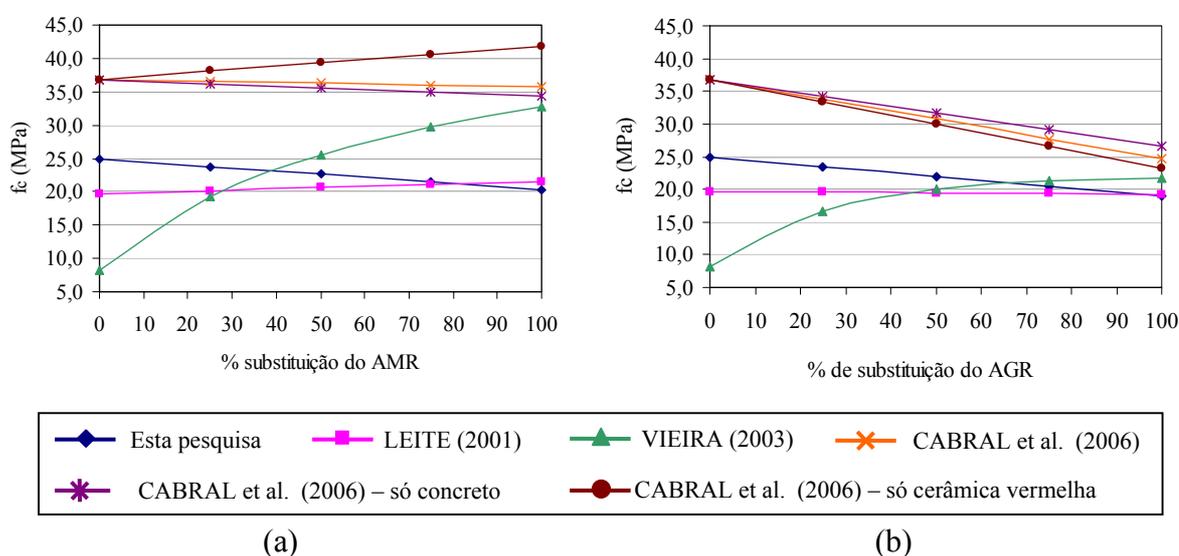


Figura 64: comparação da resistência à compressão em função do teor de substituição dos agregados com outras pesquisas

Aumentando-se o percentual de agregado graúdo reciclado (figura 64b), verificou-se diminuição da resistência à compressão neste trabalho e nas pesquisas de Leite (2001) e Cabral et al. (2006). Percebe-se que, independente do tipo de agregado utilizado, cerâmica ou concreto,

a resistência tende a reduzir, no entanto, essa redução é menor quando somente concreto é utilizado e maior quando emprega-se apenas cerâmica.

Constata-se que o comportamento da resistência à compressão mais próximo do encontrado neste trabalho corresponde ao verificado na pesquisa de Cabral et al. (2006). Mesmo assim, observam-se diferenças nos percentuais de redução da resistência. Portanto, mais pesquisas são necessárias, a fim de se formular um modelo que represente o comportamento de todos os concretos com agregados reciclados.

6.7.2 Resistência à tração por compressão diametral

Para a propriedade da resistência à tração por compressão diametral, apenas Leite (2001) elaborou um modelo de comportamento. A comparação do comportamento da resistência à tração em função da relação a/c está apresentada na figura 65.

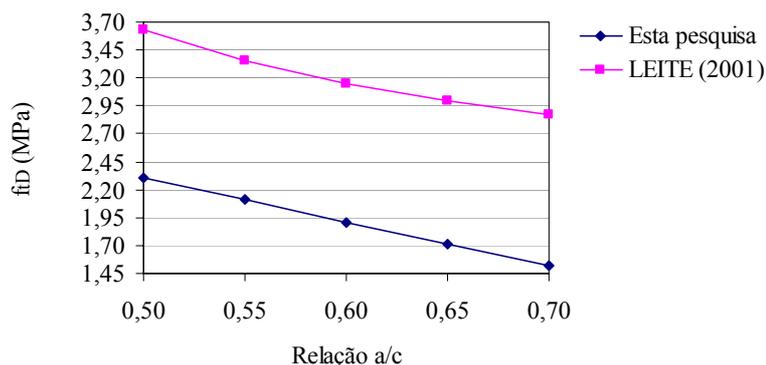


Figura 65: comparação da resistência à tração por compressão diametral em função da relação a/c com pesquisa de Leite (2001)

A tendência de redução da resistência à tração com o aumento da relação a/c foi verificada por ambas pesquisas. No entanto, em níveis de redução diferentes. Leite (2001) verificou uma redução de 21% quando a relação a/c era aumentada de 0,5 para 0,7, enquanto que nesta pesquisa a redução foi maior, na ordem de 34%.

O aumento no teor de substituição do agregado miúdo reciclado resultou em comportamentos diferentes entre as duas pesquisas, conforme se observa na figura 66(a). Assim como na resistência à compressão, Leite (2001) verificou efeito benéfico sobre a resistência à tração da inserção de agregado miúdo reciclado na mistura. A autora utilizou agregados miúdos com granulometria muito contínua, o que pode ter contribuído para o fechamento dos vazios. Talvez

esteja na granulometria uma das características chaves para o controle da variabilidade dos agregados reciclados.

Conforme se observa na figura 66(b), o aumento do teor de agregado graúdo reciclado no concreto provocou redução da resistência à tração nas duas pesquisas comparadas. Esta redução, no entanto, foi muito superior nesta pesquisa, em torno de 25%, enquanto que na pesquisa de Leite (2001), a redução foi de aproximadamente 7%.

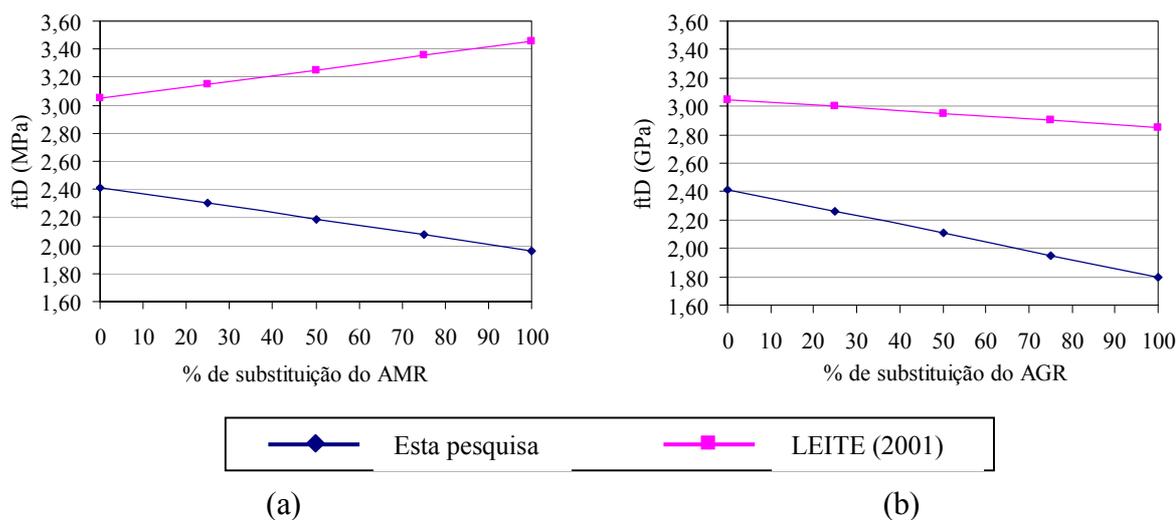


Figura 66: comparação da resistência à tração por compressão diametral em função do teor de substituição dos agregados com pesquisa de Leite (2001)

6.7.3 Módulo de deformação

Os comportamentos dos concretos com agregados reciclados quanto ao módulo de deformação secante observado em algumas pesquisas estão mostrados na figura 67. Nela observa-se que, para as três pesquisas, o módulo de deformação diminuiu com o aumento da relação a/c. A tendência de redução verificada através dos modelos de Leite (2001) e Cabral (2007) foi praticamente a mesma, em torno de 18 e 15%, respectivamente.

A figura 68 apresenta as tendências de comportamento do módulo de deformação com o aumento dos teores de substituição dos agregados reciclados, para as três pesquisas comparadas. O aumento do percentual de substituição do agregado miúdo reciclado (figura 68a) causou redução do módulo de deformação neste trabalho e na pesquisa de Cabral (2007). Entretanto as taxas de decréscimo foram diferentes entre as duas pesquisas. Já Leite (2001), assim como nas demais propriedades analisadas anteriormente, verificou aumento no módulo de deformação.

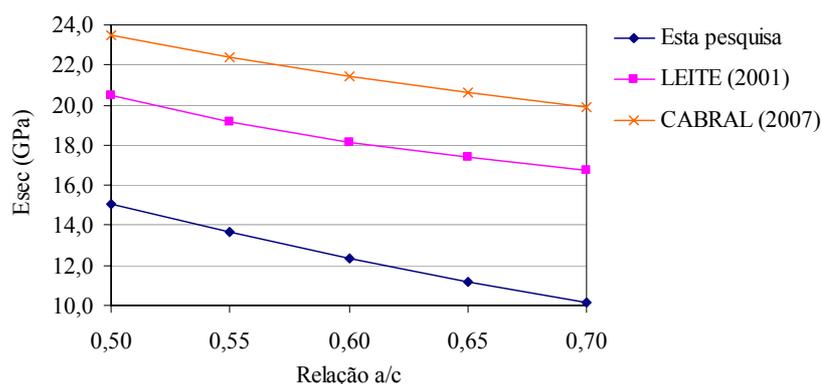


Figura 67: comparação do módulo de deformação em função da relação a/c com outras pesquisas

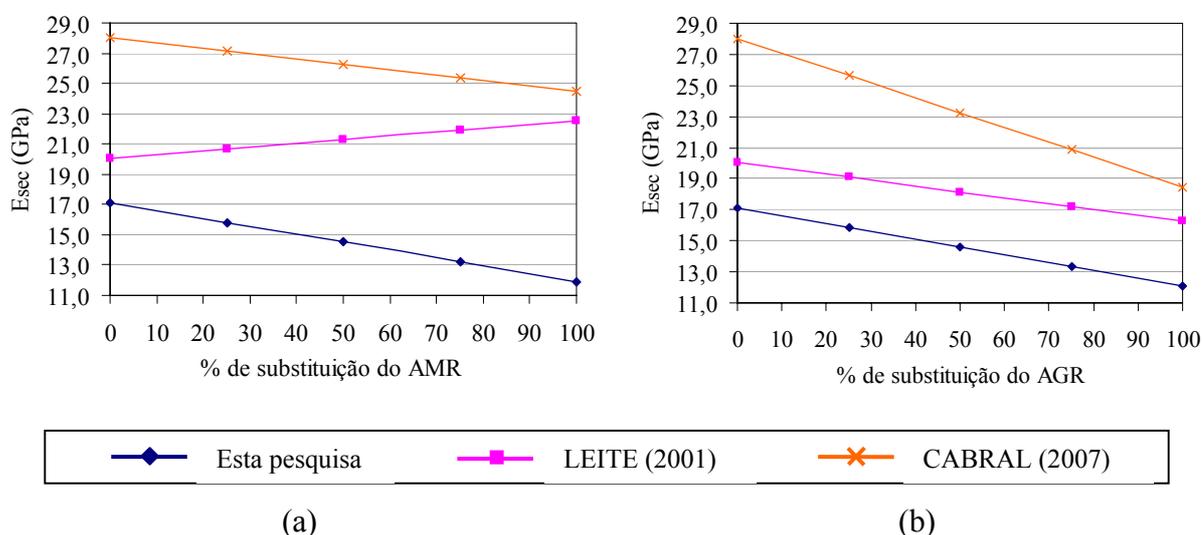


Figura 68: comparação do módulo de deformação em função do teor de substituição dos agregados com outras pesquisas

O módulo de deformação com o aumento do percentual de agregado graúdo reciclado apresentou redução para as três pesquisas. A tendência de comportamento verificada com o modelo de Cabral (2007) foi a que apresentou mais semelhança com o do presente trabalho. Conforme mencionado anteriormente, ainda são necessárias mais pesquisas, visando determinar um modelo para o comportamento dos concretos com agregados reciclados, que seja adequado para qualquer resíduo de construção e demolição utilizado.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o objetivo de determinar o parâmetro mais eficiente para prever o comportamento dos concretos produzidos com agregados reciclados, foram realizadas neste trabalho caracterizações de agregados reciclados obtidos através do beneficiamento de resíduos de construção e demolição coletados em três cidades. Com os agregados reciclados coletados em cada cidade, foram moldadas quinze combinações de concretos, cujos corpos-de-prova foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de deformação e absorção de água por imersão.

7.1 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos através do programa experimental realizado e analisados nos capítulos anteriores, foi possível obter as seguintes conclusões, válidas para os materiais e métodos de ensaio utilizados:

a) Quanto à composição dos RCD

- os principais constituintes dos resíduos de construção e demolição utilizados nesta pesquisa foram argamassa, cerâmica vermelha e concreto;
- a coleta 2 apresentou grande percentual de cerâmica e argamassa em sua composição, em torno de 80%;
- as coletas 1 e 3 apresentaram composição semelhante considerando os grupos de materiais mais porosos (cerâmica e argamassa) e menos porosos (concreto e rocha), em torno de 57% e 43%, respectivamente;

b) Quanto à composição dos agregados, após britagem dos RCD

- o AMR da coleta 1 é composto predominantemente por concreto e rochas, apresentando 64% deste materiais, enquanto que na fração graúda maior parte do material, 76%, constitui-se de cerâmica e argamassa;
- os agregados da coleta 2 são predominantemente constituídos de cerâmica e argamassa, em ambas as frações, sendo 77% na fração miúda e 83% na fração graúda;

- na coleta 3, as frações miúda e graúda apresentam a mesma composição, 58% de cerâmica e argamassa e 42% de concreto e rochas;

c) Quanto às características dos agregados

Separação por densidades

- a separação por densidades não se mostrou eficiente para os agregados miúdos reciclados. A absorção praticamente instantânea observada nesses materiais influenciou nos ensaios, uma vez que o material absorve o líquido denso, alterando sua real densidade;
- a separação por densidades dos agregados graúdos reciclados apresentou resultados coerentes com a composição inicial dos resíduos de construção e demolição, para cada coleta;
- as partículas de cerâmica vermelha e argamassa ficaram concentradas nas três faixas de densidades mais baixas, mostrando que os agregados são compostos por materiais de diferentes qualidades;
- as partículas de concreto e rocha concentraram-se majoritariamente na faixa de densidade $d > 2,4$;

Granulometria

- na análise granulométrica verificou-se que a quantidade de agregado miúdo reciclado passante na peneira de malha #0,15 mm foi de 4,8 a 15 vezes maior que do respectivo agregado natural;
- nenhum dos agregados miúdos utilizados, inclusive o natural, enquadrou-se na zona ótima estabelecida pela norma NBR 7211 (ABNT, 2005b). Apenas o agregado miúdo da coleta 2 está fora dos limites da zona utilizável;
- nenhum dos agregados graúdos reciclados se enquadrou nos limites estabelecidos pela norma NBR 7211 (ABNT, 2005b);

Massa específica e massa unitária

- a massa específica dos agregados reciclados foi inferior à dos agregados naturais. Para os agregados miúdos reciclados, a massa específica foi em média 7,5% menor

que a do agregado natural. Para os agregados graúdos reciclados, essa diferença foi maior, entre 9,5 e 15,8%, dependendo da coleta;

- a massa unitária dos agregados miúdos reciclados foi entre 8 e 19% menor que a dos agregados miúdos naturais e a dos agregados graúdos reciclados foi entre 23 e 30% menor que a dos agregados graúdos naturais;

Absorção de água dos agregados

- a Proposta de Norma desenvolvida por Leite (2001) para a determinação da absorção de água dos agregados reciclados não se mostrou eficiente para os agregados miúdos. Dessa forma, foi realizada uma adaptação da norma NBR NM 30 (ABNT, 2001c), conforme foi descrito no item 5.2.3;
- as taxas de absorção dos agregados reciclados variaram entre 4,3% e 11,7%. Para o agregado miúdo reciclado, o material da coleta 3 apresentou a maior taxa de absorção, enquanto que para o agregado graúdo reciclado, a maior taxa de absorção foi verificada para o material da coleta 1;
- as taxas de absorção inicial dos agregados reciclados foram muito altas, superando 80% da absorção total para todos os agregados utilizados. Isso evidencia a necessidade de pré-umedecimento dos agregados. No entanto, foram utilizados pra essa pré-molhagem, valores inferiores a essa absorção inicial, visando evitar excesso de água na mistura;

d) Quanto à relação água/cimento dos concretos

- os concretos contendo agregados com maior quantidade de cerâmica e argamassa demandaram mais água para alcançar a trabalhabilidade estipulada;
- quanto maior o teor de substituição do agregado graúdo reciclado, maior foi a relação a/c, ou seja, o agregado graúdo necessitou de mais água para alcançar a trabalhabilidade estabelecida em 100 ± 20 mm;
- a diferença na composição dos agregados graúdos e miúdos reciclados influenciou no comportamento relatado acima;

e) Quanto à resistência à compressão axial

- os concretos com agregados reciclados seguem a tendência de comportamento da Lei de Abrams, ou seja, quanto maior a relação a/c, menor é a resistência;

- o agregado graúdo reciclado exerce maior influência sobre a resistência à compressão que o agregado miúdo reciclado;
- para relações a/c mais baixas, a relação consumo/resistência foi menor para os traços contendo apenas AMR. No caso de relações a/c mais altas, os traços contendo apenas AGR apresentaram menor relação consumo/resistência;
- todos os traços com agregados reciclados apresentaram valores de resistências inferiores ao do concreto de referência. As combinações contendo apenas 50% de um dos agregados apresentaram os melhores desempenhos entre os concretos com agregados reciclados. A combinação contendo 100% de AMR também apresentou bom desempenho;
- a densidade dos agregados graúdos reciclados não é um parâmetro que permite controlar a resistência dos concretos, uma vez que esta propriedade depende de diversos fatores relacionados com as características dos agregados, como composição, forma e granulometria dos agregados;

f) Quanto à resistência à tração por compressão diametral

- a avaliação da resistência à tração por compressão diametral demonstrou uma tendência de redução da resistência com o aumento da relação a/c;
- o agregado graúdo reciclado exerceu maior influência negativa sobre a resistência à tração que o agregado miúdo reciclado;
- os traços que apresentaram melhor desempenho quanto à resistência à tração foram os mesmos que para a resistência à compressão, os que continham 50% de um dos agregados reciclados. Nenhum deles superou o concreto de referência;
- a separação por densidades e a composição dos RCD não podem ser utilizadas como parâmetros de controle da resistência à tração por compressão diametral dos concretos com agregados reciclados, uma vez que esta propriedade não foi influenciada pela variabilidade dos RCD;

g) Quanto ao módulo de deformação secante

- a redução provocada pelos agregados reciclados no módulo de deformação dos concretos foi praticamente igual para ambas as frações. O aumento da relação a/c

também provocou reduções praticamente da mesma ordem que as ocasionadas pelos agregados;

- os traços contendo 50% de AMR ou 50% de AGR foram os que mais se aproximaram do concreto de referência, apresentando reduções no módulo de deformação que variaram entre 11 e 18%, dependendo da relação a/c;
- a coleta 3, cujos agregados apresentaram maior massa específica e maior densidade, obteve o melhor desempenho quanto ao módulo de deformação;
- a separação dos agregados reciclados por densidades pode ser utilizada como parâmetro de controle do módulo de deformação de concretos com agregados reciclados, uma vez que esta propriedade depende principalmente de características dos agregados, como a densidade e a porosidade;
- não se verificou relação da composição dos RCD com o módulo de deformação dos concretos com estes materiais;

h) Quanto à absorção de água por imersão

- é possível que absorção de concretos com agregados reciclados seja influenciada principalmente pelo agregado graúdo;
- não foi possível determinar o traço com melhor desempenho quanto à absorção, uma vez que o este desempenho variou para cada coleta;
- a composição dos agregados reciclados refletiu na absorção dos concretos de cada coleta, as quais apresentaram comportamentos distintos, dependendo da variável e da interação considerada;
- a absorção dos concretos com agregados reciclados parece ser influenciada pela densidade, composição e granulometria dos agregados. Dessa forma, não é possível considerar a densidade como único condicionante da absorção;

i) Quanto à comparação entre concretos de mesma resistência

- não foi possível determinar qual traço, para cada nível de resistência à compressão, apresenta o melhor desempenho;

j) Quanto à comparação com outros modelos de comportamento

- ainda não foi possível determinar um modelo de comportamento que seja adequado a várias pesquisas. Os modelos de comportamento de Cabral et al. (2006) e Cabral (2007) foram os que apresentaram mais semelhança com os encontrados neste trabalho.

De forma geral, conclui-se que o comportamento do concreto com agregados reciclados não pode ser previsto através da composição ou da densidade dos agregados, uma vez que, dependendo da propriedade considerada, ambos ou até outros aspectos influenciam no comportamento. Das propriedades avaliadas, somente o módulo de deformação apresentou relação apenas com a densidade, as demais foram influenciadas por diversas características dos agregados.

Por fim, é importante salientar que outros estudos devem ser realizados a fim de verificar se a variabilidade de resultados dos concretos com agregados reciclados é realmente significativa. Conforme observado neste trabalho, entre as propriedades avaliadas, apenas a resistência à tração não foi influenciada pelas diferenças na composição dos agregados. Para as demais propriedades, as máximas variações globais médias, relacionadas às alterações nas composições e densidades das diferentes coletas, foram de 6% para a resistência à compressão, 8% para o módulo de deformação e 89% para a absorção de água por imersão. Dessa forma, devem-se confirmar os resultados apresentados nesta pesquisa, além de considerar outras propriedades que não foram abordadas nela.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante a realização deste trabalho, algumas dificuldades, limitações e dúvidas foram constatadas, e como numa única pesquisa não é possível vencer todas as possibilidades de estudo sobre o comportamento de determinado material, sugere-se:

- realizar estudo da influência da substituição dos agregados naturais pelos reciclados das quatro faixas de densidades avaliadas neste trabalho em algumas propriedades do concreto, elaborando um modelo que descreva o efeito, positivo ou negativo, de cada componente reciclado na propriedade. Sugere-se utilizar aditivo, mantendo as relações a/c fixas;

- verificar qual fração do agregado reciclado e qual componente influencia mais na absorção de água dos concretos com agregados reciclados;
- avaliar a durabilidade dos concretos com agregados reciclados, realizando, por exemplo, estudos da corrosão das armaduras afetadas por carbonatação e estudos de penetração acelerada de cloretos;
- avaliar a influência dos diferentes tipos de cimento nos concretos com agregados reciclados.

REFERÊNCIAS

AFFONSO, F. J. A. Caracterização de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (RCD) para uso em camadas drenantes de aterros de resíduos sólidos. 2005. 161p. Tese (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/teses/mestrado/inter/2005/teses/AFFONSO_FJA_05_t_M_int.pdf>. Acesso em: 26 out. 2005.

AGUIAR, G.; SELMO, S. M. S. An inicial analysis of the effect of gypsum plaster in recycled mortars from C&D waste. In: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE ON THE USE OF RECYCLED MATERIALS ON BUILDINGS AND STRUCTURES, 2004, Barcelona, Espanha. p. 493-502. Disponível em: <<http://www.infohab.org.br>>. Acesso em: 21 out. 2005.

AJDUKIEWICZ, A.; KLISZCZEWICZ, A. Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. **Cement & Concrete Composites**, v. 24, n. 2, p.269-279, apr. 2002.

ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. 2005. 167p. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo.

_____. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. 2000. 155p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo.

ANGULO, S. C.; KAHN, H.; JOHN, V. M.; ULSEN, C. Metodologia da caracterização de resíduos de construção e demolição. In.: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL – MATERIAIS RECICLADOS E SUAS APLICAÇÕES, 6., 2003, São Paulo. **Anais eletrônicos...** São Paulo: IBRACON, 2003.

ANGULO, S. C.; ULSEN, C.; KAHN, H.; JOHN, V. M. Desenvolvimento de novos mercados para a reciclagem massiva de RCD. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 5., 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2002. p. 1-12. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/NOVOS%20MERCADOS%20RCD%20II.pdf>>. Acesso em: 17 out. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736**: Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1991.

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

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

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2005b.

_____. **NBR 7215**: Cimento Portland – determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

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

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

_____. **NBR 9776**: Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005a.

_____. **NBR 10004**: Resíduos sólidos - classificação. Rio de Janeiro, 2004a.

_____. **NBR 15112**: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004b.

_____. **NBR 15113**: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004c.

_____. **NBR 15114**: Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004d.

_____. **NBR 15115**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004e.

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

_____. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001a.

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

_____. **NBR NM 30**: Agregado miúdo – determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001c.

_____. **NBR NM 45**: Agregados – determinação da massa unitária e dos espaços vazios. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003a.

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

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

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

ATERRO gaúcho. **Téchne**, São Paulo, n.110, p. 10, maio 2006.

BANTHIA, N.; CHAN, C. Use of recycled aggregate in plain and fiber-reinforced shotcrete. **Concrete International**, v. 22, n. 6, p. 41-45, june 2000.

BIANCHINI, G.; MARROCCHINO, R.; TASSINARI, R.; VACCARO, C. Recycling of construction and demolition waste materials: a chemical-mineralogical appraisal. **Waste Management**, v. 25, n. 2, p. 149-159, 2005.

BRITO, J.; PEREIRA, A. S.; CORREIA, J. R. Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates. **Cement & Concrete Composites**, v. 27, n. 4, p. 429-433, apr. 2005.

BUTTLER, A. M. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto: influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados.** 2003. 199p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas, São Carlos.

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

CABRAL, A. E. B.; DAL MOLIN, D. C. C.; RIBEIRO, J. L. D. Determinação da influência do tipo de agregado reciclado de construção e demolição na resistência à compressão de concretos. In: JORNADAS SULAMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 32., 2006, Campinas. **Anais eletrônicos...** Campinas, 2006. p. 1310-1319.

CABRAL, A. E. B.; DAL MOLIN, D. C. C.; SCHALCH, V. Caracterização de agregados reciclados de concreto, argamassa e de cerâmica vermelha da região metropolitana de Porto Alegre/RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47., 2005, Recife. **Anais eletrônicos...** Recife: IBRACON, 2005. p. V 347-362.

CARNEIRO, A. P.; CASSA, J. C.; QUADROS, B. E.; COSTA, D. B.; SAMPAIO, T. S.; ALBERTE, E. P. V. Caracterização do entulho de Salvador visando a produção de agregado reciclado. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8., 2000, Salvador. **Anais...** Salvador: ANTAC, 2000. Disponível em: <<http://www.infohab.org.br>>. Acesso em: 21 out. 2005.

CARNEIRO, F. P. **Diagnóstico e ações da atual situação dos resíduos de construção e demolição da cidade do Recife.** 2005. 131p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.

CARRIJO, P. M. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto.**

2005. 146p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução Nº 307**. 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html>>. Acesso em: 03 jan. 2006.

COSTA, A. C. F. **Os caminhos dos resíduos sólidos urbanos na cidade de Porto Alegre/RS:** da origem ao destino final. 1998. 143p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

DEBIEB, F.; KENAI, S. The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, 2007. Article in press. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 7 fev. 2007.

DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE LIMPEZA URBANA DE PORTO ALEGRE – DMLU. Responsável Engenheiro Evandro. Porto Alegre, abr. 2007. Comunicação verbal.

EGUCHI, K.; TERANISHI, K.; NAKAGOME, A.; KISHIMOTO, H.; SHINOZAKI, K.; NARIKAWA, M. Application of recycled coarse aggregate by mixture to concrete construction. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 7, p. 1542-1551, July 2007.

ENTULHO da construção pode ser reaproveitado. **Jornal do Comércio**, Porto Alegre, 10 ago. 2005. Disponível em: <<http://jc.plugin.com.br/noticias.aspx?pCodigoNoticia=8754&pCodigoArea=36>>. Acesso em: 3 dez. 2005.

EVANGELISTA, L.; BRITO, J. Carbonation and chloride penetration in concrete made with fine recycled concrete aggregates. In: IBERO-AMERICAN SYMPOSIUM ON CONCRETE FOR STRUCTURES, 2., 2006, Rio de Janeiro. **Anais eletrônicos...** Rio de Janeiro: IBRACON, 2006. p. 1-12.

EVANGELISTA, L.; BRITO, J. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled aggregates. **Cement & Concrete Composites**, v. 29, n. 5, p. 397-401, May 2007.

FEILDEN CLEGG BRADLEY ARCHITECTS LLP. The new environmental office. Disponível em: <http://www.feildenclegg.com/pdf/long/808_long.pdf>. Acesso em: 2 jan. 2007.

GOMES, C. Sequelas do Katrina adensam críticas ao Governo dos EUA. **Jornal de Notícias**, Portugal, 29 ago. 2006. Disponível em: <http://jn.sapo.pt/2006/08/29/mundo/sequelas_katrina_adensam_criticasao_.html>. Acesso em: 20 mar. 2007.

GÓMEZ-SOBERÓN, J. M. V. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: an experimental study. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 8, p. 1301-1311, Aug. 2002.

GONÇALVES, R. D. C. **Agregados reciclados de resíduos de concreto:** um novo material para dosagens estruturais. 2001. 148p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos.

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**. 349p. São Paulo: Pini; Brasília: SENAI, 1992.

JADOVSKI, I. **Diretrizes técnicas e econômicas para usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição**. 2005. 178p. Trabalho de conclusão (Mestrado Profissionalizante em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

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, 1996.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. Reciclagem de resíduos da construção. In: RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES, 2000. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/CETESB.pdf>>. Acesso em: 17 out. 2005.

KATZ, A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 5, p. 703-711, may 2003.

KHALAF, F. M.; DEVENNY, A. S. Recycling of demolished masonry rubble as coarse aggregate in concrete: review. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 16, n. 4, p. 331-340, july/aug. 2004.

KHATIB, J. M. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 4, p. 763-769, apr. 2005.

LANZELLOTTI, R. F. A. **Desenvolvimento de fluxograma para beneficiamento de resíduos da construção civil**. 2005. 114p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica. Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/teses/0312483_05_cap_05.pdf>. Acesso em: 8 nov. 2006.

LARRAÑAGA, M. E. **Experimental study on microstructure and structural behavior of recycled aggregate concrete**. 2004. 230p. Tese (Doutorado). Departament d' Enginyeria de la Construcció. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

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**. 1998. 116p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos.

LAURITZEN, E. K. Recycling concrete – an overview of development and challenges. CONFERENCE ON THE USE OF RECYCLED MATERIALS IN BUILDINGS AND STRUCTURES. Espanha, 2004. Disponível em: <<http://congress.cimne.upc.es/rilem04/frontal/Papers.htm>>. Acesso em: 24 jun. 2006.

LEE, S. T.; MOON, H. Y.; SWAMY, R. N.; KIM, S. S.; KIM, J. P. Sulfate attack of mortars containing recycled fine aggregates. **ACI Materials Journal**, v. 102, n. 4, p. 224-230, july/aug. 2005.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 290p. Tese (Doutorado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. 2001. 194p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo. Disponível em: <<http://www.recycle.pcc.usp.br/ftp/tese%20SALOMON.pdf>>. Acesso em: 17 out. 2005.

LEVY, S. M.; HELENE, P. Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 11, p. 1975-1980, nov. 2004.

LEVY, S. M.; HELENE, P. R. L. **Evolução histórica da utilização do concreto como material de construção**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo: EPUSP, 2002. 12p.

LIMA, J. A. R. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos**. 1999. 240p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos.

LOPEZ, D. A. R.; AZEVEDO, C. A. P.; BARBOSA NETO, E. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com vidro cominuído como agregado fino. **Cerâmica**, v. 51, n. 320, p. 318-324, out./dez. 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132005000400003&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 24 jun. 2006.

LUZ, J. A. M.; LIMA, R. M. F. Análise granulométrica por técnicas que se baseiam na sedimentação gravitacional: regime turbulento e intermediário. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 54, n. 3, jul./set. 2001. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672001000300009>. Acesso em: 22 jun. 2006.

MANSUR, M. A.; WEE, T. H.; CHERAN, L. S. Crushed bricks as coarse aggregate for concrete. **ACI Materials Journal**, v. 96, n. 4, p. 478-484, july/aug. 1999.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994. 573p.

MIRANDA, L. F. R. **Estudo de fatores que influem na fissuração de revestimentos de argamassa com entulho reciclado**. 2000. 172p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo.

- NAWA, T. Recycling of concrete. HOKKAIDO UNIVERSITY WORKSHOP. 2004. Disponível em: <http://www.eng.hokudai.ac.jp/COE-area/workshop/pdf/05feb4_nawa.pdf>. Acesso em: 21 mar. 2007.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. Tradução Salvador E. Giammusso. 2 ed. São Paulo: PINI, 1997. 828 p.
- OIKONOMOU, N. D. Recycled concrete aggregates. **Cement & Concrete Composites**, v. 27, n. 2, p. 315-318, feb. 2005.
- OLIVEIRA, M. J. E.; ASSIS, C. S. Estudo da deterioração de concreto proveniente da demolição de obras de construção civil e seu comportamento em relação ao meio ambiente. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41., 1999, Salvador. **Anais eletrônicos...** IBRACON, 1999.
- OLIVEIRA, M. J. E.; ASSIS, C. S.; MATTOS, J. T. Recycled aggregate standardization in Brazil. CONFERENCE ON THE USE OF RECYCLED MATERIALS IN BUILDINGS AND STRUCTURES. Espanha, 2004a. Disponível em: <<http://congress.cimne.upc.es/rilem04/frontal/Papers.htm>>. Acesso em: 24 jun. 2006.
- OLIVEIRA, M. J. E.; ASSIS, C. S.; TERNI, A.V. Study on compressed stress, water absorption and modulus of elasticity of produced concrete made by recycled aggregate. CONFERENCE ON THE USE OF RECYCLED MATERIALS IN BUILDINGS AND STRUCTURES. Espanha, 2004b. Disponível em: <<http://congress.cimne.upc.es/rilem04/frontal/Papers.htm>>. Acesso em: 24 jun. 2006.
- OLIVEIRA, M. J. E.; MATTOS, J. T.; ASSIS, C. S. Resíduos de concreto: classe III versus classe II. In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 4., 2001, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON, CT 206. p. 87-95.
- OLIVEIRA, M. B.; VAZQUEZ, E. The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete. **Waste Management**, v. 16, n. 1-3, p. 113-117, 1996.
- PENTALLA, V. Concrete and sustainable development. **ACI Materials Journal**, v. 94, n. 5, p.409-416, sep./oct. 1997.
- PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de Construção**. 8 ed. Rio de Janeiro: Globo, 1987. 435 p.
- 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.
- PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. 189p. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo.

- POON, C. S.; SHUI, Z. H.; LAM, L.; FOK, H.; KOU, S. C. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 1, p. 31-36, jan. 2004.
- RAHAL, K. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. **Building and Environment**, v. 42, n. 1, p. 407-415, jan. 2007.
- RAO, A.; JHA, K. N.; MISRA, S. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 50, n. 1, p. 71-81, mar. 2007.
- RASHWAN, M. S.; ABOURIZK, S. The properties of recycled concrete. **Concrete International**, v. 19, n. 7, p. 56-60, july 1997.
- RAVINDRARAJAH, R. S.; LOO, 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, dec. 1987.
- RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. S. **Projeto de Experimentos**. Série Monográfica Qualidade. 130 p. Porto Alegre: FEENG/UFRGS, 2001.
- SAGOE-CRENTSIL, K. K.; BROWN, T.; TAYLOR, A. H. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 5, p. 707-712, may 2001.
- SAMPAIO, C. H.; TAVARES, L. M. M. **Beneficiamento gravimétrico: uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.
- SANI, D.; MORICONI, G.; FAVA, G.; CORINALDESI, V. Leaching and mechanical behaviour of concrete manufactured with recycled aggregates. **Waste Management**, v. 25, n. 2, p. 177-182, 2005.
- SANTOS, M. L. A. Comitativa da prefeitura de Cuiabá visita central de reciclagem. 2 mar. 2007. Disponível em: <<http://www.riopreto.sp.gov.br/cpub/body.php?newcod=19212>>. Acesso em: 2 mar. 2007.
- SENTHAMARAI, R. M.; MANOHARAN, P. D. Concrete with ceramic waste aggregate. **Cement & Concrete Composites**, v. 27, n. 9-10, p. 910-913, oct./nov. 2005.
- 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).
- SHAYAN, A.; XU, A. Performance and properties of structural concrete made with recycled concrete aggregate. **ACI Materials Journal**, v. 100, n. 5, p. 371-380, sep/oct. 2003.
- SIMPSON, D. Recycled aggregates in concrete: a realist's perspective. **Concrete**, v. 33, n. 6, p. 17, june 1999.
- SOUSA, J. G. G. **Contribuição ao estudo da relação entre propriedades e proporcionamento de blocos de concreto: aplicação ao uso de entulho como agregado**

reciclado. 2001. 124p. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília.

TAM, V. W. Y.; GAO, X. F.; TAM, C. M.; CHAN, C. H. New approach in measuring water absorption of recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, 2006. Article in press. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 25 out. 2006.

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, mar./apr. 1996.

TELLES, A. C. S. S. **Operações unitárias I: sistemas particulados – notas de aula**. Disponível em: <<http://www.eq.ufrj.br/docentes/telles/operacoes%unitarias%20la.pdf>>. Acesso em: 24 jun. 2006.

TERRO, M. J. Properties of concrete made with recycled crushed glass at elevated temperatures. **Building and Environment**, v. 41, n. 5, p. 633-639, may 2006.

TOPÇU, I. B.; GÜNÇAN, N. F. Using waste concrete as aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 7, p. 1385-1390, oct. 1995.

TOPÇU, I. B.; ŞENGEL, S. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 8, p. 1307-1312, aug. 2004.

VIEIRA, G. L. **Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2003. 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

XIAO, J.; LI, J.; ZHANG, C. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 6, p. 1187-1194, june 2005.

ZAHARIEVA, R.; BUYLE-BODIN, F.; SKOCZYLAS, F.; WIRQUIN, E. Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. 25, n. 2, p. 223-232, feb. 2003.

ZORDAN, S. E. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto**. 1997. 156p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

_____. Entulho da indústria da construção civil. [2000?]. Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/entulho_ind_ccivil.htm>. Acesso em: 17 out. 2005.

APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

Tabela 35: dados obtidos durante a moldagem dos concretos referentes à coleta 1

Traço nº	a/c	m	%AMR	%AGR	Abatimento (mm)	γ CF (kg/dm ³)	Cons. Cim. (kg/m ³)
1	0,50	4,38	0	0	100	2,432	413,58
2	0,57	4,38	100	0	90	2,286	384,19
3	0,55	4,38	0	100	90	2,150	362,50
4	0,60	4,38	100	100	80	2,074	346,84
5	0,70	6,88	0	0	100	2,402	279,89
6	0,76	6,88	100	0	90	2,250	256,84
7	0,79	6,88	0	100	80	2,159	248,96
8	0,93	6,88	100	100	80	2,216	251,48
9	0,55	4,38	50	50	90	2,225	375,24
10	0,76	6,88	50	50	80	2,212	256,00
11	0,67	5,63	0	50	80	2,260	309,59
12	0,65	5,63	50	100	85	2,089	286,94
13	0,71	5,63	100	50	80	2,189	298,11
14	0,63	5,63	50	0	85	2,329	328,69
15	0,65	5,63	50	50	85	2,220	305,05

onde: γ CF é a massa específica do concreto no estado fresco

Tabela 36: dados obtidos durante a moldagem dos concretos referentes à coleta 2

Traço nº	a/c	m	%AMR	%AGR	Abatimento (mm)	γ CF (kg/dm ³)	Cons. Cim.(kg/m ³)
1	0,50	4,38	0	0	100	2,432	413,58
2	0,60	4,38	100	0	100	2,276	380,65
3	0,61	4,38	0	100	100	2,134	356,27
4	0,70	4,38	100	100	110	2,051	337,35
5	0,70	6,88	0	0	100	2,402	279,89
6	0,85	6,88	100	0	120	2,264	259,30
7	0,93	6,88	0	100	95	2,136	242,40
8	1,01	6,88	100	100	80	1,985	223,31
9	0,61	4,38	50	50	80	2,204	367,90
10	0,84	6,88	50	50	120	2,219	254,42
11	0,68	5,63	0	50	105	2,259	308,96
12	0,78	5,63	50	100	95	2,087	281,60
13	0,80	5,63	100	50	90	2,144	288,62
14	0,66	5,63	50	0	105	2,316	317,63
15	0,74	5,63	50	50	105	2,193	297,60

onde: γ CF é a massa específica do concreto no estado fresco

Tabela 37: dados obtidos durante a moldagem dos concretos referentes à coleta 3

Traço nº	a/c	m	%AMR	%AGR	Abatimento (mm)	γ CF (kg/dm ³)	Cons. Cim. (kg/m ³)
1	0,50	4,38	0	0	100	2,432	413,58
2	0,56	4,38	100	0	110	2,263	380,97
3	0,65	4,38	0	100	100	2,198	364,47
4	0,63	4,38	100	100	90	2,084	346,83
5	0,70	6,88	0	0	100	2,402	279,89
6	0,76	6,88	100	0	100	2,227	257,80
7	0,86	6,88	0	100	90	2,193	250,95
8	0,85	6,88	100	100	90	2,098	240,30
9	0,57	4,38	50	50	100	2,216	372,36
10	0,83	6,88	50	50	90	2,215	254,28
11	0,69	5,63	0	50	100	2,259	308,54
12	0,72	5,63	50	100	85	2,130	289,85
13	0,68	5,63	100	50	100	2,173	297,31
14	0,61	5,63	50	0	90	2,344	323,82
15	0,68	5,63	50	50	100	2,232	305,31

onde: γ CF é a massa específica do concreto no estado fresco

Tabela 38: resultados dos ensaios obtidos no programa experimental, para os concretos com agregados reciclados da coleta 1

Traço nº	m	%AMR	%AGR	Resistência à compressão						Resistência à tração				Modulo de deformação						Absorção de água por imersão				
				f _c (MPa)				s	CV	f _{td} (MPa)		s	CV	E _{sec} (GPa)			s	CV	s ₂	CV ₂	A (%)	s	CV	
1	4,38	0	0	33,1	32,7	31,8	31,8	0,66	2,03	3,05	2,86	0,13	4,55	21,3	22,0*	21,0	0,5	2,4	0,2	1,0	2,50	2,52	0,01	0,56
2	4,38	100	0	25,5	22,1	22,8	23,8	1,48	6,26	2,35	2,63	0,20	7,95	13,9	14,5	16,4*	1,3	8,7	0,4	3,0	3,95	3,31	0,45	12,47
3	4,38	0	100	19,7	19,8	20,1	20,4	0,32	1,58	1,94	2,05	0,08	3,90	6,3*	10,3	10,5	2,4	26,2	0,1	1,4	11,22	10,65	0,40	3,69
4	4,38	100	100	17,7	18,3	19,0	17,6	0,65	3,56	1,98	2,10	0,08	4,16	7,8*	6,6	6,7	0,7	9,5	0,1	1,1	11,43	11,15	0,20	1,75
5	6,88	0	0	20,2	21,0	19,1	19,2	0,90	4,53	2,22	1,60	0,44	22,95	13,2	13,1	14,8*	1,0	7,0	0,1	0,5	2,52	2,55	0,02	0,84
6	6,88	100	0	13,4	14,6	14,1	13,9	0,50	3,55	1,54	1,68	0,10	6,15	8,5*	8,2	7,9	0,3	3,7	0,2	2,6	5,13	5,13	0,00	0,00
7	6,88	0	100	12,5	13,4	12,8	14,0	0,67	5,05	1,04	1,34	0,21	17,83	7,9	6,5	5,1*	1,4	21,5	1,0	13,7	11,05	10,97	0,06	0,51
8	6,88	100	100	9,3	10,7	9,5	11,3	0,96	9,40	0,81	1,18	0,26	26,29	5,3	5,4	3,9*	0,8	17,2	0,1	1,3	10,79	8,38	1,70	17,78
9	4,38	50	50	22,8	24,3	22,6	24,9	1,13	4,77	1,82	2,08	0,18	9,43	12,6	16,3	8,3*	4,0	32,3	2,6	18,1	4,88	4,66	0,16	3,26
10	6,88	50	50	16,3	14,3	15,5	15,6	0,83	5,38	1,34	1,59	0,18	12,07	9,6	7,8*	8,8	0,9	10,3	0,6	6,1	5,16	4,72	0,31	6,30
11	5,63	0	50	17,5	17,3	16,2	17,6	0,65	3,76	1,64	1,69	0,04	2,12	15,4	13,8	9,4*	3,1	24,1	1,1	7,7	4,63	5,20	0,40	8,20
12	5,63	50	100	15,6	15,6	14,7	15,7	0,47	3,05	1,08	1,16	0,06	5,05	8,1*	9,0	9,7	0,8	9,0	0,5	5,3	10,95	10,42	0,37	3,51
13	5,63	100	50	16,3	17,1	17,2	18,4	0,87	5,02	1,96	1,36	0,42	25,56	7,3*	6,0	6,5	0,7	9,9	0,4	5,7	10,51	10,64	0,09	0,87
14	5,63	50	0	20,2	23,1	21,2	22,3	1,27	5,84	2,11	2,27	0,11	5,17	13,9*	13,1	12,6	0,7	5,0	0,4	2,8	3,85	3,97	0,08	2,17
15	5,63	50	50	15,9	17,8	18,7	16,8	1,21	7,02	1,78	1,78	0,00	0,00	9,4	8,9	10,0*	0,6	5,8	0,4	3,9	5,08	4,99	0,06	1,26

onde: s = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; * valor desconsiderado para cálculo da nova média; s₂ = novo desvio padrão, para apenas dois valores; CV₂ = novo coeficiente de variação, para apenas dois valores

Tabela 39: resultados dos ensaios obtidos no programa experimental, para os concretos com agregados reciclados da coleta 2

Traço n°	m	%AMR	%AGR	Resistência à compressão						Resistência à tração				Modulo de deformação						Absorção de água por imersão				
				f _c (MPa)				s	CV	f _{td} (MPa)		s	CV	E _{sec} (GPa)			s	CV	s ₂	CV ₂	A (%)	s	CV	
1	4,38	0	0	33,1	32,7	31,8	31,8	0,66	2,03	3,05	2,86	0,13	4,55	21,3	22,0*	21,0	0,5	2,4	0,2	1,0	2,50	2,52	0,01	0,56
2	4,38	100	0	23,2	25,8	24,3	23,7	1,13	4,65	2,57	2,33	0,17	6,93	14,1	13,3	12,1*	1,0	7,6	0,6	4,1	3,74	4,07	0,23	5,98
3	4,38	0	100	22,2	21,4	20,4	17,4	2,10	10,32	2,24	2,52	0,20	8,32	30,3*	12,1	14,4	9,9	52,3	1,6	12,3	3,21	3,23	0,01	0,44
4	4,38	100	100	15,3	16,2	14,7	14,3	0,83	5,46	1,76	1,16	0,42	29,06	8,8	9,7*	8,9	0,5	5,4	0,1	0,8	4,96	4,58	0,27	5,63
5	6,88	0	0	20,2	21,0	19,1	19,2	0,90	4,53	2,22	1,60	0,44	22,95	13,2	13,1	14,8*	1,0	7,0	0,1	0,5	2,52	2,55	0,02	0,84
6	6,88	100	0	12,5	12,4	11,5	11,8	0,48	3,98	1,48	1,13	0,25	18,96	9,7*	9,0	8,4	0,7	7,2	0,4	4,9	4,12	3,75	0,26	6,65
7	6,88	0	100	14,0	13,9	13,9	13,9	0,05	0,36	1,76	1,71	0,04	2,04	8,8	9,7	5,3*	2,3	29,3	0,6	6,9	4,01	3,99	0,01	0,35
8	6,88	100	100	13,1	13,2	12,7	13,1	0,22	1,70	1,25	1,71	0,33	21,98	7,4*	6,4	6,7	0,5	7,5	0,2	3,2	7,20	7,60	0,28	3,82
9	4,38	50	50	22,6	23,1	25,2	26,0	1,63	6,74	2,36	2,50	0,10	4,07	10,9	15,3*	12,5	2,2	17,3	1,1	9,7	3,48	4,23	0,53	13,76
10	6,88	50	50	14,0	13,5	13,8	13,2	0,35	2,57	1,23	1,25	0,01	1,14	9,4	10,0*	9,2	0,4	4,4	0,1	1,5	4,96	5,00	0,03	0,57
11	5,63	0	50	20,7	20,8	22,1	18,0	1,72	8,44	2,12	1,43	0,49	27,49	14,0	14,8*	13,3	0,8	5,3	0,5	3,6	2,36	2,70	0,24	9,50
12	5,63	50	100	16,4	15,7	15,5	16,2	0,42	2,64	1,57	2,17	0,42	22,69	8,0	9,5*	7,9	0,9	10,6	0,1	0,9	5,66	6,02	0,25	4,36
13	5,63	100	50	17,4	-	16,2	16,4	0,52	3,15	1,80	1,66	0,10	5,72	8,0	9,8*	8,3	1,0	11,1	0,2	2,6	5,86	5,47	0,28	4,87
14	5,63	50	0	19,4	19,5	20,6	21,6	1,04	5,12	1,94	2,15	0,15	7,26	9,4*	13,3	12,0	2,0	17,2	0,9	7,3	3,29	2,93	0,25	8,19
15	5,63	50	50	15,3	16,2	14,5	14,8	0,74	4,89	1,82	1,69	0,09	5,24	7,7*	10,4	9,4	1,4	14,9	0,7	7,1	3,55	3,91	0,25	6,82

onde: s = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; * valor desconsiderado para cálculo da nova média; s₂ = novo desvio padrão, para apenas dois valores; CV₂ = novo coeficiente de variação, para apenas dois valores

Tabela 40: resultados dos ensaios obtidos no programa experimental, para os concretos com agregados reciclados da coleta 3

Traço n°	m	%AMR	%AGR	Resistência à compressão						Resistência à tração				Modulo de deformação						Absorção de água por imersão				
				f _c (MPa)				s	CV	f _{td} (MPa)		s	CV	E _{sec} (GPa)			s	CV	s ₂	CV ₂	A (%)	s	CV	
1	4,38	0	0	33,1	32,7	31,8	31,8	0,66	2,03	3,05	2,86	0,13	4,55	21,3	22,0*	21,0	0,5	2,4	0,2	1,0	2,50	2,52	0,01	0,56
2	4,38	100	0	20,2	19,5	20,7	19,7	0,54	2,69	1,87	2,40	0,37	17,55	12,8	13,4	9,9*	1,9	15,6	0,4	3,2	5,82	5,46	0,25	4,51
3	4,38	0	100	18,0	15,5	15,6	18,8	1,68	9,89	2,13	2,10	0,02	1,00	13,7*	11,7	11,4	1,3	10,2	0,2	1,8	4,33	5,45	0,79	16,20
4	4,38	100	100	16,7	17,8	15,6	18,2	1,17	6,85	1,90	1,59	0,22	12,56	11,5*	12,0	12,7	0,6	5,0	0,5	4,0	4,46	4,80	0,24	5,19
5	6,88	0	0	20,2	21,0	19,1	19,2	0,90	4,53	2,22	1,60	0,44	22,95	13,2	13,1	14,8*	1,0	7,0	0,1	0,5	2,52	2,55	0,02	0,84
6	6,88	100	0	12,4	12,5	12,2	11,9	0,26	2,16	1,71	1,46	0,18	11,15	7,3*	9,8	10,7	1,8	19,0	0,4	4,4	5,55	6,14	0,42	7,14
7	6,88	0	100	12,6	13,2	12,0	12,3	0,51	4,09	1,66	1,36	0,21	14,05	9,2	6,5*	11,2	2,4	26,3	1,4	13,9	5,00	5,40	0,28	5,44
8	6,88	100	100	11,0	10,7	11,5	12,1	0,61	5,41	1,11	1,27	0,11	9,51	5,4*	5,9	6,6	0,6	10,1	0,5	7,9	5,58	4,41	0,83	16,56
9	4,38	50	50	20,7	19,5	20,6	18,4	1,08	5,46	2,27	1,98	0,21	9,65	12,8	12,4	14,2*	0,9	7,2	0,3	2,2	5,31	5,10	0,15	2,85
10	6,88	50	50	11,7	12,7	12,6	12,6	0,47	3,78	1,50	1,71	0,15	9,25	4,4*	7,9	6,8	1,8	28,1	0,8	10,6	7,19	6,79	0,28	4,05
11	5,63	0	50	17,8	17,5	16,2	16,9	0,71	4,14	1,82	2,10	0,20	10,10	9,8*	13,2	12,8	1,9	15,6	0,3	2,2	3,77	4,11	0,24	6,10
12	5,63	50	100	16,2	16,7	14,4	15,4	1,00	6,41	1,57	1,68	0,08	4,79	9,4*	13,0	11,6	1,8	16,0	1,0	8,0	7,03	7,24	0,15	2,08
13	5,63	100	50	13,4	13,1	13,7	13,6	0,26	1,97	1,57	1,41	0,11	7,59	8,6	8,5	9,3*	0,4	5,0	0,1	0,8	4,27	4,24	0,02	0,50
14	5,63	50	0	24,4	24,6	26,0	25,4	0,74	2,95	2,29	2,63	0,24	9,77	12,9	20,2*	15,2	3,7	23,2	1,6	11,6	2,27	2,59	0,23	9,31
15	5,63	50	50	15,5	16,8	15,5	16,2	0,63	3,92	2,08	1,87	0,15	7,52	10,7	10,3	8,7*	1,1	10,7	0,3	2,7	7,14	6,81	0,23	3,35

onde: s = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; * valor desconsiderado para cálculo da nova média; s₂ = novo desvio padrão, para apenas dois valores; CV₂ = novo coeficiente de variação, para apenas dois valores

APÊNDICE B – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS

Tabela 41: análise de variância dos resultados da relação a/c

Fatores	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
coleta	0,0307	2	0,0154	25,6305	0,000007	S
m	0,3870	1	0,3870	645,6775	0,000000	S
AGR	0,0668	1	0,0668	111,3697	0,000000	S
AMR	0,0285	1	0,0285	47,5809	0,000003	S
coleta x m	0,0034	4	0,0008	1,3997	0,276231	NS
coleta x AGR	0,0104	4	0,0026	4,3329	0,013457	S
m x AGR	0,0051	1	0,0051	8,5158	0,009586	S
coleta x AMR	0,0119	4	0,0030	4,9621	0,007760	S
m x AMR	0,0012	1	0,0012	2,0090	0,174432	NS
AGR x AMR	0,0018	1	0,0018	3,0657	0,097983	NS
Erro	0,0102	17	0,0006			
Total	0,5570	37				

onde: SQ = soma quadrada; GDL= graus de liberdade; MQ = média quadrada

Tabela 42: análise de variância dos resultados de resistência à compressão axial

Fatores	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
coleta	48,37	2	24,19	14,76	0,000001	S
m	1935,99	1	1935,99	1181,29	0,000000	S
AGR	1219,98	1	1219,98	744,40	0,000000	S
AMR	491,52	1	491,52	299,91	0,000000	S
coleta x m	40,29	4	10,07	6,15	0,000130	S
coleta x AGR	79,43	4	19,86	12,12	0,000000	S
m x AGR	180,95	1	180,95	110,41	0,000000	S
coleta x AMR	34,63	4	8,66	5,25	0,000520	S
m x AMR	17,89	1	17,89	10,92	0,001190	S
AGR x AMR	240,92	1	240,92	147,00	0,000000	S
Erro	249,11	152	1,64			
Total	4539,08	172				

onde: SQ = soma quadrada; GDL= graus de liberdade; MQ = média quadrada

Tabela 43: análise de variância dos resultados de consumo de cimento

Fatores	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
coleta	365,54	2	182,77	19,94	0,000035	S
m	93559,15	1	93559,15	10205,48	0,000000	S
AGR	8830,27	1	8830,27	963,21	0,000000	S
AMR	2053,56	1	2053,56	224,00	0,000000	S
coleta x m	37,32	4	9,33	1,02	0,426093	NS
coleta x AGR	131,84	4	32,96	3,60	0,026723	S
m x AGR	449,28	1	449,28	49,01	0,000002	S
coleta x AMR	117,37	4	29,34	3,20	0,039375	S
m x AMR	183,93	1	183,93	20,06	0,000330	S
AGR x AMR	198,26	1	198,26	21,63	0,000229	S
Erro	155,85	17	9,17			
Total	106082,364	37				

onde: SQ = soma quadrada; GDL= graus de liberdade; MQ = média quadrada

Tabela 44: análise de variância dos resultados de resistência à tração por compressão diametral

Fatores	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
coleta	0,2113	2	0,1057	1,7323	0,185336	NS
m	7,9063	1	7,9063	129,6078	0,000000	S
AGR	4,4505	1	4,4505	72,9573	0,000000	S
AMR	1,5580	1	1,5581	25,5412	0,000004	S
coleta x m	0,1677	4	0,0419	0,6874	0,603413	NS
coleta x AGR	0,4390	4	0,1098	1,7992	0,140361	NS
m x AGR	0,3728	1	0,3728	6,1108	0,016194	S
coleta x AMR	0,3970	4	0,0992	1,6270	0,178738	NS
m x AMR	0,0825	1	0,0825	1,3525	0,249305	NS
AGR x AMR	0,0910	1	0,0910	1,4918	0,226561	NS
Erro	3,7821	62	0,0610			
Total	19,4583	82				

onde: SQ = soma quadrada; GDL= graus de liberdade; MQ = média quadrada

Tabela 45: análise de variância dos resultados do módulo de deformação secante à 80% f_c

Fatores	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
coleta	12,57	2	6,29	5,22	0,008048	S
m	279,48	1	279,48	231,97	0,000000	S
AGR	288,43	1	288,43	239,39	0,000000	S
AMR	316,83	1	316,83	262,97	0,000000	S
coleta x m	7,90	4	1,97	1,64	0,175904	NS
coleta x AGR	30,44	4	7,61	6,32	0,000250	S
m x AGR	32,01	1	32,01	26,57	0,000003	S
coleta x AMR	13,20	4	3,30	2,74	0,036490	S
m x AMR	6,75	1	6,75	5,60	0,021071	S
AGR x AMR	29,77	1	29,77	24,71	0,000006	S
Erro	74,70	62	1,20			
Total	1092,07	82				

onde: SQ = soma quadrada; GDL= graus de liberdade; MQ = média quadrada

Tabela 46: análise de variância dos resultados da absorção de água por imersão dos concretos da coleta 1

Fatores	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
m	0,5126	1	0,5126	2,051	0,171333	NS
AGR	279,2475	1	279,2475	1117,477	0,000000	S
AMR	17,1259	1	17,1259	68,533	0,000000	S
m x AGR	0,2003	1	0,2003	0,801	0,383953	NS
m x AMR	1,6448	1	1,6448	6,582	0,020740	S
AGR x AMR	1,5939	1	1,5939	6,378	0,022487	S
Erro	3,9983	16	0,2499			
Total	304,3232	22				

onde: SQ = soma quadrada; GDL= graus de liberdade; MQ = média quadrada

Tabela 47: análise de variância dos resultados da absorção de água por imersão dos concretos da coleta 2

Fatores	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
m	4,08265	1	4,08265	37,5966	0,000014	S
AGR	17,89515	1	17,89515	164,7940	0,000000	S
AMR	24,55253	1	24,55253	226,1009	0,000000	S
m x AGR	2,81401	1	2,81401	25,9138	0,000109	S
m x AMR	0,86026	1	0,86026	7,9220	0,012460	S
AGR x AMR	1,16101	1	1,16101	10,6915	0,004816	S
Erro	1,73746	16	0,10859			
Total	53,1031	22				

onde: SQ = soma quadrada; GDL= graus de liberdade; MQ = média quadrada

Tabela 48: análise de variância dos resultados da absorção de água por imersão dos concretos da coleta 3

Fatores	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
m	1,74845	1	1,74845	5,63766	0,030430	S
AGR	17,58245	1	17,58245	56,69243	0,000001	S
AMR	4,30711	1	4,30711	13,88775	0,001836	S
m x AGR	0,02102	1	0,02102	0,06779	0,797900	NS
m x AMR	0,06250	1	0,06250	0,20152	0,659514	NS
AGR x AMR	14,59240	1	14,59240	47,05139	0,000004	S
Erro	4,96220	16	0,31014			
Total	43,2761	22				

onde: SQ = soma quadrada; GDL= graus de liberdade; MQ = média quadrada

APÊNDICE C – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS MODELOS DE REGRESSÃO MÚLTIPLA E PARÂMETROS ESTIMADOS DOS FATORES ANALISADOS

Tabela 49: análise de variância do modelo de regressão para a relação a/c

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p
Modelo	22,50223	5	4,50045	4459,322	0,0000
Resíduos	0,04037	40	0,00101		
Total	22,54260	45			
Total corrigido	0,63238	44			

onde: SQ = soma quadrada; GDL= graus de liberdade; MQ = média quadrada

Tabela 50: parâmetros estimados dos fatores analisados para a relação a/c

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Teste t	Valor p
Constante	B0	0,73	0,00498	146,5331	0,0000
AGR	B1	13,50	1,56903	8,6040	0,0000
AMR	B2	20,60	3,47633	5,9258	0,0000
m	B3	5,81	0,28487	20,3950	0,0000
AGR x m	B4	0,0095	0,00964	0,9857	0,1651

Tabela 51: análise de variância do modelo de regressão para a resistência à compressão

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p
Modelo	16063,607	8	2007,951	664,33	0,0000
Resíduos	111,833	37	3,023		
Total	16175,440	45			
Total corrigido	1269,640	44			

onde: SQ = soma quadrada; GDL= graus de liberdade; MQ = média quadrada

Tabela 52: parâmetros estimados dos fatores analisados para a resistência à compressão

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Teste t	Valor p
Constante	B0	22,50	2,17526	10,3436	0,0000
AGR	B1	7,44	1,56565	4,7520	0,0000
AMR	B2	9,69	3,70890	2,6126	0,0065
m	B3	8,61	0,02069	416,1973	0,0000
AGR x m	B4	-0,04	0,02108	-1,8978	0,0328
AMR x m	B5	0,008	0,26937	0,0297	0,4882
a/c	N0	0,67	1,78862	0,3746	0,3550

Tabela 53: análise de variância do modelo de regressão para o consumo de cimento

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p
Modelo	4476486,7	9	497387,4	7745,872	0,0000
Resíduos	2311,7	36	64,2		
Total	4478798,3	45			
Total corrigido	119956,8	44			

onde: SQ = soma quadrada; GDL= graus de liberdade; MQ = média quadrada

Tabela 54: parâmetros estimados dos fatores analisados para o consumo de cimento

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Teste t	Valor p
Constante	B0	310,25	1,19457	259,718	0,0000
AGR	B1	226,25	160,16986	1,413	0,0831
AMR	B2	197,37	160,16990	1,232	0,1130
m	B3	58,96	1,46304	40,300	0,000
AGR x m	B4	4,34	1,63574	2,653	0,0059
AMR x m	B5	2,78	1,63574	1,700	0,0489
AGR x AMR	B6	2,89	1,63574	1,767	0,0429
C x AGR	B7	209,78	161,50361	1,299	0,1011
C x AMR	B8	189,87	161,50364	1,176	0,1237

Tabela 55: análise de variância do modelo de regressão para a resistência à tração por compressão diametral

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p
Modelo	164,6034	5	32,9207	799,0461	0,0000
Resíduos	1,6498	40	0,0412		
Total	166,2532	45			
Total corrigido	9,7517	44			

onde: SQ = soma quadrada; GDL= graus de liberdade; MQ = média quadrada

Tabela 56: parâmetros estimados dos fatores analisados para a resistência à tração por compressão diametral

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Teste t	Valor p
Constante	B0	1,86	0,03028	61,4267	0,0000
AGR	B1	6,81	0,97107	7,0129	0,0000
AMR	B2	9,86	1,88971	5,2177	0,0000
m	B3	4,87	0,48783	9,9830	0,0000
AGR x m	B4	-0,016	0,02370	-0,6751	0,2518

Tabela 57: análise de variância do modelo de regressão para a relação entre resistência à tração e resistência à compressão

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p
Modelo	294,4898	2	147,2449	31850,13	0,0000
Resíduos	0,3652	79	0,0046		
Total	294,8550	81			
Total corrigido	14,4042	80			

onde: SQ = soma quadrada; GDL= graus de liberdade; MQ = média quadrada

Tabela 58: parâmetros estimados dos fatores analisados para a relação entre resistência à tração e resistência à compressão

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Teste t	Valor p
Constante	B0	0,12	0,00611	19,6328	0,0000
fc	N0	0,92	0,01662	55,3523	0,0000

Tabela 59: análise de variância do modelo de regressão para o módulo de deformação secante

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p
Modelo	6279,263	6	1046,544	591,5016	0,0000
Resíduos	69,027	39	1,769		
Total	6348,290	45			
Total corrigido	606,759	44			

onde: SQ = soma quadrada; GDL= graus de liberdade; MQ = média quadrada

Tabela 60: parâmetros estimados dos fatores analisados para o módulo de deformação secante

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Teste t	Valor p
Constante	B0	13,49	1,31517	10,2572	0,0000
AGR	B1	5,76	1,17967	4,8827	0,0000
AMR	B2	5,49	0,82268	6,6733	0,0000
m	B3	8,67	4,64289	1,8674	0,0347
AGR x m	B4	-0,04	0,02561	-1,5618	0,0633
a/c	N1	0,48	0,33346	1,4394	0,0790

Tabela 61: análise de variância do modelo de regressão para a relação entre módulo de deformação e resistência à compressão

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p
Modelo	12376,475	2	6188,238	3956,067	0,0000
Resíduos	123,575	79	1,564		
Total	12500,050	81			
Total corrigido	872,022	80			

onde: SQ = soma quadrada; GDL= graus de liberdade; MQ = média quadrada

Tabela 62: parâmetros estimados dos fatores analisados para a relação entre módulo de deformação e resistência à compressão

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Teste t	Valor p
Constante	B0	-13,39	1,16834	-11,4607	0,0000
fc	B1	5,74	0,26234	21,8803	0,0000

Tabela 63: análise de variância do modelo de regressão para a absorção de água da coleta 1

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p
Modelo	834,5126	7	119,216	58,38946	0,00000
Resíduos	16,3339	8	2,042		
Total	850,8465	15			
Total corrigido	164,1652	14			

onde: SQ = soma quadrada; GDL= graus de liberdade; MQ = média quadrada

Tabela 64: parâmetros estimados dos fatores analisados para a absorção de água da coleta 1

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Teste t	Valor p
a/c	B0	10,26	0,54673	18,7663	0,0000
AGR	B1	-0,56	0,08495	-6,5920	0,0001
AMR	B2	-0,21	0,09945	-2,1116	0,0339
m	B3	0,12	0,09027	1,3293	0,1102
AGR x AMR	B4	0,28	0,10529	2,6594	0,0144
AMR x m	B5	0,052	0,06697	0,7765	0,2299
AGR x m	B6	0,12	0,09888	1,2135	0,1298

Tabela 65: análise de variância do modelo de regressão para a absorção de água da coleta 2

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p
Modelo	280,7834	7	40,112	123,3416	0,00000
Resíduos	2,6017	8	0,325		
Total	283,3851	15			
Total corrigido	27,0358	14			

onde: SQ = soma quadrada; GDL= graus de liberdade; MQ = média quadrada

Tabela 66: parâmetros estimados dos fatores analisados para a absorção de água da coleta 2

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Teste t	Valor p
a/c	B0	5,58	0,21027	26,5372	0,0000
AGR	B1	-0,13	0,04993	-2,6036	0,0157
AMR	B2	-0,19	0,04869	-3,9020	0,0023
m	B3	0,10	0,04896	2,0426	0,0377
AGR x AMR	B4	-0,007	0,05598	-0,1251	0,4518
AMR x m	B5	-0,04	0,05221	-0,7661	0,2328
AGR x m	B6	-0,07	0,05027	-1,3923	0,1007

Tabela 67: análise de variância do modelo de regressão para a absorção de água da coleta 3

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p
Modelo	375,2461	7	53,607	26,46089	0,0001
Resíduos	16,2070	8	2,026		
Total	391,4531	15			
Total corrigido	34,1395	14			

onde: SQ = soma quadrada; GDL= graus de liberdade; MQ = média quadrada

Tabela 68: parâmetros estimados dos fatores analisados para a absorção de água da coleta 3

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Teste t	Valor p
a/c	B0	7,14	0,54839	13,0200	0,0000
AGR	B1	-0,10	0,10417	-0,9600	0,1826
AMR	B2	-0,16	0,10229	-1,5642	0,0782
m	B3	0,10	0,09356	1,0689	0,1582
AGR x AMR	B4	0,19	0,11319	1,6786	0,0659
AMR x m	B5	0,006	0,10843	0,0553	0,4786
AGR x m	B6	-0,001	0,10884	-0,0092	0,4965