



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA - UFBA
ESCOLA POLITÉCNICA - EPUFBA
MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL URBANA - MEAU

JULIANA OLIVEIRA MALTA

**DOSAGEM DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADO
MIÚDO RECICLADO DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E
DEMOLIÇÃO**

Salvador - BA

2012

JULIANA OLIVEIRA MALTA

**DOSAGEM DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADO
MIÚDO RECICLADO DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E
DEMOLIÇÃO**

Dissertação apresentada ao Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Prof^o Dr^o Jardel Pereira Gonçalves
Co-Orientadora: Prof^a Dr^a Vanessa Silveira Silva

Salvador - BA

2012

M261 Malta, Juliana Oliveira

Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo de construção e demolição / Juliana Oliveira Malta. – Salvador, 2012.

192 f. : il. color.

Orientador: Prof. Doutor Jardel Pereira Gonçalves

Co-orientadora: Prof. Doutora Vanessa Silveira Silva

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2012.

1. Concreto - Mistura. 2. Resíduos com material de construção. 3. Concreto - Produtos. I. Gonçalves, Jardel Pereira. II. Silva, Vanessa Silveira. III. Universidade Federal da Bahia. IV. Título.

CDD: 620.136

JULIANA OLIVEIRA MALTA

**DOSAGEM DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADO MIÚDO
RECICLADO DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental Urbana.

Salvador, 14 de setembro de 2012.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Jardel Pereira Gonçalves
Universidade Federal da Bahia - UFBA

Profa. Dra. Vanessa Silveira Silva
Universidade Federal da Bahia - UFBA

Prof. Dr. Daniel Veras Ribeiro
Universidade Federal da Bahia - UFBA

Prof. Dr. Paulo Correia Gomes
Universidade Federal de Alagoas - UFAL

Ao grande Engenheiro Civil, Alípio José V. P. Filho
(*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo sustento diário, minha fonte de força e consolo ao longo deste tempo.

Agradeço ao meu orientador prof^o Jardel Gonçalves, que com palavras sábias e discussões proveitosas enriqueceu meu conhecimento. Agradeço também a minha co-orientadora, prof^a Vanessa Silva, com sua paciência e orientação, sempre preocupada em melhorar meu texto.

Agradeço aos meus pais, Aldete e Judson, aos meus irmãos, Marina e Guto, e a Davi que chegou para tornar a nossa vida melhor. Mesmo com a distância, vocês estavam presentes a cada momento em meu coração, dando-me mais ânimo. Agradeço em especial a minha mãe, por sempre ter uma palavra de amor e de encorajamento quando eu mais precisava.

Agradeço ao meu noivo, Carlos Rezende, pelo amor, pela compreensão, paciência e grande ajuda neste trabalho.

Agradeço à equipe do CETA/GEMAC, que me deu grande apoio, em especial aos técnicos Paulo e Sr. Emanuel, aos bolsistas Eliel, Uesley, Jânimo, Juliana Leal, Vanessa e Daniela. Foi muito bom estar com vocês.

Agradeço ao Instituto Federal Baiano, minha segunda família, em especial ao Reitor Sebastião Edson Moura e ao Pró-Reitor, Eloivaldo Pereira, pelo entendimento da importância desta pesquisa, sempre me apoiando e acreditando no meu trabalho. Também sou grata à equipe de engenharia, em especial ao amigo e engenheiro, Carlos Renoir, e aos estagiários, Flávia e Raphael, pela compreensão e dedicação em meus momentos de ausência. Agradeço aos meus amigos do IF Baiano que tornam os meus dias mais alegres, em especial a Rob, André, Humberto, Saulo e Luís Fernando.

Agradeço à Construtora Franisa Empreendimentos Imobiliários Ltda pela doação do resíduo utilizado nesta dissertação e pela britagem do mesmo.

Agradeço à Pedreira Parafuso pela doação e transporte do agregado graúdo utilizado nesta pesquisa.

Agradeço à fábrica de cimentos da MIZU pela doação dos sacos de cimento utilizados.

Agradeço ao Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ pelos ensaios realizados e apoio recebido da equipe.

Agradeço aos órgãos que fomentaram esta pesquisa, FAPESB, CAPES e CNPQ.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	i
LISTA DE FIGURAS	ii
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa do Trabalho.....	1
1.2 Objetivo Geral.....	4
1.3 Hipótese	5
1.4 Delimitação e Estrutura do Trabalho	6
2 GESTÃO E RECICLAGEM DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)	7
2.1 Gestão do RCD no Brasil.....	9
2.1.1 Normalização.....	11
2.1.2 Gestão do RCD na Região Metropolitana de Salvador (RMS).....	13
2.2 Alternativas para a Reciclagem do RCD	16
3 TECNOLOGIA DE RECICLAGEM DE RCD	19
3.1 Coleta, Transporte e Separação do Resíduo	19
3.2 Beneficiamento do Resíduo	19
3.2.1 Equipamentos de Britagem.....	20
3.3 Caracterização do Agregado de RCD	22
3.3.1 Massa Específica e Massa Unitária	22
3.3.2 Forma e Textura.....	24
3.3.3 Absorção	25
3.3.4 Composição Granulométrica	35
3.4 Influência das características dos agregados reciclados nas propriedades do concreto	35
3.4.1 Concreto no estado fresco.....	35
3.4.2 Concreto no estado endurecido.....	39
4 DOSAGEM DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS	48
4.1 Procedimento de Dosagem de Concretos Convencionais.....	48
4.1.1 Método ACI / ABCP (Rodrigues, 1995)	49
4.1.2 Método IPT / EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992)	55
4.1.2.1 Estudo Teórico	55
4.1.2.2 Estudo Experimental	58
4.1.2.3 Traço Definitivo	60
4.2 Procedimento de Dosagem de Concretos de Alto Desempenho.....	61

4.2.1	Método Aitcin (1998)	61
4.2.1.1	Planilha de dosagem	64
4.2.1.2	Composição da mistura	66
4.2.2	Método de Mehta e Aitcin (1990b)	68
4.3	Procedimento de Dosagem de concretos com agregados reciclados	73
4.3.1	Estudos com compensação	75
4.3.2	Estudos sem compensação	82
4.3.2.1	Abordagem em dois estágios de mistura (Tam <i>et al.</i> ,2005).....	82
4.4	Considerações sobre os Procedimentos de Dosagem existentes para Concretos Reciclados e as formas de mistura.....	86
5	PROGRAMA EXPERIMENTAL	90
5.1	Resíduo de Construção e Demolição (RCD)	90
5.1.1	Definição da empresa geradora	90
5.1.2	Coleta, transporte e Segregação do RCD	93
5.1.3	Britagem e Classificação granulométrica do RCD.....	95
5.1.4	Caracterização do RCD	96
5.2	Materiais Utilizados	102
5.2.1	Cimento	102
5.2.2	Agregado miúdo	103
5.2.3	Agregado graúdo	104
5.2.4	Superplastificante	105
5.3	Metodologia	106
5.3.1	Argamassa	106
5.3.1.1	Argamassa no estado fresco	107
5.3.1.2	Argamassa no estado endurecido	108
5.3.2	Concreto	110
5.3.2.1	Concreto no estado fresco	111
5.3.2.2	Concreto no estado endurecido	111
5.4	Estudo de Dosagem	115
5.4.1	Dosagem de concretos com RCD.....	115
5.4.2	Procedimento de mistura dos materiais	117
5.4.2.1	Procedimento de compensação do AMR	117
5.4.2.2	Argamassa	118
5.4.2.3	Concretos.....	120
5.4.3	Diagrama de Dosagem – Método IPT/EPUSP	122
5.5	Fluxograma do Programa Experimental	124
5.5.1	Argamassas	124

5.5.2	Concretos	125
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	127
6.1	Etapa 1: Argamassas	127
6.1.1	Estado Fresco.....	127
6.1.2	Estado Endurecido	132
6.1.2.1	Análise Termogravimétrica.....	132
6.1.2.2	Resistência à Compressão Axial	136
6.1.2.3	Absorção por Imersão	147
6.2	Etapa 2: Concretos	148
6.2.1	Estado Fresco.....	148
6.2.2	Estado Endurecido	152
6.2.2.1	Resistência à Compressão Axial	152
6.2.2.2	Resistência à Tração por compressão diametral	159
6.2.2.3	Absorção por Imersão	161
6.2.2.4	Determinação da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas.....	163
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	165
7.1	Conclusões	165
7.1.1	Características do RCD	165
7.1.2	Etapa 1: Argamassas.....	166
7.1.2.1	Estado fresco	166
7.1.2.2	Estado endurecido	166
7.1.3	Etapa 2: Concretos.....	167
7.1.3.1	Estado fresco	167
7.1.3.2	Estado endurecido	168
7.2	Contribuições à dosagem de concretos contendo AMR	169
7.3	Sugestões para trabalhos futuros.....	170
8	REFERÊNCIAS	171

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Municípios brasileiros <i>versus</i> Legislação sobre RCC.	11
Tabela 2 – Critérios de qualidade do concreto em função da velocidade ultrassônica.	44
Tabela 3 – Relações a/c máximas permissíveis para concretos submetidos a condições severas.	50
Tabela 4 – Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto (NBR 6118, 2003).	50
Tabela 5 – Classe de Agressividade Ambiental (NBR 6118, 2003).	50
Tabela 6 – Consumo de água aproximado (l/m ³).	51
Tabela 7 – Volume compactado seco (V _c) de agregado graúdo por m ³ de concreto.	53
Tabela 8 – Volume compactado seco (V _c) de agregado graúdo por m ³ de concreto.	57
Tabela 9 – Grau de Resistência x Resistência a Compressão média.	69
Tabela 10 – Relação entre resistência a compressão média e o teor máximo de água.	69
Tabela 11 – Fração em volume dos componentes em 0,35 m ³ de pasta de cimento, m ³	70
Tabela 12 – Relação entre resistência e proporção agregado miúdo/graúdo.	71
Tabela 13 – Estágios da obra x Materiais e sistemas adotados.	91
Tabela 14 – Resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo reciclado.	97
Tabela 15 – Requisitos da NBR 15.116 (ABNT, 2004).	97
Tabela 16 – Distribuição granulométrica finos da areia reciclada.	98
Tabela 17 – Composição química do CP V ARI.	102
Tabela 18 – Resistência à Compressão do CP V ARI.	102
Tabela 19 – Finura, Expansibilidade, Pega e Consistência do CP V ARI.	102
Tabela 20 – Resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo natural.	103
Tabela 21 – Resultados dos ensaios de caracterização do agregado graúdo natural.	104
Tabela 22 – Classificação da qualidade do concreto em função do ensaio de UPV.	114
Tabela 23 – Parâmetros fixados para cada método de dosagem.	115
Tabela 24 – a) Traços dos concretos e Consumos dos materiais; b) Volume dos materiais, de pasta e de argamassa da mistura; teor de umidade e teor de argamassa dos concretos.	116
Tabela 25 – Tabela Final - a) Traços dos concretos e Consumos dos materiais; b) Volume dos materiais, de pasta e de argamassa da mistura; teor de umidade e teor de argamassa dos concretos.	117
Tabela 26 – Misturas Experimentais para estudo de dosagem - IPT.	123
Tabela 27 – Proporcionalamento dos materiais: valores de consistência e quantidade de aditivo usado.	127
Tabela 28 – Parâmetros analisados para as argamassas com a/c = 0,5.	135
Tabela 29 – Resistência à Compressão axial – Argamassa a/c = 0,4.	136
Tabela 30 – Resistência à Compressão axial – Argamassa a/c = 0,5.	137
Tabela 31 – Resistência à Compressão axial – Argamassa a/c = 0,6.	137
Tabela 32 – Resistência à Compressão axial – concretos de referência.	152
Tabela 33 – Resistência à Compressão axial – concretos 25% AMR com compensação.	153
Tabela 34 – Resistência à Compressão axial – concretos 50% AMR com compensação.	153
Tabela 35 – Resistência à Compressão axial – concretos 25% AMR sem compensação.	153
Tabela 36 – Resistência à Compressão axial – concretos 50% AMR sem compensação.	153
Tabela 37 – Relação entre a Resistência à tração por compressão diametral, métodos de dosagem e teores de substituição de AMR.	159
Tabela 38 – Relação entre a absorção por imersão, métodos de dosagem e teores de substituição de AMR.	161
Tabela 39 – Relação entre a velocidade do pulso, métodos de dosagem e teores de substituição de AMR.	163

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparativo de Resíduos Sólidos por tipo – 2009 a 2011.....	15
Figura 2 - Relação entre a taxa de absorção e o tempo para o agregado miúdo	27
Figura 3 - Relação entre a taxa de absorção e o tempo para o agregado miúdo	28
Figura 4 – Determinação da absorção de água utilizando a pesagem hidrostática.	31
Figura 5 – Contribuição da fase sólida e da fase líquida ao cisalhamento.	37
Figura 6 – Suspensão de grãos. a) Sem trabalhabilidade; b) Com trabalhabilidade.	37
Figura 7 – Dosagem de concreto reciclado. Correlação entre resistência à compressão axial e fator a/c.....	41
Figura 8 – Resistência à compressão dos concretos em função da massa específica dos agregados e do consumo de cimento.	42
Figura 9 – Resistência à compressão em função do teor de substituição do agregado.	42
Figura 10 – Curva de Abrams.	51
Figura 11 - Fluxograma do método de dosagem Aitcin (1998).	62
Figura 12 - Relações propostas entre a relação água/aglomerante e a resistência à compressão.	63
Figura 13 - Determinação da dosagem mínima de água.	63
Figura 14 - Teor de agregado graúdo.	64
Figura 15 - Planilha de projeto de traço.	66
Figura 16 - Planilha de mistura.	67
Figura 17 – Procedimentos de mistura (i) método normal (ii) método de mistura em dois estágios.	83
Figura 18 – Símbolos utilizados para representar os materiais.	83
Figura 19 – Interfaces do Agregado Reciclado.	84
Figura 20 – Estrutura do agregado reciclado utilizando o método de mistura em dois estágios.	85
Figura 21 – Procedimento de mistura.....	89
Figura 22 - Duto coletor de entulho.	92
Figura 23 – a) Bags para armazenamento de materiais leves; b) Bombonas nos pavimentos.	92
Figura 24 - a) Baía de Resíduo Classe A; b) Aspecto do resíduo da obra.	93
Figura 25 - a) Frações Argamassa e Material Cerâmico; b) Frações Concreto e “Outros”. ...	93
Figura 26 - a) Sacos empilhados com as frações de entulho; b) Balança utilizada na composição gravimétrica.	94
Figura 27 - Composição gravimétrica do resíduo em estudo.....	94
Figura 28 - a) Britador de martelo; b) Aspecto interno do britador; c) Operação de britagem.	95
Figura 29 - a) Peneiramento #4,75 mm; b) Fração retida; c) Fração passante.....	96
Figura 30 – Curva Granulometria do Agregado miúdo reciclado.....	98
Figura 31 – Distribuição granulométrica dos finos do agregado miúdo reciclado.....	99
Figura 32 – Microscopia eletrônica de varredura da areia reciclada em quatro tamanhos diferentes.	99
Figura 33 – Ensaio de Impurezas Orgânicas.	100
Figura 34 – Ensaio de Absorção de agregados reciclados (Leite, 2001) adaptado por Reis (2009).	100
Figura 35 – Relação entre a taxa de absorção e o tempo para o agregado reciclado.	101
Figura 36 – Relação entre o ganho de massa e o tempo para o agregado reciclado.	101
Figura 37 – Curva granulométrica da Areia natural.....	103
Figura 38 – Curva granulométrica do agregado graúdo.....	104
Figura 39 – Distribuição dos corpos-de-prova de argamassa por ensaio.	106
Figura 40 – a) Viscosímetro Brookfield; b) Detalhe do <i>spindle</i> utilizado.	107

Figura 41 – Programação feita no Viscosímetro Brookfield.....	108
Figura 42 – Análise Termogravimétrica. a) Preparação da amostra no cadinho; b) Equipamento utilizado para o ensaio.....	109
Figura 43 – Distribuição dos corpos-de-prova de concreto por ensaio.....	110
Figura 44 – Tipos de transmissão do pulso ultrassônico – a) transmissão direta; b) transmissão indireta; c) transmissão semidireta.....	113
Figura 45 – Equipamento utilizado para o ensaio de UPV.....	114
Figura 46 – Pré-umedecimento do agregado miúdo reciclado.....	118
Figura 47 – Argamassadeira utilizada.....	119
Figura 48 – a) Ensaio no Viscosímetro Brookfield; b) Mesa de consistência.....	119
Figura 49 – Corpos-de-prova de argamassa.....	120
Figura 50 – Betoneira utilizada para confecção das misturas de concreto.....	120
Figura 51 – a) Equipamento utilizado para o <i>slump test</i> ; b) Adensamento na mesa vibratória.....	121
Figura 52 – Corpos-de-prova de concreto.....	121
Figura 53 – Tanque de cura.....	122
Figura 54 – Diagrama de dosagem de concretos de referência dosados pelo Método do IPT.....	124
Figura 55 – Fluxograma do Programa Experimental para as Argamassas.....	125
Figura 56 – Fluxograma do Programa Experimental para os Concretos.....	126
Figura 57 - Viscosidade Brookfield <i>versus</i> rotação. Curvas da argamassa de referência, com 25% AMR com compensação e 25% AMR sem compensação. a) $a/c = 0,4$; b) $a/c = 0,5$; c) $a/c = 0,6$	129
Figura 58 – Viscosidade Brookfield <i>versus</i> rotação. Curvas da argamassa de referência, com 50% AMR com compensação e 50% AMR sem compensação. a) $a/c = 0,4$; b) $a/c = 0,5$; c) $a/c = 0,6$	130
Figura 59 – Curva termogravimétrica das argamassas de referência.....	132
Figura 60 – Curva termogravimétrica das argamassas com 25% de AMR com compensação.....	133
Figura 61 – Curva termogravimétrica das argamassas com 50% de AMR com compensação.....	133
Figura 62 – Curva termogravimétrica das argamassas com 25% de AMR sem compensação.....	134
Figura 63 – Curva termogravimétrica das argamassas com 50% de AMR sem compensação.....	134
Figura 64 – Junção das curvas termogravimétricas das argamassas com $a/c = 0,5$	135
Figura 65 - Resistência à Compressão axial <i>versus</i> Idade, para o teor de 25%. a) $a/c = 0,4$; b) $a/c = 0,5$ e c) $a/c = 0,6$	138
Figura 66 - Resistência à Compressão axial <i>versus</i> Idade, para o teor de 50%. a) $a/c = 0,4$; b) $a/c = 0,5$ e c) $a/c = 0,6$	139
Figura 67 – Índices de influência I_{ic} e I_{isc} das misturas para os teores de 25% e 50%: a) Com compensação para $a/c = 0,4$; b) Sem compensação para $a/c = 0,4$; c) Com compensação para $a/c = 0,5$; d) Sem compensação para $a/c = 0,5$; e) Com compensação para $a/c = 0,6$; f) Sem compensação para $a/c = 0,6$	141
Figura 68 – Ajuste da curva exponencial das argamassas de referência aos 28 dias.....	142
Figura 69 – Relação entre o fator a/c real <i>versus</i> Idade: a) Teor de 25% para $a/c_{ref} = 0,4$; b) Teor de 50% para $a/c_{ref} = 0,4$; c) Teor de 25% para $a/c_{ref} = 0,5$; d) Teor de 50% para $a/c_{ref} = 0,5$; e) Teor de 25% para $a/c_{ref} = 0,6$; f) Teor de 50% para $a/c_{ref} = 0,6$	143

Figura 70 – Resistência à compressão axial para argamassas de referência, com 25% AMR com compensação e 25% AMR sem compensação <i>versus</i> relação a/c: a) 3 dias; b) 7 dias e c) 28 dias.....	145
Figura 71 – Resistência à compressão axial para ARG 50% <i>versus</i> relação a/c: a) 3 dias; b) 7 dias e c) 28 dias.	146
Figura 72 – Absorção por imersão das argamassas <i>versus</i> relação a/c: a) Curvas da argamassa de referência, argamassa com 25% de AMR sem compensação (SC) e argamassa com 25% de AMR com compensação; b) Curvas da argamassa de referência, argamassa com 50% de AMR sem compensação (SC) e argamassa com 50% de AMR com compensação.....	147
Figura 73 – <i>Slump test</i> . a) Método IPT/EPUSP; b) Método Mehta/Aitcin.	149
Figura 74 – Verificação da coesão da mistura. a) Método IPT/EPUSP; b) Método Mehta/Aitcin e c) Método ACI/ABCP.	150
Figura 75 – a) <i>Slump Test</i> para o concreto dosado pelo método do ACI, com 25% de AMR, sem compensação; b) Verificação da coesão dessa mistura.....	151
Figura 76 – a) <i>Slump Test</i> para o concreto dosado pelo método Mehta/Aitcin, com 25% de AMR, sem compensação; b) Verificação da coesão dessa mistura.....	151
Figura 77 – a) <i>Slump Test</i> para o concreto dosado pelo método Mehta/Aitcin, com 50% de AMR, com compensação; b) Verificação da coesão dessa mistura.	151
Figura 78 – a) <i>Slump Test</i> para o concreto dosado pelo método de Aitcin, com 50% de AMR, sem compensação; b) Verificação da coesão dessa mistura.....	152
Figura 79 – Resistência à compressão axial <i>versus</i> idade. a) Método de dosagem Mehta/Aitcin; b) Método de dosagem Aitcin.	154
Figura 80 – Resistência à compressão axial <i>versus</i> idade. a) Método de dosagem ACI/ABCP; b) Método de dosagem IPT.	155
Figura 81 – Resistência à compressão axial <i>versus</i> idade - Concretos de referência.....	156
Figura 82 – Resistência à compressão axial <i>versus</i> idade. a) Concretos com 25% de AMR com compensação; b) Concretos com 25% de AMR sem compensação.....	157
Figura 83 – Resistência à compressão axial <i>versus</i> idade. a) Concretos com 50% de AMR com compensação; b) Concretos com 50% de AMR sem compensação.....	158
Figura 84 – a) Resistência à tração por compressão diametral <i>versus</i> métodos de dosagem. b) Relação entre a resistência a tração por compressão diametral e a resistência a compressão axial <i>versus</i> métodos de dosagem.....	160
Figura 85 – Absorção por imersão <i>versus</i> métodos de dosagem.....	162
Figura 86 – Velocidade do pulso ultrassônico em relação aos métodos de dosagem.	163

DOSAGEM DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADO MIÚDO RECICLADO DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Malta, J. O.

RESUMO

A indústria da Construção Civil é responsável por um grande impacto ambiental, principalmente em relação à quantidade de resíduo gerado. Muitos estudos têm sido desenvolvidos para reduzir a geração de resíduos na fonte, reutilizando sempre que possível na forma de agregados reciclados. As diferentes formas de dosar os concretos, bem como os diferentes tratamentos dados aos agregados reciclados, influenciam as propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido. Verifica-se que os métodos utilizados para dosar os concretos reciclados são os mesmos para dosar concretos convencionais, com alguns ajustes de parâmetros. Neste trabalho, foram dosados concretos convencionais (métodos ACI/ABCP e IPT/EPUSP) e concretos de alto desempenho (métodos de AITCIN e MEHTA/AITCIN), com taxas de substituição do agregado miúdo natural (AMN) pelo miúdo reciclado (AMR) de 0%, 25% e 50%, utilizando os procedimentos de compensação de parte da água de absorção dos agregados reciclados e a não compensação. Foi realizado um estudo com argamassas para três relações a/c 0,4, 0,5 e 0,6, com substituições de 0%, 25% e 50% de areia natural por areia reciclada. Para avaliar a influência das práticas de dosagem nas argamassas no estado fresco foi realizado ensaio de reologia no viscosímetro Brookfield e na mesa de consistência; no estado endurecido foi realizado o ensaio de resistência à compressão axial nas idades de 3,7 e 28 dias; absorção por imersão aos 28 dias e termogravimetria aos 28 dias. Para avaliar a influência das práticas de dosagem do concreto no estado fresco foi utilizado o ensaio de abatimento do tronco de cone. Para avaliar essa influência no estado endurecido, foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial nas idades de 3, 7, 28 e 63 dias, resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias, ensaio de absorção por imersão aos 28 dias e ensaio de determinação da velocidade de ondas ultrassônicas aos 63 dias. Em relação às argamassas produzidas com substituição de resíduo, nota-se que há um aumento de viscosidade; a incorporação do AMR diminuiu a resistência; o procedimento de compensação provocou uma maior queda de resistência à compressão axial e maior absorção em relação às misturas sem compensação. Os concretos sem compensação apresentaram resistências à compressão axial maiores em relação aos que tiveram compensação, para todos os métodos e teores de substituição. Para os concretos com compensação, houve aumento da absorção. Os resultados mostram que os métodos de dosagem e os procedimentos adotados para produção de materiais cimentícios contendo AMR apresentam parâmetros diferentes e que isto influencia nas suas propriedades nos estados fresco e endurecido.

Palavras-chave: Dosagem, Concreto, Agregado miúdo reciclado.

MIX DESIGN OF CONCRETES PRODUCED WITH RECYCLED FINE AGGREGATES OF CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE

Malta, J. O.

ABSTRACT

The construction industry is responsible for a big environmental impact, mainly with respect to the amount of waste generated. Many studies have been developed to reduce the generation of waste at source, reusing always what is possible, as the recycled aggregates. The different ways of proportioning the concrete mix and the different treatments given to recycled aggregates influence the properties of the concrete in its fresh and hardened states. It was verified that the methods used to proportion the recycled concrete are the same for dosing conventional concrete, with some tweaking of parameters. In this study, conventional concrete (ACI/ABCP and IPT/EPUSP methods) and high performance concrete (AITCIN and MEHTA/AITCIN methods) were dosed with substitution rates of 0%, 25% and 50% of natural fine aggregates (NFA) by recycled fine aggregates (RFA), using both procedures of compensating part of the recycled aggregates water absorption, and not compensating. A study was conducted with mortar for three w/c ratios (0,4, 0,5 e 0,6) with substitutions of 0%, 25% and 50% of natural sand by recycled aggregate. To evaluate the influence of mix design practices in mortar in the fresh state, a rheology test was performed in the Brookfield viscometer and in the consistency table; in the hardened state was performed the compressive strength test in the ages of 3, 7 and 28 days; water absorption test by immersion at 28 days and thermogravimetric analysis also at 28 days. To evaluate the influence of the mix design practices in concretes in the fresh state, the slump test was performed. To evaluate this influence in the hardened state, the following tests were performed: compressive strength in the ages of 3, 7, 28 and 63 days, tensile strength by diametral compression at 28 days, water absorption by immersion at 28 days and velocity of the ultrasonic pulse at 63 days. Regarding to mortars produced with waste, it could be noticed that there was an increase in viscosity; the RFA's incorporation decreased the compressive strength; the procedure of compensation caused a bigger decrease in the compressive strength and bigger water absorption when compared to the mortars without compensation. The concretes without compensation presented bigger compressive strength when compared to the concrete which had compensation, for all methods and ratios of substitution. In the concretes with compensation, there was an increase of water absorption. The results shows that the dosage methods and adopted procedures for cementitious materials production with RFA present different parameters and this influences in their properties in both states, fresh and hardened.

Keywords: Mix design, Concrete, Recycled fine aggregates.

1 INTRODUÇÃO

São notórios os impactos causados pela indústria da construção civil ao meio ambiente, haja vista ser esta uma grande responsável pela geração e acúmulo de resíduos de construção e demolição (RCD). Para minimizar os danos causados, têm-se buscado novos rumos para a redução, reutilização e reciclagem dos resíduos.

O acelerado crescimento urbano tem provocado, dentre outras coisas, a necessidade de alternativas para a disposição segura do grande volume de resíduos das atividades da construção civil, com reflexos de natureza ambiental e social. Segundo JOHN (2001), nenhuma sociedade poderá atingir o desenvolvimento sustentável sem que a construção civil, que lhe dá suporte, passe por profundas transformações.

Os entulhos, como também são conhecidos os resíduos de construção e demolição, são encarados como um grande problema pelos municípios em geral, visto que o descarte clandestino gera um alto custo para o remanejamento desse material, ocasionando problemas ambientais e de saúde pública. Logo, é de suma importância buscar novos rumos para inserção desses entulhos na própria cadeia da construção civil, deixando o processo com um caráter cada vez mais sustentável.

O conhecimento das propriedades do concreto confeccionado com agregados reciclados ainda se encontra distante do panorama desejável, onde o material possa ser empregado com sólidos conhecimentos acerca da sua dosagem e a influência dos diferentes métodos no comportamento mecânico das misturas, devido a sua grande heterogeneidade.

Desta forma, é necessário o desenvolvimento de estudos de dosagem acerca dos concretos com agregados reciclados e da influência dos diferentes métodos nas propriedades mecânicas, de absorção e na microestrutura do concreto reciclado produzido.

1.1 Justificativa do Trabalho

Os principais centros urbanos apresentam grandes volumes de RCD, pois a expansão da indústria da Construção Civil torna-se marcante nos últimos tempos. Devido a isso, os resíduos Classe A (que podem ser reutilizados como agregados) surgem como uma alternativa sustentável, na medida em que, são utilizados para a confecção de novos materiais.

A produção de quantidades significativas de resíduos de construção civil é um dos principais problemas enfrentados em áreas urbanas. Dados levantados entre 1995 e 1997 em cinco cidades do interior de São Paulo indicam que a geração dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD) variava entre 54% e 70% dos Resíduos Sólidos Urbanos (PINTO, 1999).

Em Salvador, segundo dados da LIMPURB (2000) *apud* Carneiro *et al* (2001), são coletadas, cerca de 2.750 t/dia de entulho. Esse valor representa 50% dos resíduos coletados pela limpeza urbana, embora não abranja a totalidade do entulho produzido na cidade.

Pinto (1999) estimou que nas grandes cidades brasileiras as atividades de canteiros de obras são responsáveis por aproximadamente 50% dos resíduos de construção e demolição (RCD), enquanto que a atividade de demolição e manutenção são responsáveis pela outra metade. Dessa forma, o estudo da fabricação de novos materiais cimentícios, como o concreto com agregados provenientes do resíduo de construção e demolição, surge como uma alternativa para diminuir os impactos gerados ao meio ambiente.

O estudo da dosagem de concretos reciclados ainda não é algo bem solidificado, justamente devido às peculiaridades dos agregados provenientes dos resíduos de construção civil. Existem, atualmente, estudos sobre dosagem de concretos com agregados reciclados, porém o que se verifica é que não há um método de dosagem racional para concretos reciclados, existindo diversas formas de tratamento dos agregados e formas variadas, também, da ordem de mistura dos materiais na betoneira.

A variabilidade das características dos agregados reciclados requer o uso de um sistema de dosagem que permita evidenciar a influência das propriedades específicas do agregado nas propriedades do novo concreto. (BARRA, 1996)

Segundo Ângulo (1998) quanto à dosagem do concreto com agregados reciclados, apesar de serem válidas as mesmas leis de dosagem tradicionais, a absorção influi significativamente. A consistência, neste caso, passa a ser um fator relativo da absorção. É prudente se desenvolver mecanismos complementares ou até mesmo diferentes para analisar o seu comportamento global. Ainda de acordo com este autor, tratando-se de um material heterogêneo, em que a absorção dos agregados obtidos pela reciclagem pode variar em função da quantidade de argamassa antiga aderida aos agregados originais, deve-se estudar o comportamento a nível microscópico, para melhor entendê-lo. Desta forma, é necessário se quantificar a capacidade de absorção dos dois materiais, para se saber realmente quanto de água vai para a pasta, permitindo, a partir daí, uma relação correta entre resistência e relação água/cimento.

De acordo com Barra (1996), não se pode generalizar as características dos agregados convencionais, considerando-as únicas e muito menos fazer essa mesma consideração para os agregados reciclados, devido a sua grande variabilidade. O estudo de dosagem, segundo a referida autora, sempre será particular, daí a importância de eleger um método de dosagem que permita estabelecer comparações claras e rigorosas.

Quando se deseja produzir concretos reciclados a partir de traços de concretos convencionais, utilizando como parâmetro de controle das misturas a trabalhabilidade medida pelo abatimento, o aumento da relação a/c das misturas de concreto reciclado leva à redução da resistência à compressão dos mesmos. Como alternativa para minimizar este efeito poderia ser feito o aumento do consumo de cimento das misturas de concreto reciclado, tentando deixá-lo mais próximo do consumo de cimento do concreto de referência. Todavia, não se sabe ao certo qual seria o efeito do aumento tanto do consumo de água quanto de cimento sobre o abatimento dos concretos. Adicionalmente, a adoção deste procedimento poderia tornar a utilização do material reciclado inviável, pelo possível aumento do custo dos concretos, em virtude do aumento do consumo de cimento. (LEITE, 2001)

Além disso, pode-se afirmar que as reduções na resistência à compressão dos concretos reciclados apontadas pela bibliografia não se deve somente ao uso do agregado reciclado, mas também aos procedimentos de dosagem até agora utilizados para produção de concretos. O simples aumento da quantidade de água das misturas para tornar o abatimento do concreto reciclado igual à do concreto de referência pode ser um importante fator de redução das resistências. (LEITE, 2001)

Existem poucos pesquisadores que recomendam métodos de dosagem adequados para misturas com agregado reciclado (AR). Eles raramente descrevem e analisam a adequação de um método individual de dosagem para o AR de forma específica. Na verdade, a maioria deles simplesmente mostra as proporções da misturas de concreto no programa experimental. Entretanto, alguns pesquisadores recomendam que ajustes como a diminuição da relação a/c permite ao AR atingir maior resistência quando dosado por método convencional, como no concreto de referência (KWAN *et al.*, 2012).

Um ponto a ressaltar é a importância de estudos de dosagem específicos para concretos com agregados reciclados, que possa controlar parâmetros inerentes a estes tipos de agregados, garantindo uma maior qualidade das misturas elaboradas. Isso favorecerá uma maior utilização desse tipo de concreto, de caráter sustentável, dando uma outra possibilidade de destinação aos resíduos Classe A da construção civil.

Segundo Sagoe-Crentsil & Taylor (2001), as operações de reciclagem têm a vantagem de reduzir a destinação dos resíduos em aterros, enquanto conserva os recursos primários e reduz os custos de Transporte.

Com isso, há razões de ordem ambiental, econômica e técnica que justificam essa pesquisa, tais como:

- Dar uma destinação adequada aos resíduos de construção e demolição, reinserido-os na cadeia produtiva da Construção civil, o que reduzirá o volume de entulho que irá para aterros;
- A partir da reutilização e reciclagem dos resíduos na própria cadeia da construção civil, haverá menos gastos com transporte e áreas licenciadas para dispor corretamente os resíduos;
- O estudo da influência dos diferentes tipos de dosagem de concretos com agregado miúdo reciclado no comportamento do concreto no estado fresco e endurecido, avaliando as propriedades mecânicas e de absorção dos mesmos, possibilitará uma utilização mais segura e correta para os devidos fins de aplicação dos concretos reciclados.
- A análise do teor de água combinada nas argamassas com AMR ajudará a compreender o mecanismo de migração da água do agregado reciclado para a pasta, auxiliando no entendimento da relação água/cimento efetiva.

Diante do exposto, o presente trabalho justifica-se por estudar métodos de dosagem de concretos com agregados miúdos reciclados e a influência das diferentes metodologias de dosagens no comportamento mecânico, na absorção e na microestrutura desses concretos.

1.2 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar aspectos da dosagem de concretos com a utilização de areia reciclada de resíduo de construção e demolição em substituição parcial à areia natural.

Para atingir o objetivo geral, este trabalho foi dividido em duas etapas, sendo a primeira sobre os objetivos específicos do estudo com as argamassas e a segunda em relação aos concretos.

Os objetivos específicos da Etapa 1 são:

- Avaliar as misturas de argamassas para entender o funcionamento da matriz do concreto;
- Avaliar o comportamento das argamassas recicladas no estado fresco a partir dos ensaios de reologia e mesa de consistência, para os diferentes teores de substituição;
- Avaliar as argamassas com agregado reciclado no estado endurecido a partir dos ensaios de Resistência à compressão axial e Absorção por imersão;
- Avaliar o teor de água combinada da matriz de argamassa no estado endurecido, contendo RCD, a partir de análise termogravimétrica, a fim de entender o mecanismo de migração da água quando o resíduo é adicionado.

Os objetivos específicos da Etapa 2 são:

- Analisar comparativamente métodos de dosagem de concretos convencionais e métodos de dosagem de concreto de alto desempenho em relação às diferentes práticas de dosagem para concretos reciclados;
- Avaliar o comportamento das misturas de concreto reciclado no estado fresco, para os diferentes teores de substituição, a partir do ensaio de abatimento do tronco de cone e de ensaios reológicos para as argamassas;
- Avaliar o comportamento das misturas de concreto reciclado no estado endurecido, para os diferentes teores de substituição, a partir dos ensaios de resistência à compressão simples aos 3, 7, 28 e 63 dias, resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias, ensaio de absorção por imersão aos 28 dias e ensaio de Ultrassom aos 63 dias.

1.3 Hipótese

Neste trabalho têm-se algumas hipóteses a serem testadas:

- É possível estabelecer uma proximidade da relação água/cimento efetiva real da matriz de argamassa através da análise da variação de água combinada das misturas com incorporação de agregado reciclado;

- Os diferentes métodos de dosagem contendo RCD levam em conta diferentes parâmetros e, portanto as propriedades dos concretos nos estados fresco e endurecido serão diferentes para cada método;
- As propriedades do concreto são influenciadas quando se utilizam procedimentos de dosagens diferentes em relação ao agregado reciclado, como a compensação de parte de água de absorção dos mesmos ou a não compensação.
- A fração miúda do agregado reciclado pode favorecer o aumento da resistência mecânica por apresentar atividade pozolânica.

1.4 Delimitação e Estrutura do Trabalho

Existem vários métodos de dosagem, para realizar este trabalho, foram definidos apenas quatro métodos, sendo dois para confecção de concreto convencional (ACI/ABCP e IPT/EPUSP) e dois métodos para concreto de alto desempenho (Aitcin e Mehta/Aitcin). Neste estudo foi utilizado apenas um tipo de resíduo de construção e demolição (RCD), Classe A, que foi coletado num canteiro de obra da cidade de Salvador/BA, e que possuía um programa de gestão de resíduo da construção civil.

Este trabalho está organizado em oito capítulos, sendo o primeiro uma introdução ao assunto de pesquisa; os capítulos dois, três e quatro, apresentam uma revisão de literatura sobre gestão e reciclagem do RCD; tecnologia de reciclagem, e dosagem de materiais cimentícios, respectivamente. O capítulo cinco apresenta o programa experimental traçado para a realização deste trabalho. No capítulo seis são apresentados os resultados e discussões acerca dos ensaios realizados para argamassas (Etapa 1) e concretos (Etapa 2). O capítulo sete contempla as considerações finais, que estão divididas em conclusão, contribuições à dosagem de concretos contendo AMR, e sugestões para trabalhos futuros. As referências bibliográficas citadas no decorrer desse trabalho são apresentadas no oitavo capítulo desta dissertação.

2 GESTÃO E RECICLAGEM DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

A indústria da construção civil gera uma grande quantidade de resíduos, ocasionando uma série de impactos ambientais. O resíduo gerado é muito heterogêneo, pois depende da fonte geradora – construção ou reforma/demolição, fase da obra, tecnologia construtiva, natureza da obra etc. Devido ao grande volume de resíduo, é necessário que exista um gerenciamento do mesmo, fazendo a segregação na fonte e destinando adequadamente.

Segundo Daltro Filho *et al.* (2005), os resíduos gerados pela cadeia produtiva da construção civil constituem um dos maiores problemas para a administração pública, visto que seu gerenciamento adequado acarreta custos elevados. O modo cartesiano industrial tem gerado toneladas de resíduos descartados sem mecanismos de comando e controle de processos, causando impactos de ordem estética, ambiental, econômica e social.

Carneiro *et al.* (2001) cita alguns fatores que contribuem para a geração do entulho, como a definição e detalhamento insuficientes em projetos de arquitetura, estrutura, formas, instalações, entre outros; a qualidade inferior dos materiais e componentes de construção disponíveis no mercado; a falta de qualificação da mão-de-obra; a ausência de procedimentos operacionais e mecanismos de controle de execução e inspeção.

Sob o ponto de vista ambiental, os resíduos se inserem num determinado nível de classificação. De acordo com NBR 10004 (ABNT, 2004), que trata da classificação dos resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais e à saúde pública, os resíduos de construção e demolição podem ser classificados na classe II-B, como resíduos não perigosos e inertes, ou seja, estes resíduos não reagem quimicamente mesmo contendo elementos minerais.

A principal ação efetivada com o intuito de disciplinar as ações necessárias para minimizar os impactos ambientais foi a Resolução nº 307 do CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente, publicada em 17 de julho de 2002 no Diário Oficial da União (DOU). O objetivo da Resolução é estabelecer diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos de construção civil (RCC), entrando em vigor em 2 de janeiro de 2003.

A Resolução nº 307 do CONAMA (2002) define os RCC como sendo os 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 em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados,

forros, argamassas, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica, etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha.

A referida Resolução estabelece as obrigações dos municípios e dos grandes geradores. Os primeiros devem elaborar um Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil, os segundos devem elaborar o Projeto de Gerenciamento dos Resíduos da Construção Civil para cada empreendimento. Ela classifica ainda os resíduos em quatro classes, sendo A, B, C e D. Os resíduos da classe A constituem o foco desse trabalho, podendo ser reaproveitados como agregados na própria cadeia da construção civil. Segue abaixo a classificação dos RCC de acordo com a Resolução.

- **Resíduos Classe A** – reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: o de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; o de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimentos etc.), argamassa e concreto; o de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras.
- **Resíduos Classe B** – recicláveis para outras destinações: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros.
- **Resíduos Classe C** – não permitem a reciclagem. São os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tal como o gesso.
- **Resíduos Classe D** – perigosos oriundos do processo de construção: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros. Também foram incluídas nesta classe as telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde por complementação da Resolução 307/2002 pela Resolução 348/2004 do CONAMA.

Em 24 de maio de 2011, o CONAMA publicou a resolução nº 431 de 24 de maio de 2011, que altera o art. 3º da Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, estabelecendo nova classificação para o gesso. De acordo com esta nova Resolução, o resíduo de gesso passa a pertencer à Classe B e, não mais à Classe C. Portanto, os resíduos Classe B são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e gesso; e os pertencentes à Classe C são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação.

A criação e manutenção de parâmetros e procedimentos em obra para a gestão diferenciada dos resíduos são fundamentais para assegurar o descarte adequado. Estas ações, quando executadas amplamente por empresas do setor, promovem a minimização substancial dos impactos ambientais que a disposição inadequada dos resíduos gera e contribuem para evitar a necessidade de soluções emergenciais (LÔRDELO *et al.*, 2007).

2.1 Gestão do RCD no Brasil

No Brasil, é incipiente a quantidade de empresas de construção civil que fazem a gestão de resíduos em canteiro de obra e desenvolvem ações planejadas para redução da geração de resíduos. A segregação, acondicionamento e disposição final qualificada dos resíduos ainda não são realizados de forma adequada e integrada às atividades produtivas do canteiro de obra. A Gestão Corretiva é a situação típica da maioria dos municípios brasileiros, com ações de caráter não preventivo, repetitivo, custoso e, principalmente, ineficiente (LÔRDELO *et al.*, 2007).

A reciclagem dos resíduos de construção teve início efetivo no país em 1991, em Belo Horizonte, e hoje já existem algumas áreas de tratamento e reciclagem deste material espalhadas em alguns estados do Brasil.

Entre 1999 e 2005, ante os benefícios econômicos e ambientais obtidos pela Prefeitura de Belo Horizonte, algumas prefeituras do Estado de São Paulo, como Piracicaba, Santo André e Campinas, também implantaram planos de gerenciamento de RCD (MIRANDA *et al.*, 2009)

Os resíduos da construção civil em Belo Horizonte representam em média aproximadamente 34% dos resíduos destinados diariamente para os equipamentos públicos.

Atualmente, existem três unidades em funcionamento: Usina do Estoril, Usina da Pampulha e Usina BR 040 (SINDUSCON - MG, 2008)

Em Belo Horizonte, a Prefeitura usa na pavimentação desde 1994 os agregados reciclados produzidos em suas usinas. Em 2005, a Prefeitura de São Bernardo do Campo consumiu cerca de 4.800 m³ de agregado reciclado do tipo bica corrida para a manutenção de ruas não pavimentadas. Para o mesmo tipo de uso e na mesma época, a Prefeitura de Mauá consumiu cerca de 4.000 m³. Ambas as obras foram realizadas com êxito. Ainda em 2005, a sub-base do Campus Zona Leste da USP, em São Paulo, foi realizada com agregados reciclados (MIRANDA *et al*, 2009)

Em São Paulo existe um bom número de EcoPontos, ou seja, instalações públicas para o recebimento de pequenos volumes de resíduo de construção civil (RCC), uma área de reciclagem pública, diversas áreas de transbordo e triagem (ATT's) e áreas de reciclagem privadas e aterros. O maior município do país dispõe da Portaria 6787/2005 que institui a LETP – Licença Especial à Título Precário, que tem por objetivo dar agilidade ao processo de licenciamento de ATT's privadas, pela sua importância na gestão dos RCC no município. A utilização de agregados reciclados em obras públicas é ainda permitida e incentivada em São Paulo (BRASIL, 2005).

Diversos municípios do estado de São Paulo apresentam legislação própria, programas específicos e infraestrutura que favorecem a prática da reciclagem dos RCC, como por exemplo, Diadema, Guarulhos, São Bernardo do Campo e São José do Rio Preto. (BRASIL, 2005).

Segundo Miranda *et al*. (2009) apesar da quantidade de usinas ter aumentado significativamente após a resolução CONAMA 307 (2002), a capacidade brasileira potencial de produção de agregados reciclados está muito abaixo da geração de RCD em todo o país. Se for considerado que todas as usinas brasileiras em operação ou em fase de instalação estão reciclando RCD em sua capacidade nominal, teríamos a estimativa de que somente 3,6% do RCD produzido no país estaria sendo reciclado. Isso mostra que ainda é necessário instalar muitas usinas para que a reciclagem no país se torne expressiva.

A partir de 2004, se observa que os municípios brasileiros outorgaram legislações sobre gerenciamento de resíduos de construção civil em seus territórios. Dentre as cidades analisadas por Melo (2011), esta autora observou que existe divergência quanto a caracterização do pequeno e do grande gerador de RCC, quanto ao tratamento dispensado ao gerador e, por fim, não se constatou princípios inibidores para as atividades de geração do

RCC. A Tabela 1, extraída do trabalho de Melo (2011), mostra alguns municípios e as respectivas legislações analisadas.

Tabela 1 – Municípios brasileiros *versus* Legislação sobre RCC.

Cidade	Fonte
Curitiba/PR	Lei 11.682 de 6 de abril de 2006
Diadema/SP	Lei 2336 de 22 de junho de 2004
Guarulhos/SP	Lei 6.126 de 27 de abril de 2006
João Pessoa/PB	Lei 11.176 de 10 de outubro de 2007
Joinville/SC	Lei 5.159 de 24 de dezembro de 2005
São Bernardo do Campo/SP	Lei 5.602 de 19 de outubro de 2006
São José do Rio Preto/SP	Lei 9.393 de 20 de dezembro de 2004
São Luís/MA	Lei 4.653 de 21 de agosto de 2006
São Paulo/SP	Lei 14.803 de 26 de junho de 2008

Fonte: Adaptado de Melo (2011).

No Brasil, a Gestão de Resíduos da Construção Civil (GRCC) teve início em municípios, de maneira isolada, nas regiões Sudeste e Nordeste, destacando-se inicialmente Belo Horizonte e Salvador. A partir de 2002, com a resolução CONAMA nº 307/2002, houve crescimento das legislações municipais. Contudo, elas não apresentam parâmetro comum em relação à geração, desfavorecendo o beneficiamento em usinas de reciclagem de RCC. Os municípios brasileiros também necessitam de metodologia adequada que possibilite determinar a geração de RCC a beneficiar de modo que se favoreça a atividade industrial da reciclagem (MELO, 2011).

Ainda segundo Melo (2011), as alternativas de GRCC que não valorizam o aproveitamento mais nobre das frações dos RCC podem ser percebidas como ineficientes e insuficientes, pois privilegiam a redução dos volumes sem observar a natureza da matéria prima e as possibilidades de seu emprego como agregado reciclado.

2.1.1 Normalização

Além das políticas públicas praticadas pelos municípios, foram elaboradas normas técnicas para regulamentação do manejo dos resíduos sólidos de construção, assim como para a utilização dos agregados reciclados.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) desenvolveu cinco normas brasileiras relacionadas ao tema Gestão de Resíduos:

- NBR 15.112:2004 - Resíduos da Construção Civil e Resíduos Volumosos – Áreas de Transbordo e Triagem – Diretrizes para Projeto, Implantação e Operação.
- NBR 15.113:2004 - Resíduos Sólidos da Construção Civil e Resíduos Inertes – Aterros – Diretrizes para Projeto, Implantação e Operação.
- NBR 15.114:2004 - Resíduos Sólidos da Construção Civil – Áreas de Reciclagem – Diretrizes para Projeto, Implantação e Operação.
- NBR 15.115:2004 - Agregados Reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil – Execução de Camadas de Pavimentação – Procedimentos.
- NBR 15.116:2004 - Agregados Reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil – Utilização em Pavimentação e Preparo de Concreto sem Função Estrutural – Requisitos.

É interessante ressaltar que, das cinco normas citadas acima, três são de gestão de resíduos e apenas duas são de aplicação. As normas de aplicação são restritas aos agregados reciclados para execução de camadas de pavimentação (“Procedimentos e utilização de agregados em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – requisitos”). Ou seja, a única norma brasileira que se tem hoje sobre concreto com agregados reciclados versa somente sobre os requisitos que eles devem atender e se restringe a concretos sem função estrutural. Isso mostra que ainda se tem muito a avançar no País acerca do estudo de concretos com agregados reciclados.

Segundo Melo (2011), a ausência de normatização para agregados reciclados em concretos estruturais pode estar ratificando a produção das usinas com reduzido controle de qualidade para assegurar as características necessárias ao produto como material de construção que substitua os agregados naturais.

Melo (2011), a partir da análise da NBR nº 15.114/2004, concluiu que esta norma não contempla requisitos de controle e qualidade da produção que reduzam a variabilidade do RCC, ao tempo em que favorecem a produção de agregado reciclado destinado a pavimentação em decorrência da menor solicitação de requisitos técnicos para uso.

Com relação ao conjunto das normas NBR nº 15.112 a 15.116, referentes ao uso do RCC, Melo (2011) sugere que sejam considerados os pontos a seguir, visando ao redirecionamento do processo de reuso e reciclagem do RCC que conduzam a maior empregabilidade:

- a) que os solos e escavações devem ser resíduos destacados dentre os demais que compõem os RCC da classe A, destinando-se a tratamentos que não o beneficiamento em usinas de reciclagem de RCC;
- b) que as ATTs devam ser reordenadas para se destinarem isoladamente aos RCC de maneira a permitir o acesso e armazenagem, bem como a garantia da pureza mineral, a identificação do gerador e dos volumes gerados;
- c) os aterros de inertes devem monitorar a gravimetria dos RCC neles dispostos como forma de controle, sendo preferencialmente destinados a solos e escavações.

Segundo Melo (2011), é recomendável a publicação de normas que fixem diretrizes para operação de usinas de reciclagem de RCC móveis, bem como o emprego do agregado reciclado na indústria de materiais de construção e seus requisitos técnicos para uso na construção civil.

No que diz respeito aos aspectos sociais, as diretrizes brasileiras devem ser suficientes para onerar os setores que deixem de praticar princípios da não geração, reuso e reciclagem. Entretanto, pagar para dispor pode favorecer comportamentos agressivos que utilizam o poder econômico como suporte para as práticas não sustentáveis, ao mesmo tempo em que não garantem o consumo do agregado reciclado, menos ainda sua substituição aos recursos naturais (MELO, 2011).

2.1.2 Gestão do RCD na Região Metropolitana de Salvador (RMS)

Foi realizado em 1996 pelo Projeto Entulho Bom, na cidade de Salvador, um estudo para identificar pontos clandestinos de descarga de entulho, com o intuito de melhorar o sistema de coleta. O levantamento identificou 420 pontos clandestinos de deposição de entulho. Diante disso, a LIMPURB (Empresa de Limpeza Urbana do Salvador) elaborou e vem tentando implantar, desde 1997, o Projeto Gestão Diferenciada de Entulho de Salvador, com base no modelo de Gestão Diferenciada do Entulho, proposto por PINTO (1999).

O Projeto de Gestão Diferenciada de Entulho na Cidade de Salvador tem como objetivo transformar o descarte clandestino de entulho em deposição correta, através da adoção de uma política ordenadora, que busque a remediação da degradação ambiental gerada, a integração dos agentes envolvidos com a questão, como também a redução máxima da geração desse tipo de resíduos, seu reaproveitamento e reciclagem. O modelo escolhido

baseia-se na descentralização do recebimento, do tratamento e do destino final do entulho (Carneiro *et al*, 2001).

O projeto contempla a instalação de cinco BDEs – Bases de Descarga de Entulho – são grandes áreas que recebem, reutilizam, reciclam ou destinam adequadamente o entulho proveniente de grandes geradores, com volumes maiores que 2 m³, e vinte e dois PDEs – Postos de Descarga de Entulho – que recebem, reutilizam ou transferem entulho oriundo de pequenos geradores, com um limite de recepção diária de 2 m³ por transportador. Os resíduos depositados nos PDEs são de responsabilidade da prefeitura, ou seja, o município deve se encarregar do seu transporte e destinação final.

O Decreto nº 12.066/98 deu o suporte legal do programa, onde disciplinou o procedimento para acondicionamento dos resíduos sólidos. O Decreto nº 12.133/98, também contribuiu, pois dispõe sobre manejo, acondicionamento, coleta, transporte, tratamento e destino final dos RCC no âmbito do Município de Salvador, ambos permitidos pelo regulamento de limpeza urbana do município, através do Decreto nº 7.700/86 (MELO, 2011).

Conforme o Decreto Municipal 12.133/98, o descarte de resíduos acima de dois metros cúbicos é de responsabilidade do gerador e deve ser descartado no aterro da BR-324 - Revita, uma vez que o de Canabrava teve a capacidade reduzida e, atualmente, só recebe material coletado pela LIMPURB.

A coleta diferenciada e integrada dos resíduos sólidos gerados em Salvador, realizada pelo Poder Público Municipal, apresentou no ano de 2011, uma média diária de 5.302 t/dia, correspondendo: 54,31% resíduos sólidos urbanos, 44,08% resíduos da construção e demolição (RCDs), 1,61% resíduos sólidos vegetais (RSVs), aqueles provenientes das podas das árvores e de feiras livres, e (0,002%) animais mortos recolhidos em vias e logradouros públicos, caracterizados como resíduos de serviços de saúde (RSSs) (LIMPURB, 2011).

Na Figura 1, são apresentados os dados da coleta regular e diferenciada de resíduos sólidos realizada pelo Poder Público Municipal, nos últimos três anos, através de veículos e equipamentos, nas principais avenidas do município, sendo elas: Suburbana, Paralela, Magalhães Neto, Antonio Carlos Magalhães, Juracy Magalhães, Luis Eduardo Magalhães, Manoel Dias e Octavio Mangabeira. São roteiros pré-determinados, distribuídos em turnos diurnos e noturnos, com frequência diária e alternada (LIMPURB, 2011).

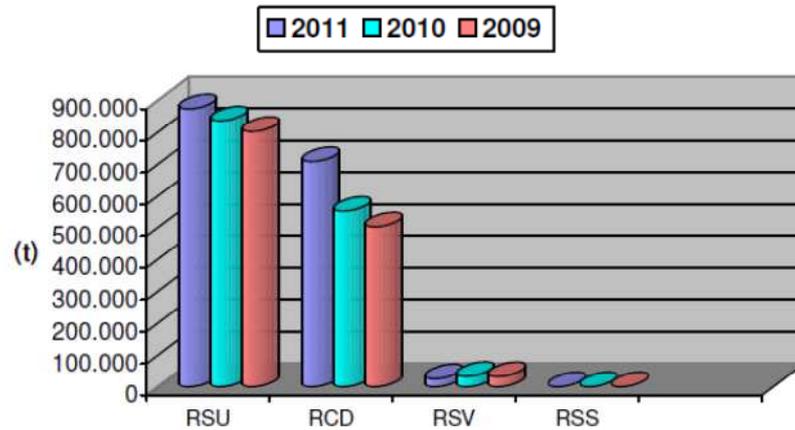


Figura 1 – Comparativo de Resíduos Sólidos por tipo – 2009 a 2011.
Fonte: SCC/GEFIN/DIRAF/LIMPURB – Relatório de Gestão (2011).

Onde: RSU são os resíduos sólidos urbanos; RCD são resíduos de construção e demolição; RSV são resíduos sólidos vegetais e RSS são resíduos de serviços de saúde.

A geração total de resíduos sólidos coletados pelo poder público municipal de Salvador em 2011, foi 1.606.626 toneladas. Este quantitativo teve como disposição final o Aterro Sanitário Metropolitano Centro, que recebeu 1.025.275 toneladas, e o Parque Socioambiental de Canabrava, que recebeu 686.519 toneladas. O Aterro de Canabrava tem uma base de descarga de entulho, onde os resíduos da construção civil rejeitados (não utilizados para nivelamento de terrenos, pavimentação etc) são aterrados.

O aterro Solvi, o primeiro aterro da construção civil de Salvador, devidamente licenciado, pertencente ao Grupo Revita, particular, fica na BR-324, no bairro de Águas Claras e recebe cerca de 220 t/dia de RCC, segundo dados colhidos entre os anos de 2009 e 2010 por Melo (2011). O aterro conta com uma área de 148.700,00 m², espaço para triagem e balança, sendo que a capacidade dele é de 2.800.000 m³ de resíduos.

A LIMPURB tem notificado as empresas de construção do município (consideradas grandes geradores) para disporem o RCC no Aterro de inertes privado da empresa REVITA, em funcionamento desde novembro de 2009. A prefeitura pretende que o Aterro Metropolitano receba os resíduos industriais, que o Aterro de Canabrava continue a receber apenas os resíduos de poda e jardinagem e que o RCC seja destinado à REVITA. Entretanto, não há previsão de prazo para implementação da proposta (MELO, 2011).

Apesar das iniciativas públicas locais, como o Projeto de Gestão Diferenciada do Entulho da Empresa de Limpeza Urbana de Salvador (LIMPURB) e a Resolução nº 307 do CONAMA (2002), específica para o setor da construção civil, ainda é muito pequena a quantidade de empresas de construção civil da capital baiana que realizam a gestão eficiente dos resíduos em seus canteiros. (EVANGELISTA, 2010).

A cidade de Salvador não evoluiu de 1997, com a criação do Plano de Gestão Diferenciada, até os dias atuais. O Plano, apesar de bastante promissor e com ideais de dispor corretamente os resíduos, precisa se adequar à Resolução CONAMA 307/02 corrigida pela posterior Resolução CONAMA nº 431 de 24 de maio de 2011, visando atender as parcelas de recicláveis, o gesso, e também os resíduos perigosos. A idéia inicial contava com a criação de 5 bases e 22 postos de descarga e, atualmente, se depara com apenas um posto de descarga funcionando, o do Bairro Itaigara, sendo os demais postos com funcionamento precário ou inexistente. Além disso, conta somente com uma base de descarga de entulho em funcionamento, sendo particular, o aterro da Revita, já que a base de Canabrava está com a sua capacidade esgotada e só recebe resíduos manejados pela LIMPURB. A cidade ainda conta com o projeto da Usina de Reciclagem, elaborado pelo professor Tarcísio de Paula Pinto, mas que ainda não está em execução.

Segundo estudo realizado por Melo (2011), os PDEs estão praticamente desativados e foi constatado que há disposição de RCC nas proximidades das caixas coletoras de resíduo urbano, quadro que desfavorece o aproveitamento mesmo que para aterro em área de inertes. Segundo a referida autora, esse comportamento fez crescer os pontos de disposição irregular na malha urbana.

Ainda de acordo com Melo (2011), a retomada da gestão de resíduos da construção civil pode favorecer o controle das disposições irregulares, entretanto, o acentuado relevo do território e a previsão de localização dos PDEs permitem indicar que existe necessidade de redefinição e ampliação dos serviços de coleta pública gratuita desse resíduo, em particular.

É importante ressaltar a necessidade da implantação de um amplo programa de educação ambiental e de divulgação do manejo correto dos resíduos de construção e demolição, acompanhado de um segundo programa de fiscalização integrada.

2.2 Alternativas para a Reciclagem do RCD

Uma forma para reduzir o montante de resíduos gerados é praticar a reciclagem. Segundo John (2000), a reciclagem é uma das condições para atingir o desenvolvimento sustentável. Sob o ponto de vista da cadeia produtiva da construção civil, a reciclagem de resíduos é uma das formas de redução do seu impacto ambiental, um dos maiores da sociedade.

A concentração das iniciativas públicas para a reciclagem de RCC ainda está localizada nos estados de São Paulo e Minas Gerais. As recentes mudanças nos processos de gestão dos resíduos nos canteiros, a melhoria dos procedimentos de demolição e de especialização no tratamento e reutilização dos RCC vão estabelecendo um novo cenário no sentido de se usar com cautela os recursos, que são finitos, e de não sobrecarregar a natureza com dejetos evitáveis (PINTO, 1999).

Na construção civil, onde o consumo de matéria-prima é altamente impactante na natureza, a reciclagem se insere nesse contexto para a minimização dos impactos ambientais causados pela extração dos recursos naturais não renováveis, uma vez que a construção civil pode reaproveitar grande percentual de materiais de construção que foi descartado (ÂNGULO, ZORDAN e JOHN, 2001).

As primeiras pesquisas científicas feitas no Brasil envolvendo o uso de agregados reciclados de resíduos de construção civil (RCC) foram realizadas por Pinto (1986) em argamassas, Bodi (1997) em pavimentos, Levy (1997) em argamassas e Zordan (1997) em concretos. As primeiras usinas de reciclagem instaladas foram pelas Prefeituras de São Paulo, SP (1991), de Londrina, PR (1993), e de Belo Horizonte, MG (1994) (MIRANDA *et al.*, 2009).

Segundo Levy (1997), os resíduos de construção têm uma composição que depende muito da fonte que o originou e do momento em que foi colhida a amostra. Como o setor de construção desenvolve várias atividades dentro do canteiro de obras, o resíduo gerado também pode ser composto por uma grande gama de materiais.

Zordan (1997), em seus estudos, analisou a variabilidade dos agregados reciclados em algumas propriedades mecânicas do concreto. A variação da composição dos agregados provocou uma diferença entre 13% e 30% na resistência à compressão axial dos concretos com agregados reciclados com relação ao concreto de referência. Para Ângulo *et al.* (2002), as aplicações comerciais dos agregados reciclados somente serão possíveis se houver um controle da variabilidade dos mesmos.

Para John e Agopyan (2000), a possibilidade de reciclagem desses resíduos vai depender da composição do mesmo. Para resíduos de material cerâmico, quase todo seu percentual pode ser reciclado e utilizado em diferentes aplicações. Dos percentuais de concreto e argamassa, assim como rochas naturais, podem ser obtidos agregados para confecção de concretos.

As características dos concretos com reciclado variam mais que as de concretos convencionais, pois além das variações ligadas à relação a/c e ao consumo de aglomerantes,

há ainda as mudanças determinadas por variações na composição e outras características físico-químicas dos resíduos reciclados. Apesar disto pode-se obter concretos com reciclado adequados a diversos serviços de construção, inclusive alguns de responsabilidade estrutural, desde que se tomem cuidados com a produção do agregado e do novo concreto (escolha do resíduo, classificação e separação de contaminantes, controle de qualidade, adoção de procedimentos corretos de aplicação, análise das condições de exposição e outros cuidados) (LIMA, 1999).

Os agregados provenientes do resíduo de construção e demolição podem ser utilizados para fabricação de diversos materiais como concretos, argamassa, blocos, material para pavimentação, regularização de terrenos e obras de infraestrutura em geral. O foco deste trabalho é a utilização de agregados reciclados para fabricação de concretos.

Evangelista (2010) constatou que a reciclagem em canteiros é passível de ser sistematizada, na forma de etapas e procedimentos, e que esta sistematização contribui para a ampliação dos conhecimentos técnicos e sua implantação nos canteiros de obras. Segundo a referida autora, existem benefícios econômicos e ambientais decorrentes da prática da reciclagem em canteiros de obras.

No aspecto ambiental, Evangelista (2010) verificou que um volume significativo de RCC deixou de ser destinado de forma irregular ou de ser enviado para aterro, cerca de 80% deste volume se converteu em agregado reciclado que substituiu a utilização de agregado natural. No aspecto econômico, apesar do investimento realizado e dos gastos diretos para reciclar o resíduo classe A nos canteiros, foi possível constatar a possibilidade de retorno financeiro decorrente da economia realizada com bota fora e aquisição de agregado natural (EVANGELISTA, 2010).

3 TECNOLOGIA DE RECICLAGEM DE RCD

O objetivo prioritário dos grandes geradores, segundo a Resolução CONAMA 307/02, deve ser a não geração de resíduos. Porém, como nem sempre isso é possível, e até mesmo praticável, segue-se a idéia secundária de reduzir, reutilizar, reciclar e destinar. Após ter diminuído o volume total gerado de entulho, uma saída para o grande gerador é reciclar o resíduo e reutilizá-lo, sob a forma de agregados, na própria obra.

Para reciclar o resíduo, é necessário que este seja beneficiado. As etapas do beneficiamento vão desde a coleta e transporte, passando por separação, britagem e peneiramento, até o seu acondicionamento, para posterior utilização.

3.1 Coleta, Transporte e Separação do Resíduo

Com o intuito de transformar o resíduo gerado em agregado para a construção, é necessário, primeiramente, que os resíduos passem pelas etapas iniciais, sendo elas de coleta, transporte e segregação. A amostra que será coletada deve ser representativa do montante de resíduos, transportada de forma adequada e, por fim, separada em suas frações constituintes para se obter a composição gravimétrica do entulho. Os materiais caracterizados como resíduos de construção civil Classe A seguem para a trituração.

Na etapa de segregação, as impurezas de maior dimensão, tais como madeiras, metais, plásticos e papéis, são retiradas manual ou mecanicamente antes da britagem.

Caso a obra apresente um Projeto de Gerenciamento de Resíduos de Construção Civil, obrigatório para os grandes geradores segundo a Resolução CONAMA nº 307, deve-se haver um sistema de coleta seletiva de resíduos no canteiro, bem como uma triagem adequada, acondicionamentos inicial e final, transporte devidamente cadastrado e destinação para área licenciada. O cuidado com as etapas de acondicionamento e transporte evitam a contaminação da fração Classe A, facilitando o processo de reciclagem e evitando retrabalhos.

3.2 Beneficiamento do Resíduo

Os procedimentos e equipamentos utilizados no beneficiamento do resíduo de construção e demolição afetam as principais características do agregado reciclado como:

classificação e composição; teor de impurezas; granulometria; forma e resistência (LIMA, 1999).

De acordo com Leite (2001) os tipos de britadores utilizados merecem atenção especial, pois estes equipamentos são determinantes da maior parte das propriedades dos agregados obtidos.

A procedência dos resíduos de construção destinados à produção de agregados reciclados deve ser considerada fator relevante, uma vez que, dependendo da sua origem, ao passarem por um determinado britador, estes resíduos darão origem a agregados com forma totalmente diferentes entre si. Em determinadas condições podem levar a um consumo de cimento extremamente elevado, tornado inviável técnica e economicamente a produção de concretos de classes com resistências superiores a 30 MPa (LEVY, 2001).

3.2.1 Equipamentos de Britagem

Pode-se definir moagem como um processo de cominuição, no qual o material é fragmentado, ou reduzido de tamanho, entre duas superfícies móveis que não possuem entre si qualquer sujeição mecânica (JADOVSKI, 2005).

A seguir serão descritos alguns equipamentos utilizados para o beneficiamento dos resíduos de construção civil, compreendendo a britagem primária e secundária, a depender das especificações de cada britador.

a) Britadores de Mandíbulas

Também muito utilizados na reciclagem, rompem as partículas por compressão (esmagamento). São geralmente utilizados como britadores primários, pois não reduzem muito as dimensões dos grãos, gerando alta porcentagem de grãos. Em geral o material processado é rebitado (por moinhos de martelos, britadores de mandíbulas de menor porte etc.). (LIMA, 1999). Apresenta as seguintes desvantagens, segundo Lima (1999):

- Geração de alta porcentagem de grãos, não sendo usado como único equipamento de britagem ou em recicladoras em que o material não é rebitado;
- Geração de grãos lamelares, com tendência à baixa qualidade;
- Dificuldade de britagem de peças armadas, peças de madeira com grandes dimensões, pois pode quebrar o eixo do britador;

- Alta emissão de ruído.

Como vantagem, esses britadores apresentam baixo custo de manutenção.

b) Britadores de Impacto

Neste equipamento o resíduo é britado em uma câmara de impacto, pelo choque com martelos maciços fixados a um rotor e pelo choque com placas de impacto fixas. Pode ser utilizado em britagem primária ou secundária, sendo um dos equipamentos mais usados em recicladoras (LIMA, 1999). Apresenta as seguintes vantagens, segundo Lima (1999):

- Robustez, processando peças de concreto armado ou vigas de madeira;
- Alta redução das dimensões das peças britadas, com geração de boa porcentagem de finos, muitas vezes dispensando a rebritagem do material;
- Baixa emissão de ruído.

Ainda segundo o autor, apresenta a desvantagem do alto custo de manutenção, com trocas periódicas de martelos e placas de impacto.

c) Moinhos de Martelo

Equipamento usado como britador secundário, pois produz alta porcentagem de miúdos. Em geral é usado em conjunto com britadores de mandíbulas. O sistema de ruptura dos grãos é semelhante ao do britador de impacto, em que os grãos são rompidos por impacto de martelos e de placas de impacto fixas.

d) Moinhos de Bolas ou de Barras (Tubulares)

Os moinhos tubulares são basicamente cilindros rotativos revestidos internamente com placas de desgaste, dentro dos quais os corpos moedores (bolas ou barras) movem-se livremente, ao realizar o seu trabalho de cominuição sobre o material a moer. Estes corpos moedores são elevados pela rotação do moinho até uma determinada altura, caindo então sobre as placas de revestimento. A ação que motiva a quebra do material é o resultado da combinação da queda dos corpos moedores sobre o revestimento do moinho, do escorregamento dos mesmos corpos sobre esse revestimento e, finalmente, do impacto ou escorregamento dos corpos moedores entre si. A ação de queda, chamada cascata, conforme a rotação do moinho, que é mais lenta durante a partida e mais rápida após a partida,

provocando a quebra do material por impacto, enquanto a ação de escorregamento origina a moagem por atrito (FAÇO, 1985 *apud* JADOVSKI, 2005).

O moinho de bolas é a designação genérica dos moinhos tubulares que usam esferas de aço fundido ou forjado ou ainda ferro fundido como corpos moedores. Especificamente, são chamados moinhos de bolas aqueles que possuem uma só câmara de moagem, e que o comprimento útil da câmara é menor que o dobro do seu diâmetro. Podem ser usados para via úmida ou seca, e preponderantemente são utilizados em circuito fechado. São essencialmente unidades de moagem fina (fornecem material com 80% passante na malha 0,3 mm) e necessitam de alimentação com material inferior a 10 mm. (FAÇO, 1985 *apud* JADOVSKI, 2005).

3.3 Caracterização do Agregado de RCD

Segundo Barra (1996), o agregado reciclado é um material heterogêneo, constituído de fases que apresentam propriedades distintas. Uma característica fundamental do agregado reciclado é a porosidade, que por sua vez determina uma série de outras propriedades como a massa específica, a capacidade de absorção de água, a resistência, a dureza, o módulo de elasticidade e a durabilidade.

3.3.1 Massa Específica e Massa Unitária

Os agregados reciclados apresentam, em sua maioria, massas específicas e unitárias menores que os agregados naturais. Mesmo reciclados de concreto estrutural seguem esta tendência. Isto se explica em parte pelo fato dos resíduos de construção serem compostos de materiais porosos. Isto se reflete nas massas específicas de argamassas e concretos elaborados com o material, que também são menores que as de argamassas e concretos convencionais. (LIMA, 1999)

De acordo com Leite (2001), os resultados de massa específica e de massa unitária encontrados na bibliografia são muito variáveis, mesmo para materiais reciclados com composição muito parecida. A autora explica o fato baseado em dois aspectos. Primeiro, a própria composição do material, o tipo de beneficiamento realizado, a granulometria, entre outros fatores, são capazes de interferir na densidade dos agregados reciclados. Além disso, outro ponto que pode ser considerado muito importante é o método utilizado na determinação

destas propriedades, por exemplo, para a determinação da massa do material no estado saturado superfície seca, necessário para o cálculo da massa específica dos agregados, é preciso secar a amostra superficialmente e este procedimento pode incorrer em variabilidade, devido à alta porosidade do material. Ou ainda, pode ocorrer desagregação do material durante o seu manuseio, ou até durante a sua secagem, devido à menor resistência do material reciclado, principalmente no estado saturado. Deste modo, deve haver muito cuidado durante a execução dos ensaios de caracterização de novos materiais, inclusive devem ser levadas em consideração certas limitações no uso de normas e procedimentos de ensaio.

De acordo com Lima (1999), os agregados reciclados de concreto apresentam massa específica maior que os de alvenaria e a parcela graúda de reciclados de concreto apresenta menor diferença com relação ao agregado convencional que a parcela miúda, devido ao menor teor de argamassa aderida.

O agregado natural é a fase da estrutura do concreto com a maior densidade e, portanto, com o menor índice de vazios e poros. A porosidade de um concreto é influenciada pelas características da matriz de argamassa, que possui vazios capilares que podem ou não estar conectados. Portanto, os agregados reciclados, devido à presença de uma grande quantidade de argamassa aderida, possuem uma absorção de água maior do que um agregado natural (GONÇALVES, 2001).

Segundo Evangelista e Brito (2010) os agregados reciclados têm menor massa específica que os agregados naturais, devido a sua alta porosidade, resultando numa maior absorção de água, como observado pelo resultado dos ensaios de absorção. Os agregados naturais obtiveram 0,8% de absorção, enquanto que os reciclados 13,1%.

Segundo estudos de Gómez-Sóberon (2002), os agregados de concreto reciclados são mais leves que os agregados naturais, com uma média de 14% a menos na massa específica seca e 9% a menos na massa específica na condição saturado superfície seca. Ainda segundo o referido autor, o agregado de concreto reciclado mostra um aumento na densidade, que é diretamente proporcional ao tamanho das partículas. O autor concluiu ainda que as diferenças entre as massas específicas dos agregados nas condições seca e saturado superfície seca são maiores para o agregado reciclado do que para o natural.

A densidade do agregado reciclado é menor do que o agregado natural devido à pasta de cimento que está aderida aos grãos. A densidade do agregado reciclado é geralmente entre 2.100 e 2.400 kg/m³, enquanto que a densidade na condição saturada com superfície seca varia entre 2.300 e 2.500 kg/m³ (BARRA *et al.*, 2006).

Carrijo (2005) separou agregados reciclados de natureza minerais distintas por faixas de densidade. As faixas estipuladas foram $d < 1,9 \text{ g/cm}^3$; $1,9 < d < 2,2 \text{ g/cm}^3$; $2,2 < d < 2,5 \text{ g/cm}^3$ e $d > 2,5 \text{ g/cm}^3$. A referida autora notou que a massa específica dos agregados reciclados variaram de acordo com os intervalos de separação e não em função da natureza mineral do agregado (cinza e vermelho), ou seja, os agregados vermelho e cinza dentro da mesma faixa de densidade tiveram valores de massa específica bem semelhantes. Os agregados de diferentes faixas de densidade apresentaram valores de massa específica significativamente diferentes.

Segundo Barra *et al.*(2006), os principais aspectos que influenciam a densidade do agregado reciclado são o tamanho das partículas: as frações menores apresentam menor densidade, pois apresentam maior quantidade de pasta; a qualidade do concreto original: os concretos de baixa relação a/c podem gerar agregados reciclados de melhor qualidade, e portanto, com maior densidade; e as técnicas de beneficiamento: quando são realizadas sucessivas etapas de trituração do agregado graúdo, elimina-se um maior conteúdo de argamassa, melhorando a qualidade do agregado substancialmente, observando um aumento na densidade, que pode alcançar valores próximos aos do concreto de referência.

Os agregados reciclados possuem uma massa específica menor em comparação aos agregados naturais, interferindo também na massa específica da mistura. No caso dos concretos, até 25% de substituição praticamente não houve variação entre as massas específicas para todas as misturas (PEDROZO, 2008).

3.3.2 Forma e Textura

Segundo Barra (1996) a forma do agregado influencia nas propriedades do concreto, principalmente na trabalhabilidade. Partículas alargadas e lamelares requerem mais pasta de cimento para conseguir misturas trabalháveis e, portanto, aumentam o custo do concreto.

Dependendo do tipo de resíduo de construção processado e dos equipamentos utilizados, o reciclado pode apresentar forma mais lamelar e textura mais áspera que os agregados convencionais. Isto se reflete na qualidade de argamassas e concretos preparados com o material. Devido à forma e textura do reciclado, pode ser necessário maior teor de aglomerantes e de água, para que o compósito seja trabalhável. Isto pode aumentar os custos de produção ou prejudicar a qualidade, devido ao aumento da relação a/c (LIMA, 1999).

Ainda de acordo com Lima (1999), os britadores de impacto geram partículas mais íntegras e de forma mais cúbica que britadores de mandíbulas, que tendem a produzir partículas lamelares e com linhas de fratura pronunciadas.

3.3.3 Absorção

De acordo com Barra (1996) a quantidade de água que o agregado pode absorver depende se o agregado está em contato direto somente com a água, com a água da pasta ou com a água da argamassa. Depende também das suas condições iniciais de umidade e do tempo em que ele permanece em contato com a água.

Segundo Djerbi Tegguer (2012) a quantidade de água absorvida depende principalmente da quantidade e continuidade dos poros na partícula, ao passo que a taxa de absorção depende do tamanho e também da continuidade desses poros; fatores secundários como o tamanho das partículas também podem ter um efeito.

Djerbi Tegguer (2012) define capacidade de absorção como sendo a máxima quantidade de água que o agregado pode absorver em função das circunstâncias. Ainda segundo o referido autor, numa mistura de concreto, se os agregados utilizados não estiverem completamente saturados, parte da água da mistura será absorvida por eles; por outro lado, caso tenha umidade livre na superfície das partículas de agregados, ela se tornará parte da água da mistura, aumentando-a.

Nos agregados naturais normalmente utilizados nas misturas de concreto, a taxa e absorção do material geralmente tem índices muito baixos e sua influência para produção de concretos convencionais não é considerada. Mesmo para os agregados miúdos normalmente utilizados, cujos valores de taxa de absorção variam de 1 a 2,5 %, o efeito da absorção geralmente não é considerado, pois o processo se dá de forma mais lenta devido à baixa porosidade dos materiais comumente utilizados. Entretanto, quando se utiliza agregados mais porosos, como é o caso dos agregados reciclados, cuidados devem ser tomados para minimizar os efeitos de absorção e sua quantificação merece atenção especial (LEITE, 2001).

De acordo com Leite (2001), a absorção de água dos agregados reciclados é muito importante quando se estuda o seu uso em concretos, pois esta taxa interfere diretamente na relação a/c final das misturas. Além disso, se a absorção não for considerada, além da redução da relação a/c, haverá uma diminuição substancial da trabalhabilidade do material, deixando o concreto muito seco.

Segundo Pedrozo (2008), para concretos com agregados porosos, a maior causa da perda de trabalhabilidade é a absorção dos agregados quando adicionados a seco, diminuindo a quantidade de água livre na mistura.

González-Fonteboa *et al.* (2011) constataram que o uso de agregado reciclado que tem maior capacidade de absorção de água que os agregados naturais, tornou os valores de absorção de água obtidos para os concretos reciclados superiores em relação aos convencionais. Além disso, eles observaram que quando aumentava a porcentagem de substituição, maiores eram os valores de absorção de água.

As normas para determinação das taxas de absorção dos agregados naturais miúdos e graúdos são a NBR NM 30 (2001) e a NBR NM 53 (2009), respectivamente. Porém, de acordo com Leite (2001), o uso dessas normas para a determinação da taxa de absorção dos agregados reciclados é dificultado devido à alta porosidade do material, à possibilidade de perda de material por desagregação do agregado graúdo e devido a grande quantidade de finos apresentada pelo agregado miúdo. Deste modo, Leite (2001) desenvolveu um método adequado para a determinação da absorção do agregado reciclado. A absorção do material reciclado é determinada com o auxílio de um recipiente no qual a tampa e o fundo são revestidos com uma malha de 0,044 mm de abertura. A amostra, seca em estufa e resfriada até a temperatura ambiente, deve ser colocada neste recipiente, que será submerso em água. A partir deste instante é monitorado o ganho de massa do material submerso com o auxílio de uma balança dotada de um dispositivo para medida hidrostática da massa com precisão de 0,1 g. Antes de cada leitura o recipiente deve ser agitado cuidadosamente para facilitar a saída do ar presente na amostra. O monitoramento do ganho de massa do material deve ser realizado ao longo de 24 horas (LEITE, 2001).

Reis (2009) utilizou o método de Leite (2001) para determinar a absorção de agregados reciclados, porém com algumas adaptações. No método inicial, a peneira de 0,044 mm que continha o material reciclado era tampada com uma malha de mesma abertura. Já nesta adaptação, Reis utilizou a peneira aberta e a lâmina de água cobrindo a amostra, porém inferior à borda da peneira, para garantir que o material não seria perdido.

Neste procedimento, a amostra é seca em estufa por 24 horas, resfriada a temperatura ambiente e, a seguir, é colocada na peneira e presa no aparato da balança hidrostática. Em seguida a água é gradualmente adicionada com o auxílio de uma mangueira, sem agitação do recipiente até que toda a amostra seja coberta e a lamina d'água fique abaixo da borda da peneira. Em seguida, é monitorado o ganho de massa do agregado submerso, com leituras da massa do conjunto em tempos pré-determinados pelo método proposto por Leite (2001). Após

cada leitura, o material é agitado cuidadosamente com uma espátula, por 1 minuto, para facilitar a saída de ar presente na amostra e deixado em repouso para estabilizar até a próxima leitura.

Reis (2009) avaliou a absorção de agregados miúdos reciclados de RCD e obteve uma taxa de 18,8%, em que a autora classificou como alta devido à elevada porosidade do material. A Figura 2 mostra o gráfico da relação entre a taxa de absorção e o tempo para o agregado miúdo utilizado no trabalho de Reis (2009).

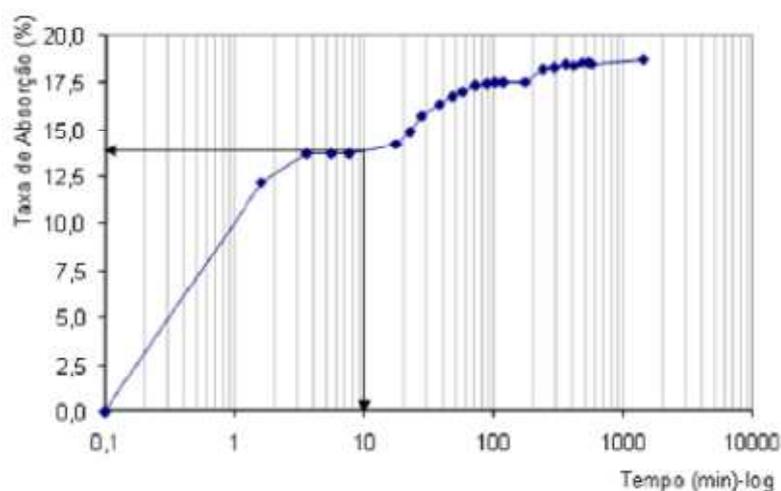


Figura 2 - Relação entre a taxa de absorção e o tempo para o agregado miúdo
Fonte: REIS (2009).

De acordo com a autora, aos 10 minutos de ensaio o agregado já havia absorvido 75% do valor total da taxa de absorção de água em 24 horas, ou seja, 14,1%. Portanto, para que durante a mistura do concreto, o agregado de RCD não absorvesse a água de amassamento, comprometendo a relação a/c e, conseqüentemente, a reologia e propriedades mecânicas do concreto, a autora utilizou uma taxa de compensação de água de 75%, que corresponde a uma taxa de absorção no valor 14,1% da massa de agregado reciclado substituído para produção dos concretos. O tempo de mistura que a autora utilizou foi de aproximadamente 8 minutos.

A Figura 3 mostra a porcentagem absorvida pelo agregado miúdo reciclado do trabalho de Leite (2001). Através da curva apresentada, a autora constatou que o agregado miúdo reciclado absorveu mais de 50% da massa total de água antes dos primeiros 30 minutos. Ela observou, também, que o percentual de absorção não variou muito do intervalo dos 10 para os 30 minutos de ensaio. Com base nestas observações, Leite (2001) estabeleceu que os agregados reciclados teriam suas taxas de absorção compensadas e que o material seria pré-umidecido 10 minutos antes do início da mistura dos materiais na betoneira. Ela adicionou, então, à água total de cada traço de concreto a quantidade de água referente ao

percentual aproximado da absorção do agregado reciclado referente a 10 minutos. Assim, a autora adicionou à água total de cada traço 50% da taxa de absorção média do agregado miúdo reciclado. A taxa de absorção média do agregado miúdo reciclado obtida por Leite (2001) foi de 8,60%.

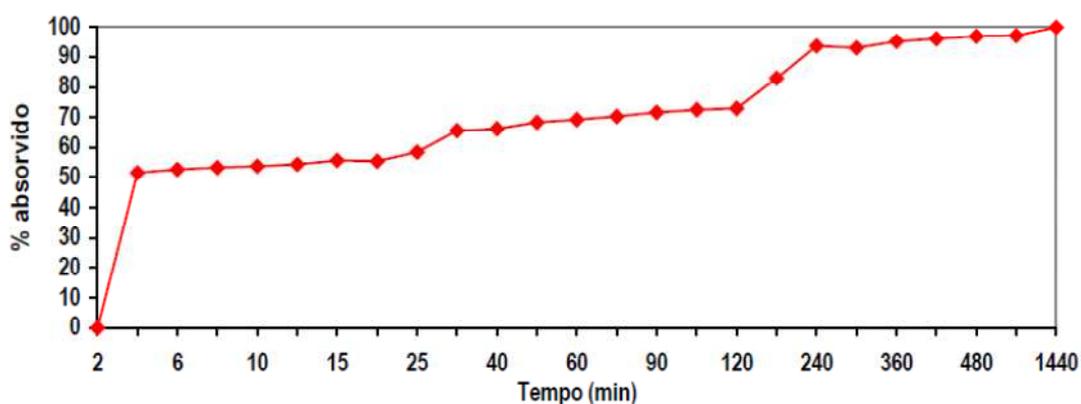


Figura 3 - Relação entre a taxa de absorção e o tempo para o agregado miúdo
Fonte: Leite (2001).

Segundo Vieira (2003), os agregados reciclados, diferentemente dos naturais, têm uma alta taxa de absorção de água. No caso do agregado reciclado graúdo, isso se deve a alta porosidade e, em relação ao miúdo, deve-se ao grande percentual de materiais finos. A autora ressalta que determinar essa taxa é imprescindível, pois ela determina o percentual de água que deverá ser suprido minutos antes de sua utilização nas concretagens para que não ocorram problemas como redução na relação água/cimento, abatimento e moldabilidade do concreto devido à falta de água. Para a execução do ensaio de absorção em agregados reciclados, Vieira (2003) utilizou o procedimento proposto por Leite (2001). A taxa de absorção média para os agregados reciclados miúdos, determinada no trabalho de Vieira, foi de 11,08%. Vieira (2003) também compensou 50% da taxa de absorção dos agregados, tirada a partir da curva de absorção x tempo em 24h e adicionou à água do traço para que não houvesse uma diminuição da relação água/cimento das misturas.

Agrela *et al.* (2011) classificaram os agregados para estabelecer as distinções de qualidade existentes entre os agregados reciclados mistos provenientes das usinas de reciclagem: agregado de concreto reciclado – ACR - (conteúdo cerâmica $\leq 10\%$ e conteúdo concreto $\geq 90\%$); agregado reciclado misto – AR_{mis} - (conteúdo cerâmica entre 0% e 30% e conteúdo concreto entre 70% e 90%) e agregado reciclado de cerâmica – AR_{cer} - (conteúdo cerâmica maior que 30% e conteúdo concreto menor que 70%). Nos grupos ACR e AR_{mis}, os valores médios de absorção foram consideravelmente próximos, entre 3,7% e 7,1% para o

ACR e entre 5,3% e 7,2% para o AR_{mis} . No grupo AR_{cer} , os valores de absorção são muito superiores aos obtidos aos outros dois, que variam de 9,9% a 13,5% e a obtenção de 11,66%, como valor médio. Agrela *et al.* (2011) concluem que um teor elevado de partículas cerâmicas leva a um aumento da absorção e uma diminuição da densidade do agregado reciclado, devido à absorção elevada e baixa densidade do agregado de cerâmica.

A absorção de água e a densidade no estado saturado superfície seca (SSS) são duas propriedades que definem a qualidade do agregado. A alta absorção de AR_{mis} deve ser levada em consideração na mistura do concreto, devido ao fato de parte da água adicionada na mistura preencher os poros acessíveis do agregado reciclado, reduzindo assim a trabalhabilidade do concreto. Este efeito pode ser compensado por meio de um processo de pré-imersão do agregado, caso em que a densidade no estado SSS deve ser levada em conta durante o processo de mistura do concreto (AGRELA *et al.* 2011).

Segundo Agrela *et al.* (2011) , além dos testes em absorção medidos durante um período de 24 horas, nos testes em agregados reciclados para sua aplicação em concreto, é particularmente útil determinar a absorção de água durante um período de 10 minutos, de modo a estimar a quantidade de água absorvida pelo agregado durante a mistura do concreto, quando no estado seco. De acordo com os resultados obtidos, Agrela *et al.* (2011) constataram que a absorção de água em 10 minutos atinge 85% da absorção de 24 horas. Como consequência, o tempo para a determinação poderia ser reduzido para 10 minutos, e um fator de correção de $1/0,85$ poderia ser aplicado a fim de obter a mesma absorção de água do processo de 24 horas.

Djerbi Tegguer (2012) comparou o método normatizado atual europeu para determinar o coeficiente de absorção de agregados com um novo método proposto em que a absorção de água dos agregados é medida por peso hidrostático. O teste normatizado europeu consiste em dois passos principais: saturação dos agregados, seguida de secagem. Primeiro os agregados são imersos em água durante 24h. Em seguida, a água da superfície do agregado precisa ser removida com uma toalha, até que a aparência da superfície esteja úmida a fim de obter a massa dos agregados na condição saturada superfície seca (M_a). Após isso, os agregados são secos em estufa ventilada a uma temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, até que a diferença de massa durante 24h seja inferior a 0,1%, essa é a massa chamada de seca em estufa (M_s). A Equação 1 dará a absorção de água.

$$Abs(\%) = 100 \frac{M_a - M_s}{M_s}$$

Equação 1

Segundo Djerbi Tegguer (2012) os testes realizados mostraram que a secagem da superfície do agregado, a fim de deixá-lo na condição saturado superfície seca (SSS), com toalha apresenta um inconveniente: após a imersão dos agregados reciclados (AR), é difícil eliminar exatamente a água livre em torno dos mesmos, porque eles apresentam uma forma irregular, além da possibilidade desse procedimento acabar separando parte da pasta de cimento e areia da argamassa aderida. A nova metodologia proposta por Djerbi Tegguer (2012) é desenvolvida sem usar o procedimento de secagem com toalha e permite avaliar a variação do coeficiente de absorção de água ao longo do tempo.

A nova metodologia proposta por Djerbi Tegguer para estudar a cinética da absorção de agregados naturais e reciclados foi desenvolvido no laboratório do LCPC. Este teste consiste em observar a taxa de penetração da ascensão capilar dos agregados com o tempo, sendo a absorção de água medida por gravimetria. Ela consiste na medida, por pesagem hidrostática, das variações de massa das amostras imersas em água, com temperatura regulada. As amostras de agregados foram secas em estufa a uma temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, até que a diferença de massa seja inferior a 0,1%. Após a secagem, a amostra é colocada num cesto perfurado de aço inoxidável com altura de 180 mm, diâmetro de 200 mm e abertura de malha de 3 mm, para a pesagem hidrostática. O cesto é pendurado com um fio não-elástico para o equilíbrio, sendo o dispositivo testado inicialmente usando uma massa inerte. Primeiro a massa do sistema é continuamente registrada, sendo o valor registrado a massa da amostra de agregado seco em estufa ao ar “ M_s ” em balança com precisão de 0,01g. Em seguida, o banho termostaticado se move verticalmente usando uma bandeja móvel, a fim de imergir a amostra na água destilada a 20°C . Assumindo que o primeiro valor registrado após a imersão é a massa da amostra de agregados seca em estufa na água “ M_{sa} ” (g). Devido ao efeito capilar, a absorção de água foi calculada pela Equação 2.

$$Abs(\%) = 100 \frac{M_{sat} - M_{sa}}{M_s} \quad \text{Equação 2}$$

Onde: M_{sat} é a massa dos agregados saturados em água (g).

A diferença entre o método normatizado e o proposto é a avaliação da massa de absorção de água pelos agregados. No método da norma europeia, essa massa foi obtida pela diferença entre as massas saturadas superfície seca dos agregados e a seca em estufa ao ar. Enquanto que o novo método propõe obter a massa de absorção de água pelos agregados em água, usando a pesagem hidrostática.

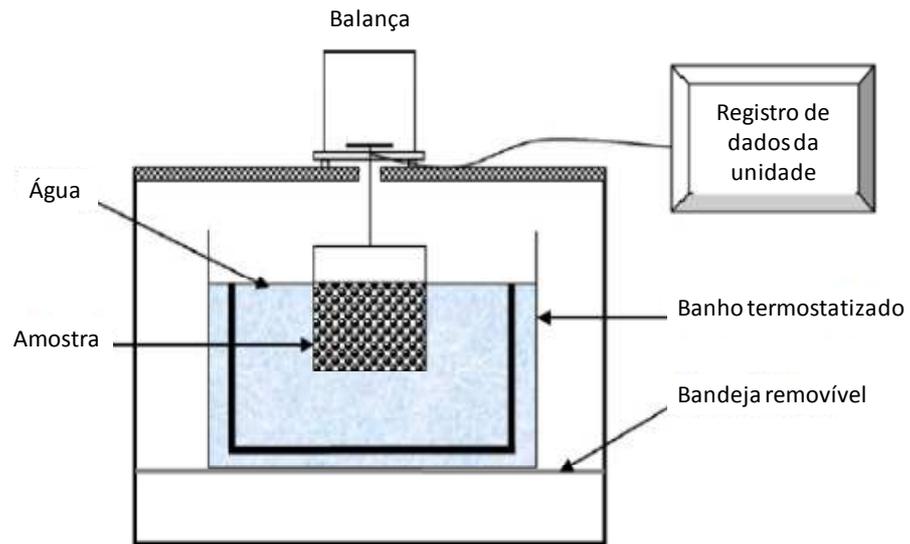


Figura 4 – Determinação da absorção de água utilizando a pesagem hidrostática.
 Fonte: Modificado de Djerbi Tegguer (2012).

A absorção de água do agregado natural diminui com o aumento do tamanho dos agregados. Isso pode ser explicado pelo efeito da britagem dos agregados, que pode aumentar a conexão dos poros, criar fissuras e gerar um aumento do coeficiente de absorção de água. A absorção de água e o tempo do período de saturação dos AR com fração de 5/12 mm são maiores que os da fração de 12/20 mm. Isso é devido a quantidade de argamassa aderida que é maior para frações pequenas em relação às graúdas. A fração menor de 5/12 mm teve 45% de conteúdo de argamassa, enquanto que somente 24% foi obtido para a fração maior de 12/20 mm.

O valor da absorção de água aumentou ao longo do tempo, mas tendeu a se tornar constante depois de certo tempo, antes de 24h de imersão para os agregados naturais (AN), enquanto que 110h e 85h de imersão para AR de 5/12 mm e 12/20 mm, respectivamente. Para a mesma faixa granulométrica, a absorção de água dos AR é maior que a dos NA, porque a presença de argamassa aderida cria maior número de capilares, além de mais longos e, conseqüentemente aumenta a absorção de água.

Dois parâmetros básicos são considerados na absorção de água de materiais porosos: a massa de água necessária para saturar os poros do material e a taxa de penetração da ascensão capilar. Uma vez que o preenchimento dos canais capilares e vazios e o avanço da água ocorrem quase lado a lado durante a absorção, somente pode ser medido por um efeito combinado, que irá conferir um efeito capilar. Djerbi Tegguer (2012) obteve boas correlações utilizando a Equação 3 do modelo de Hall, que fornece a quantidade de água absorvida.

$$Abs(\%) = A + S\sqrt{t} - C \cdot t$$

Equação 3

Onde: S é a sorvidade do material - que caracteriza a tendência de um material poroso absorver e transmitir fluidos por capilaridade. Esta propriedade é maior em AR porque a presença de argamassa aderida cria mais vasos capilares e mais longos, como consequência de sua própria porosidade, aumentando a tensão capilar; t é o tempo; A e C são constantes.

O método proposto por Djerbi Tegguer (2012) é uma nova abordagem para medir a absorção de água de AR e pode ser usado para avaliar a evolução dessa absorção. Os resultados estão de acordo muito estreitamente com a dependência do tempo durante todo o período de absorção e alterações até se tornar constante, ou seja, quando a saturação está completa. O tempo de saturação obtido para os AR foi superior a 24h, por isso Djerbi Tegguer (2012) confirmou que o método padrão de 24h estipulado pela norma europeia não é adequado para medir absorção de água de AR. O coeficiente de absorção de água dos AR para 24h de imersão produz cerca de 60% e 70% da absorção total de água obtidas após 85h e 110h de imersão para as frações de 12,5/20 mm e 5/12 mm, respectivamente. Portanto, a nova abordagem permite determinar a duração do teste e melhora a precisão da avaliação das medidas de absorção de água para agregados. Isso é necessário para saber o valor ótimo da absorção de água para fazer misturas de concreto.

Mas *et al.* (2012) determinaram a água necessária para produzir concretos com agregados reciclados, a fim de manter constante a relação a/c efetiva na pasta de cimento. Para tal, foram realizados testes de absorção em 10 min, 20 min, 30 min, 120 min e 480 min. Os autores notaram que os AR apresentaram uma absorção muito elevada nos primeiros 10 min, em torno de 65% da absorção total.

Segundo Mas *et al.* (2012), vários estudos realizados em concretos contendo AR mostram que esses agregados são caracterizados por uma elevada absorção de água. Os autores afirmam que isso pode causar problemas na mistura, porque os agregados absorverão água, fazendo com que haja diminuição na trabalhabilidade; além da relação a/c na pasta que será menor do que o desejado. Os referidos autores comentam que nas fases experimentais de alguns estudos, os pesquisadores têm resolvido este problema através da pré-saturação dos agregados antes da mistura. Eles citam como referência o trabalho dos autores Etxeberria *et al.* (2007), em que os agregados graúdos utilizados foram umedecidos por um sistema de aspersão um dia antes de serem utilizados e foram cobertos por uma toalha de plástico, a fim de manter sua umidade. Um nível recomendado de umidade pode ser de 80% da capacidade de absorção total, mas os agregados reciclados não devem ser utilizados na forma saturada,

uma vez que provavelmente resultaria em falhas na zona de transição interfacial entre o agregado gráudo reciclado saturado e a nova pasta de cimento (MAS *et al.*, 2012).

Tam *et al.* (2008) compararam o método normatizado britânico para determinar a absorção de agregados com uma nova metodologia utilizando um picnômetro para a determinação da absorção dos agregados reciclados (AR) e também naturais (AN). Além disso, os referidos autores explicam as desvantagens do método normatizado para determinar absorção de agregados reciclados, pois estes apresentam argamassa aderida à sua superfície, o que faz variar o tempo que eles devem ficar imersos até atingir a saturação. No método normatizado, deve-se secar o agregado em estufa a $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ para se obter a massa seca, porém para o AR isto pode acabar removendo a água quimicamente combinada na estrutura cristalizada de compostos da argamassa ligados ao agregado; esta remoção de água combinada dará um valor falso de absorção de água do agregado. Segundo Tam *et al.* (2008), outro problema é a secagem da superfície do agregado com a utilização de um pano, pois com o processo de imersão em água do agregado pode haver desprendimento de parte da pasta de cimento aderida à superfície e que pode ser removida durante a secagem com o pano, reduzindo significativamente a massa seca em estufa do agregado e restringindo a precisão do resultado do teste.

Tam *et al.* (2008) propuseram uma metodologia alternativa que fornece uma maneira de obter a absorção de água em intervalos de tempos diferentes e sem a necessidade de imersão e secagem do agregado reciclado. Nos dois parágrafos, a seguir, será feita uma breve descrição sobre o método proposto pelos referidos autores.

A massa seca em estufa dos agregados de 5 a 40 mm (Massa B) é obtida primeiro colocando-os numa estufa a $75^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, para remover a água livre no agregado, sem perder água cristalizada. A temperatura deve ser mantida durante pelo menos $24 \text{ h} \pm 0,5 \text{ h}$, ou até constância de massa. Depois disso, o agregado é colocado num picnômetro, que é então totalmente preenchido com água destilada. Os níveis de água resultaram de intervalos de tempo T_1 , T_2 , T_3 e T_s e qualquer queda do nível da água deve ser anotado, pois resulta da absorção de água pelo agregado e evaporação observada no ambiente interior. Então, a água adicional é acrescentada ao picnômetro, o conjunto é pesado, e os pesos M_i em T_i são obtidos. A diferença de massa do conjunto entre T_i e T_{i-1} é igual à água absorvida pelo agregado ($M_i - M_{i-1}$). Repetindo este procedimento em diferentes períodos de tempo até que nenhuma mudança de massa ou redução do nível de água seja obtida, indica que o agregado reciclado atingiu uma condição totalmente saturado (T_s). A massa do conjunto em T_s , quando

comparada com T_0 é igual à massa de água do agregado saturado. A absorção de água (em % de massa seca) em T_i pode ser calculada a partir da seguinte equação:

$$Abs(\%) = 100 \cdot \frac{[\sum_{j=1}^i (M_j - M_{j-1})]}{B} \quad \text{Equação 4}$$

Onde: B é a massa seca em estufa (g); T_i é o intervalo de tempo pelo qual o agregado reciclado fica imerso em água; M_i é a massa do picnômetro e agregado com o conjunto cheio de água em T_i , (g).

A absorção de água total (em % de massa seca) do agregado no estado saturado superfície seca em T_s pode ser calculada pela seguinte equação:

$$Abs\ SSS(\%) = 100 \cdot \frac{[(M_s - M_0)]}{B} \quad \text{Equação 5}$$

Onde: M_s é a massa do conjunto cheio de água em T_s ; M_0 é a massa do conjunto em T_0 .

Tam *et al.* (2008) avaliaram quatro amostras de agregados e observaram que os tempos de imersão para atingir a saturação foram diferentes entre eles. Os referidos autores comentam que foram necessárias 96h de imersão para o agregado reciclado da amostra 3 e 120h para os agregados reciclados da amostra 4, para atingir uma leitura estável, enquanto que apenas 24 h de imersão foram necessárias para o agregado natural (amostra 1) e os agregados reciclados da amostra 2. Eles concluem que o padrão de 24 h estipulado pelas normas britânicas não são adequados para avaliar as taxas de absorção do agregado reciclado. Em geral, quanto maior o teor de argamassa no agregado reciclado, maior será o tempo de saturação do mesmo.

Segundo Tam *et al.* (2008), o novo método pode ser usado para medir o tempo necessário para saturar completamente o agregado reciclado sob diferentes condições de superfície. Além disso, os resultados demonstraram que a taxa de absorção de água é maior nas primeiras 5 h, representando 80% da absorção total de água. O método de Tam *et al.* (2008) auxilia os pesquisadores na compreensão do comportamento do agregado reciclado numa mistura de concreto.

3.3.4 Composição Granulométrica

A distribuição granulométrica é importante na determinação de características de argamassas e concretos, influenciando na trabalhabilidade, na resistência mecânica, no consumo de aglomerantes, na absorção de água, na permeabilidade etc. A granulometria dos reciclados varia conforme o tipo de resíduo processado, os equipamentos utilizados, a granulometria do resíduo antes de ser processado e outros fatores. Assim, a curva granulométrica é característica específica de cada tipo particular de resíduo reciclado. (LIMA, 1999)

De acordo com Barra (1996) a distribuição granulométrica dos agregados é um fator que condiciona a trabalhabilidade do concreto fresco e a sua determinação se faz necessária para o estudo da dosagem. A granulometria do agregado é uma característica que depende do processo de produção.

O tamanho da partícula de agregados reciclados varia de acordo com o processo de moagem realizado, e pode ser alterado mexendo-se na abertura do triturador. Trituradores de impacto promovem maior redução no tamanho das partículas e produzem maior quantidade de finos, seguido por trituradores de cone e de mandíbulas (BARRA *et al.*, 2006).

Os agregados reciclados, tanto miúdo quanto graúdo, tendem a uma composição granulométrica um pouco mais grossa que os agregados naturais, resultando em um módulo de finura um pouco maior.

3.4 Influência das características dos agregados reciclados nas propriedades do concreto

3.4.1 Concreto no estado fresco

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), a trabalhabilidade dos concretos está relacionada com a facilidade de mobilidade e com a resistência à segregação ou à exsudação. Estas características vão depender de vários fatores, como consumo de água, consumo de cimento, aditivos e das características dos agregados. Agregados muito angulosos ou com muitos finos necessitam de mais água para atingir uma dada consistência.

Segundo Leite (2001), os agregados reciclados influenciam muito a trabalhabilidade dos concretos, devido a sua alta absorção de água, e a sua forma mais heterogênea e textura mais rugosa, características que acabam causando redução da água livre e maior travamento

nas misturas de concreto no estado fresco. No trabalho desenvolvido por esta autora, optou-se por não considerar o abatimento do tronco de cone como um parâmetro fixo durante a produção dos concretos. A referida autora compensou parte da água de absorção do agregado para minimizar o efeito deste fenômeno, característico do material reciclado, sobre a trabalhabilidade dos concretos, evitando que as misturas ficassem muito secas e que houvesse dificuldades com a moldagem e acabamento da superfície dos concretos.

Devido à elevada absorção que apresenta o agregado reciclado, durante o processo de mistura uma certa quantidade de água será retida pelos agregados, gerando um aumento de consistência em ocasiões importantes e uma redução da relação água/cimento efetiva (BARRA, 1996).

Leite (2001) observou que os resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone apresentaram alta variabilidade, seja para os concretos de referência, seja para os concretos reciclados. Além disso, a referida autora notou que, mesmo apresentando valores de abatimento muito baixos, uma vez que as misturas não possuíssem altos teores de substituição de ambas as frações de agregados reciclados, os concretos produzidos eram perfeitamente adensáveis, ou seja, ela concluiu que seria interessante introduzir, na medida da trabalhabilidade, um componente dinâmico. Por outro lado, a perda de trabalhabilidade dos concretos reciclados se apresenta ainda como uma incógnita, uma vez que as investigações realizadas demonstram que cada fração de agregado se comporta de maneira distinta nas misturas de concreto. Desta forma, com o intuito de aumentar o conhecimento no âmbito da trabalhabilidade dos concretos reciclados, Leite (2001) optou por realizar um estudo exploratório da trabalhabilidade e da perda de trabalhabilidade de alguns traços de concreto com e sem agregados reciclados, utilizando-se para medir esta propriedade o ensaio do abatimento do tronco de cone e o ensaio VeBe.

O ensaio de abatimento do tronco de cone pode indicar indiretamente a trabalhabilidade dos concretos convencionais de consistência plástica. Este ensaio é considerado como uma medida prática da consistência do concreto, permitindo que se controle a uniformidade do material. No entanto, como esse ensaio tem a gravidade como única força atuante sobre o material, a variação da massa específica dos agregados faz com que sua medida seja alterada. Portanto, é um ensaio que possui limitações, apesar de ser o método mais largamente utilizado devido a sua praticidade. Estudos reológicos devem ser realizados para um melhor entendimento do papel do agregado reciclado na trabalhabilidade do concreto (MOREIRA, 2010).

Para simular o comportamento reológico do concreto no estado fresco, considerado como uma mistura granular suspensa em água, é definido um volume mínimo de água como o volume necessário para preencher os vazios da mistura granular sólida no estado seco. Quando estes vazios são preenchidos pela água, o empacotamento do material é dito denso e praticamente não tem trabalhabilidade (Figura 6a). À medida que a quantidade de água é incrementada, gera-se um afastamento entre os grãos, o que permite o deslizamento entre os mesmos (Figura 6b). Ao se aplicar uma tensão de cisalhamento sobre o concreto, uma deformação irá ocorrer superando as forças de fricção e de coesão entre os grãos (Figura 5). Assim, o concreto passa a ter trabalhabilidade, que é dependente de um pequeno afastamento entre os grãos (FORMAGINI, 2005).

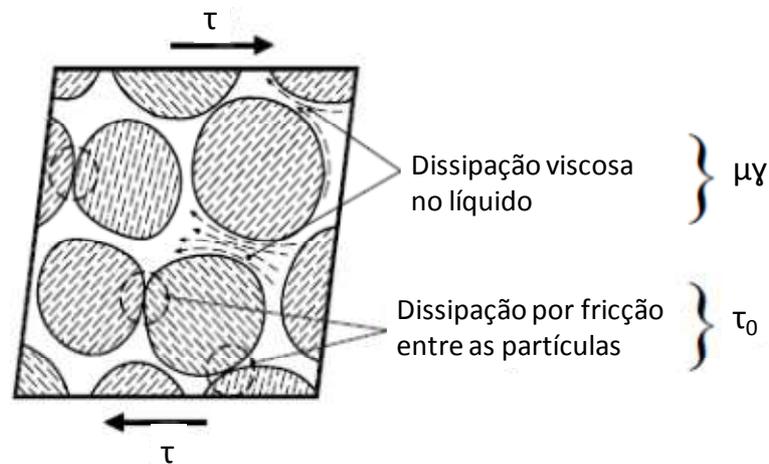


Figura 5 – Contribuição da fase sólida e da fase líquida ao cisalhamento.
Fonte: Formagini (2005).

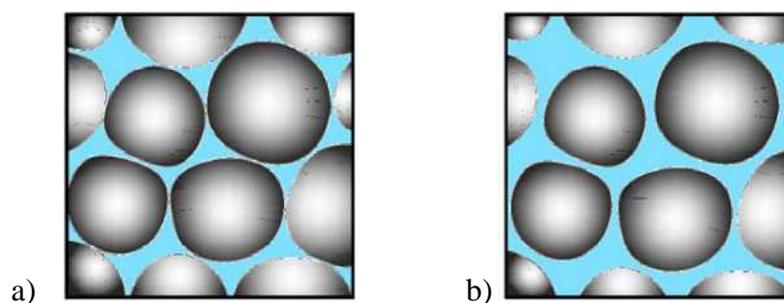


Figura 6 – Suspensão de grãos. a) Sem trabalhabilidade; b) Com trabalhabilidade.
Fonte: Formagini (2005).

Leite (2001) avaliou a propriedade de trabalhabilidade em concretos com agregados reciclados em diferentes proporções, mantendo constante a relação a/c, e concluiu que estes concretos tendem a obter trabalhabilidades insatisfatórias, principalmente com altos percentuais de agregado graúdo incorporado à mistura. Entretanto, a referida autora ressalta que as misturas apresentaram moldabilidade satisfatória quando eram adensadas, exceto

quando possuíam percentuais de 100% de substituição dos agregados naturais, miúdo e graúdo, pelos reciclados. Foi constatado, também, que quando as misturas recebiam a substituição do agregado miúdo isoladamente, o abatimento aumentava. Esse fato deve ter ocorrido em função da quantidade de finos na mistura, que possibilita uma maior lubrificação das partículas, propiciando um aumento da trabalhabilidade.

Estes resultados levam à conclusão de que quanto maior o percentual de agregado miúdo reciclado, isoladamente, maior é o abatimento da mistura, em relação ao agregado graúdo reciclado. Para relação a/c maiores, Leite (2001) concluiu que quanto maior a relação a/c, menores os valores do abatimento. Isso acontece porque misturas com relação a/c mais altas tendem a se tornar mais ásperas, em função da menor quantidade de cimento.

Devido à forma mais angulosa e à maior absorção dos agregados reciclados, a demanda de água do concreto fresco será maior se comparada com o concreto feito a partir de agregado tradicional. Com a substituição de apenas 20% (em volume) dos agregados naturais pelos reciclados, não há problemas com a trabalhabilidade de um modo geral (ZORDAN, 1997).

Para porcentagens de agregado graúdo reciclado superiores a 20%, a densidade resultante do concreto reciclado é inferior a do concreto convencional, devido a menor densidade que o agregado reciclado possui, por apresentar argamassa aderida a sua superfície. Quando maior for a porcentagem de agregado reciclado utilizado, menor será a densidade do concreto. Assim, para substituições totais de agregado graúdo, as reduções ocorridas foram entre 5-15% da densidade de um concreto convencional (BARRA *et al.*, 2006).

Tabsh e Abdelfatah (2009) fizeram oito misturas de concretos com agregado graúdo reciclado, todas com consistência de 100 mm (*slump test*). Para atingir o mesmo valor de abatimento, os concretos feitos com agregados reciclados necessitaram de cerca de 10% a mais de água do que o concreto convencional, devido à sua maior porosidade. Os autores concluíram que este aumento do teor de água tem um efeito sobre a resistência. Acredita-se que se aditivos fossem usados para melhorar a trabalhabilidade das misturas, enquanto se mantém a mesma quantidade de água nos dois concretos, então o concreto reciclado teria uma resistência mais elevada do que a observada.

Segundo González-Fonteboa *et al.* (2011) a consistência do concreto reciclado é influenciada pela capacidade de absorção do agregado. Devido a isso, os referidos autores comentam que alguns pesquisadores recomendam o pré-umedecimento dos agregados. No trabalho de González-Fonteboa *et al.* (2011), através do pré-umedecimento dos agregados

graúdos e uma taxa de aditivo fixa, os valores de *slump* foram constantes para os diferentes tipos de concretos, independentemente da porcentagem de substituição do agregado reciclado.

De uma maneira geral, os concretos com agregados reciclados tendem a apresentar um abatimento menor com relação aos concretos com agregados naturais. Quanto maior a dimensão máxima do agregado reciclado, menor tende a ser o abatimento obtido. Para minimizar estas perdas, algumas precauções podem ser tomadas como, por exemplo, evitar a utilização de cimentos com altos teores de álcalis e de alta resistência, pois o calor de hidratação, bastante intenso, pode dificultar a trabalhabilidade dos concretos. A temperatura também é um forte influenciador na perda de abatimento, pois quanto maior seu valor, maior tende ser a perda. Portanto, todos esses cuidados devem ser tomados para que não haja perda do abatimento. Quando os concretos produzidos forem obtidos a partir de agregados de natureza reciclada, estes cuidados devem ser tomados, inevitavelmente (MEHTA e MONTEIRO, 1994)

3.4.2 Concreto no estado endurecido

Uma vez definida a trabalhabilidade, deve-se especificar a resistência. O agregado reciclado apresenta uma série de características diferentes dos convencionais, as principais são a maior heterogeneidade, menor resistência da matriz de origem (concreto original) e a maior porosidade (BARRA, 1996).

Podem ser citados dois pólos de avaliações das propriedades do concreto. São elas as propriedades mecânicas e de durabilidade. Para que os concretos desempenhem as funções que lhe foram atribuídas é de se esperar que ele mantenha a sua resistência e que seja útil por um período de vida especificado e previsto. As propriedades mecânicas dizem respeito ao potencial do concreto de resistir aos esforços que a ele for solicitado. Dentre as propriedades analisadas, a resistência à compressão é mais utilizada em todas as frentes de estudos, dada a relativa facilidade de realização dos ensaios. Porém, propriedades como módulo de elasticidade e resistência à flexão são também estudadas (VIEIRA, 2003).

De acordo com Moreira (2010) concretos produzidos com agregados mais densos conseguem obter resultados de resistência com menores consumos de cimento, pois são menos porosos globalmente.

Várias são as pesquisas sobre propriedades mecânicas em concretos reciclados. Na sua grande maioria, os pesquisadores avaliam propriedades mecânicas de resistência à compressão e atestam a viabilidade técnica dos concretos com agregados reciclados devido ao

seu bom desempenho diante dessa propriedade. Segundo Vieira (2003), algumas recomendações precisam ser feitas para que essa afirmação se confirme. O tratamento dado ao agregado reciclado antes da concretagem é de fundamental importância para o bom desempenho das misturas. As mais diversas possibilidades do tratamento do agregado estão sendo testadas, principalmente do agregado graúdo, antes da concretagem. Esse tratamento se deve, possivelmente, à natureza heterogênea e de grande variabilidade dos materiais reciclados. Alguns agregados graúdos, mesmo depois do beneficiamento, possuem percentuais de impurezas impregnados na sua superfície, que podem prejudicar a qualidade do concreto (VIEIRA, 2003).

A questão da diminuição da resistência dos concretos reciclados está sendo alvo de muitas discussões. É perfeitamente comum encontrar resultados onde misturas, contendo agregados reciclados, obtenham valores abaixo dos de referência. Zaharieva *et al.* (2002) enfatizam que a alteração da relação a/c provoca diminuição das resistências, mas o acréscimo de água na mistura, em função da alta taxa de absorção dos agregados reciclados, é necessário para atingir uma trabalhabilidade adequada.

A Figura 7 correlaciona a resistência à compressão axial e o fator a/c para concreto de referência e concreto reciclado com substituição de 100% de agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados de concreto. Segundo Barra *et al.* (2006), a resistência dos concretos reciclados e de referência aumenta com a diminuição da relação água/cimento. Esta relação, conhecida para os concretos de referência, não se pode aplicar diretamente ao caso dos concretos reciclados, já que nestes a resistência também depende da qualidade do agregado reciclado utilizado.

Segundo Barra *et al.* (2006), em concretos reciclados com substituição superiores a 20%, devido à menor qualidade dos agregados reciclados, para manter a mesma resistência e durabilidade de um concreto convencional, o concreto fabricado com agregados reciclados necessitará de uma quantidade maior de cimento ou uma menor relação água/cimento em sua dosagem. A referida autora ainda afirma que para conseguir a consistência desejada no concreto reciclado, normalmente faz-se necessário adicionar mais água à dosagem para compensar a maior absorção do agregado reciclado. Porém, outras possibilidades podem ser utilizadas, como aditivos plastificantes ou superplastificantes na dosagem ou pré-saturar o agregado reciclado (BARRA *et al.*, 2006).

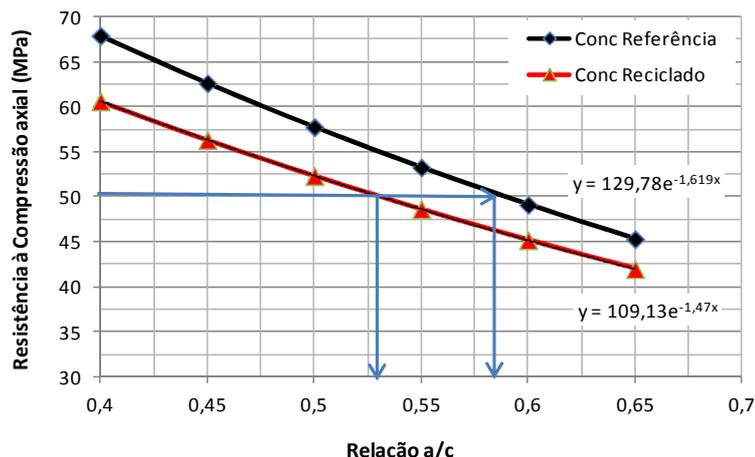


Figura 7 – Dosagem de concreto reciclado. Correlação entre resistência à compressão axial e fator a/c.
Fonte: Modificado de Barra *et al.*(2006).

Quando se faz a pré-saturação do agregado, tem-se um inconveniente, pois não é fácil assegurar quando o agregado reciclado está saturado com superfície seca e qual a quantidade de água utilizada na saturação que se combina com o cimento. Em relação à resistência à compressão do concreto endurecido, não existem diferenças notáveis entre o emprego dos agregados secos e os saturados com superfície seca, sempre que a relação água/cimento efetiva seja a mesma (BARRA *et al.*,2006).

Segundo Barra *et al.* (2006) em relação à influência da umidade dos agregados reciclados nas diferentes propriedades do concreto (trabalhabilidade, resistências, módulos e durabilidade), a autora conclui que a absorção efetiva é a que influi realmente nas ditas propriedades. Ela ainda define absorção efetiva como sendo aquela que controla a migração da água (dos agregados para a pasta e vice-versa) durante o processo de fabricação do concreto, dizendo que a determinação desta absorção é tão importante quanto à determinação de propriedades mecânicas para o concreto, recomendando sua determinação para cada processo de mistura.

Moreira (2010) relacionou a resistência à compressão dos concretos em função das massas específicas dos agregados e do consumo de cimento, de acordo com a Figura 8. A autora comenta que o decréscimo de resistência dos concretos reciclados foi menos intenso para a família correspondente aos traços pobres, onde a inclinação da curva específica foi menor que a das outras famílias de concreto. Segundo a autora, para os concretos com traço rico e intermediário, o decréscimo máximo de resistência foi em torno de 27% e 29% respectivamente, quando a densidade do agregado passou de 2,62 g/cm³ para 1,95 g/cm³.

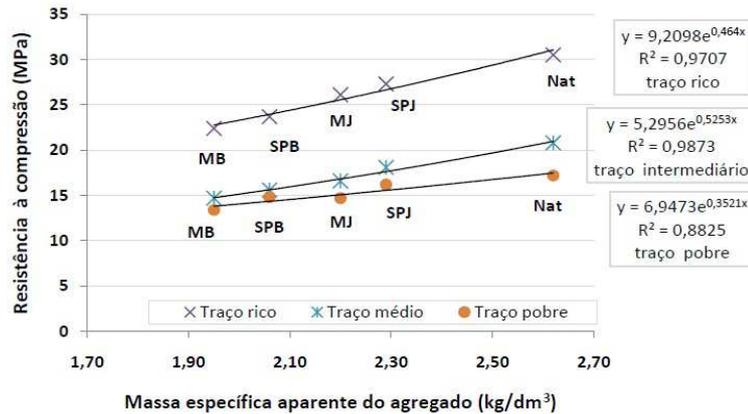


Figura 8 – Resistência à compressão dos concretos em função da massa específica dos agregados e do consumo de cimento.

Fonte: Moreira (2010).

Moreira (2010) explicou que este fato pode estar atrelado à porosidade do agregado reciclado, que acaba impactando de maneira mais intensa os concretos constituídos por uma pasta de cimento mais resistente. Quando a pasta de cimento é mais porosa, como é o caso dos concretos pobres, que utilizam uma maior relação a/c, os poros dos agregados de RCD deixam de ser o efeito de maior impacto no comportamento mecânico.

Ainda de acordo com Moreira (2010) em relação à Figura 8, o traço intermediário apresentou valores mais próximos do traço pobre do que para o traço rico. A autora explicou dizendo que isto ocorre em função da relação não-linear de resistência e relação a/c, como apresentado na Lei de Abrams, onde o maior efeito na variação de resistência ocorre com alterações nos valores mais baixos de relação água/cimento.

Leite (2001) avaliou a influência da incorporação de agregados miúdos (AMR) e graúdos reciclados (AGR) de entulho em diferentes proporções com a resistência à compressão axial, ilustrado na Figura 9.

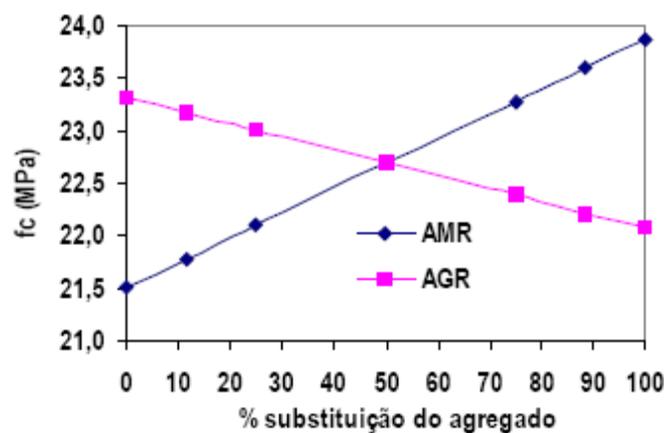


Figura 9 – Resistência à compressão em função do teor de substituição do agregado.

Fonte: Leite (2001).

Segundo a referida autora, o aumento do teor de substituição do AGR tendeu a diminuir a resistência, enquanto o aumento do teor de AMR tendeu a aumentar a resistência à compressão. A autora explica, em relação ao agregado graúdo, que sua maior porosidade e menor resistência são fatores preponderantes para redução da resistência. Entretanto, é importante considerar também a influência da forma, textura e granulometria dos agregados sobre a resistência à compressão dos concretos produzidos, e o aumento da resistência com o aumento de AMR talvez possa ser explicado a partir destes fatores. O agregado reciclado apresenta maior rugosidade, o que contribui para melhorar a aderência; granulometria mais contínua e maior quantidade de finos, que diminuem a segregação, ajudam no efeito empacotamento e contribuem para o fechamento dos vazios. Como o agregado reciclado também possui maior absorção, pode haver, ainda, maior aderência entre a pasta e o agregado através da absorção da pasta e precipitação dos cristais de hidratação nos poros do agregado. Leite (2001) explica, no caso do uso do agregado miúdo reciclado, que todos estes fatores podem ser considerados benéficos à resistência do concreto, pois além da melhoria na zona de transição, o agregado miúdo contribui também para o aumento da rigidez da matriz. Todavia, com o agregado graúdo, apesar de também ocorrer uma melhoria na zona de transição, o grão do agregado é mais frágil em relação ao restante do sistema e a falha pode ocorrer no agregado devido a sua maior dimensão.

Vieira (2003) estudou a influência de diferentes teores de substituição de AMR e AGR em relação à resistência à compressão. Segundo a referida autora, quanto maior o percentual de agregado miúdo reciclado, maior tende a ser a resistência. O contrário acontece com o agregado graúdo reciclado, ou seja, quanto maior o percentual, a partir de 50%, menor a resistência. De acordo com Vieira (2003), isso pode ser explicado devido a baixa resistência e alta porosidade do agregado graúdo reciclado. Para os agregados miúdos, o aumento da resistência pode ser explicado por fatores como, textura, granulometria contínua e grande quantidade de finos, possibilitando misturas mais compactas.

É possível observar que os concretos com agregados reciclados apresentam menores valores de resistência à tração em relação aos concretos naturais. Para uma baixa relação a/c menor será o valor de “m”, sendo assim, maior será a influência do agregado graúdo reciclado sobre a resistência à tração (MOREIRA, 2010). A autora explica que tal afirmação se deve à fase zona de transição do concreto, ou seja, região compreendida pela interface entre a superfície do agregado e a pasta. No caso de concreto com agregados graúdos reciclados, a parte mais fraca passa a ser os próprios agregados graúdos.

Moreira (2010) realizou ensaios de ultrassom em concretos reciclados e concluiu que a velocidade de propagação da onda ultrassônica é menor para esses concretos, pois, além da maior porosidade inerente ao agregado, ocorre também uma maior demanda de água. Isto aumenta a relação a/c , o que acarreta uma menor compacidade do concreto e, conseqüentemente, menor resistência.

De acordo com Barra *et al.* (2006), existem alguns critérios para avaliar a qualidade do concreto em termos de velocidade ultra-sônica longitudinal. Por estes critérios, a qualidade do concreto com até 75% de agregado reciclado seria boa, enquanto que o resto seria considerado excelente, de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 – Critérios de qualidade do concreto em função da velocidade ultrassônica.

Velocidade (m/s)	Qualidade
> 4.500	Excelente
3.600 – 4.500	Boa
3.000 – 3.600	Regular
2.100 – 3.000	Ruim
< 2.100	Muito ruim

Fonte: Adaptado de Barra *et al.*(2006).

De acordo com Kwan *et al.* (2012), os valores de UPV para todas as amostras estavam no intervalo de 3,20 km/s – 4,42 km/s, e os valores tenderam a aumentar com a idade. No entanto, os valores diminuiram com o aumento do teor de substituição. Para a amostra com substituição de 15% na idade de 56 dias foi obtido maior valor de 4,38 km/s, enquanto que o menor valor atingido foi de 4,11 km/s para 80% de substituição. A mudança é de apenas 6,3%, embora tenha havido uma mudança drástica no conteúdo do agregado graúdo reciclado (AGR). Kwan *et al.* (2012) sugerem a classificação feita por Malhotra (1976), onde as amostras são classificadas como “boas” quando seus valores estiverem no intervalo de 3,66 km/s – 4,58 km/s.

O teste de ultrassom é usado para prever as características das partículas internas do concreto e a qualidade do mesmo. As estruturas de poros no concreto podem ter impacto sobre os valores de UPV e resistência. Mesmo que as argamassas aderidas sejam materiais porosos, que reduziria a UPV como provado nos testes, o valor da UPV para a mistura com alto nível de substituição de AGR é ainda aceitável, pois é classificado como “bom” de acordo com Malhotra (1976). Enquanto os valores de UPV se situarem dentro da categoria de “bom”, isso implica que um concreto em particular não contém quaisquer grandes espaços

vazios ou fissuras, o que afetaria a integridade estrutural. Portanto, segundo Kwan *et al.* (2012) o AGR ainda é considerado adequado para substituir o agregado graúdo natural em altos teores, desde que ele atinja a resistência desejada (KWAN *et al.*, 2012).

De acordo com González-Fonteboa *et al.* (2011), os valores dos módulos de elasticidade longitudinais e transversais foram afetados pelo uso do agregado graúdo reciclado, uma vez que diminuições consideráveis foram detectadas com a porcentagem de substituição. Estas diminuições, segundo os autores, foram causadas pela utilização de agregado reciclado com um módulo de elasticidade menor do que os agregados convencionais.

Segundo Mas *et al.* (2012), em todos os casos, a porcentagem de redução na resistência à compressão após 90 dias foi inferior a 7 e 28 dias, o que revela que a adição de agregado reciclado (AR) retardou o endurecimento. Esta observação concorda com as conclusões de Evangelista e Brito (2007), em que a resistência do concreto de referência quase se estabilizou após 28 dias de idade, em contraste com a resistência à compressão das misturas de concreto feitas com agregados reciclados miúdos, que continuaram a aumentar após essa idade. De acordo com Mas *et al.* (2012), esse resultado confirma a hipótese de que existe cimento não hidratado misturado com os agregados miúdos de concreto reciclado, o que contribui para a resistência global (Evangelista e Brito, 2007). No entanto, segundo Mas *et al.* (2012) esta observação contrasta com a de outros autores como Etxeberria *et al.* (2007), que estabelece que o aumento da resistência à compressão no concreto convencional e concreto reciclado é similar para teores de substituição de até 25%. Quando a porcentagem de agregado de concreto reciclado empregada na mistura foi aumentada, o aumento na resistência à compressão medido a seis meses foi menor. Portanto, para Mas *et al.* (2012), uma redução nos valores das propriedades de resistência à compressão e tração ocorreu quando a proporção de agregado reciclado aumentou. Além disso, a perda de resistência foi proporcionalmente maior à medida em que se aumentou a resistência do concreto. A perda de resistência em comparação com o concreto de referência foi menor em 90 dias do que em sete ou 28 dias. Adicionalmente, os autores Mas *et al.* (2012), concluíram que acréscimos de AR de até 20-25% produzem redução na resistência de menos de quinze por cento, um valor considerado razoável. No entanto, os referidos autores consideram que para tirar conclusões definitivas, devem ser realizados testes experimentais a longo prazo em concretos feitos com esses agregados reciclados empregados, especialmente para estudar os efeitos na durabilidade.

De acordo com González-Fonteboa *et al.* (2012) a presença de argamassa aderida e impurezas, tais como asfalto, influenciam o comportamento mecânico dos concretos

reciclados de modo que a pasta de cimento antiga, com uma baixa resistência devido à relação a/c do concreto original, torna-se o ponto mais fraco desses concretos. Os referidos autores observaram que as amostras de concreto romperam através do agregado reciclado, e à falhas através da interface antiga (entre o agregado original e a argamassa antiga) em vez de através da falha da nova interface (através do agregado reciclado e da nova argamassa). Em concretos convencionais a interface entre a nova argamassa e o agregado é normalmente o ponto mais fraco, no entanto, não funciona assim no caso de concreto reciclado. Ainda segundo González-Fonteboa *et al.* (2012), este fenômeno é especialmente importante quando a relação a/c do novo concreto é baixa, o que leva a reduções mais importantes na resistência à compressão e nos módulos de elasticidade transversal e longitudinal de concretos com $a/c = 0,50$ em relação aos com $a/c = 0,65$. Os referidos autores explicam que quando a relação a/c do concreto é baixa, a resistência da zona de transição interfacial antiga governa o desempenho da resistência do concreto reciclado, levando a grandes diferenças entre as resistências do concreto reciclado e a do concreto convencional de referência.

No que diz respeito à resistência à compressão, González-Fonteboa *et al.* (2012) observaram que concretos com 100% de substituição mostraram uma redução de 5,6% ($a/c = 0,65$) e 9,5% ($a/c = 0,50$) quando comparados com o concreto convencional. Para os valores dos módulos de elasticidade longitudinais e transversais, os referidos autores concluíram que eles foram afetados pela utilização do agregado reciclado, pois reduções consideráveis foram detectadas. Estas reduções são causadas pelo uso do agregado reciclado com módulo de elasticidade menor que o agregado natural. Neste caso, as reduções nos valores do módulo de elasticidade foram 18% para $a/c = 0,65$ e 29,2% para $a/c = 0,50$ (GONZÁLEZ-FONTEBOA *et al.* 2012).

Kwan *et al.* (2012) notaram que quanto maior o teor de substituição, maior era a queda na resistência e que essa relação inversa era devido à má qualidade da argamassa aderida que foi submetida a um processo de britagem e que criou as zonas de fraqueza no concreto. Com o aumento do teor de agregado graúdo reciclado (AGR), estas zonas têm maior probabilidade de serem interligadas entre si. Assim, quando se atinge o valor limite, onde as zonas de fraqueza são interligadas da parte superior da superfície para o interior da amostra, uma redução gradual na resistência à compressão foi observada. Os autores indicam que o limite de substituição é de 30% e, que a partir deste teor, os valores de resistência tiveram uma queda repentina subsequente. Kwan *et al.* (2012) concluem que a substituição do AGR até 30% seria o nível ótimo para dosar a mistura, uma vez que não há redução significativa na resistência à compressão.

Kwan *et al.* (2012) relacionaram os resultados entre UPV e resistência à compressão axial e constataram que os altos valores de correlação indicam que os resultados de UPV afetaram a resistência à compressão de uma forma linear e positiva. No entanto, ainda segundo os autores, não seria aceitável utilizar estas equações para a resistência do concreto a partir de valores UPV. Os autores explicam que isso ocorre porque ele é submetido a limitações severas através das quais o conteúdo ou o módulo de elasticidade do agregado não teria um efeito significativo sobre a resistência do concreto. Os autores explicam ainda que no experimento, o baixo módulo de elasticidade do agregado graúdo reciclado e seu conteúdo foram definitivamente afetando a resistência; os valores de UPV também estão estreitamente relacionados com a densidade do concreto endurecido; e quanto maior a densidade, maior UPV e maior seria a resistência.

4 DOSAGEM DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS

A dosagem do concreto pode ser definida como sendo o proporcionamento adequado dos materiais (cimento, água, agregados, e eventualmente aditivos), de maneira que o produto resultante dessa mistura atenda aos requisitos no estado fresco e endurecido, aliados ao menor custo possível.

A dosagem deve atender aos requisitos do concreto no estado fresco, ou seja, deve proporcionar uma trabalhabilidade adequada para que o concreto seja transportado, lançado e adensado, sem ocorrência de segregação. Além disso, a dosagem também deve atender aos requisitos do concreto no estado endurecido, ou seja, o concreto deve ter resistência, durabilidade, permeabilidade etc. compatíveis com as solicitações impostas pelas condições e destino a que estará sujeita a obra finalizada.

O estudo de dosagem é delimitado tanto por características dos materiais que compõem o concreto e pelas condições da obra, como pelo projeto estrutural, os equipamentos disponíveis para execução etc. A trabalhabilidade do concreto fresco, e a resistência do concreto endurecido, a uma idade definida são, em geral, os parâmetros mais importantes. A trabalhabilidade é definida em função das condições de produção e execução da obra (BARRA, 1996).

O objetivo final da dosagem é a determinação da quantidade com que cada material, cimento, água e agregados, entra na composição do concreto, ou seja, o consumo dos materiais por metro cúbico produzido. Os procedimentos adotados na realização dessa mistura é o que constitui um método de dosagem.

4.1 Procedimento de Dosagem de Concretos Convencionais

Existem diversos métodos de dosagem para concreto convencional, cuja utilização varia regionalmente, dependendo de condições técnicas, disponibilidade de material, conhecimento dos métodos, entre outros.

Dentre eles, merecem destaque neste trabalho os Métodos ACI/ABCP e IPT/EPUSP. O método ACI/ABCP fundamenta-se no critério do volume absoluto, que serve de base para vários métodos de dosagem específicos para concreto de alta resistência. O Método IPT/EPUSP, além de ser largamente utilizado no Brasil, não apresenta restrições a sua utilização para concreto de alta resistência.

A seguir será feita uma breve descrição acerca desses dois métodos.

4.1.1 Método ACI/ ABCP (Rodrigues, 1995)

O Método ACI/ABCP é uma metodologia de dosagem experimental, baseada no método desenvolvido pelo *American Concrete Institute* (ACI) e adaptado pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) às condições brasileiras, isto é, para agregados que cumpram a norma NBR 7211 (ABNT, 2005).

Este método é recomendado para a dosagem de concretos com trabalhabilidade adequada para a moldagem *in loco*, ou seja, a consistência deve ser de semi-plástica à fluida e não é aplicável aos concretos confeccionados com agregados leves. O método fornece em primeira aproximação as quantidades dos materiais constituintes, devendo-se, obrigatoriamente, ser executada uma mistura experimental para verificar se as qualidades desejadas foram atingidas. A utilização do método exige o conhecimento prévio das seguintes informações:

a) Materiais

- Tipo, massa específica e nível de resistência aos 28 dias do cimento a ser utilizado;
- Análise granulométrica e massa específica dos agregados disponíveis;
- Massa unitária compactada do agregado graúdo.

b) Concreto

- Dimensão máxima característica admissível do agregado graúdo;
- Consistência desejada do concreto fresco, medida pelo abatimento do tronco de cone;
- Condições de exposição ou finalidade da obra;
- Resistência de dosagem do concreto.

De posse dos elementos descritos acima, a dosagem se resume nos procedimentos descritos a seguir.

1) Fixação da relação água/cimento

A fixação ou escolha da relação a/c do concreto deve ser feita com base nos critérios de durabilidade e de resistência mecânica. Em relação à durabilidade, quando for aplicável, pode-se adotar as recomendações do ACI, apresentadas na Tabela 3 ou, então realizar estudo específico adotando-se a relação a/c e o tipo de cimento mais adequados para a vida útil prevista para a estrutura.

Tabela 3 – Relações a/c máximas permissíveis para concretos submetidos a condições severas.

Tipo da Estrutura	Estrutura exposta à ação da água do mar ou sulfatadas*
Peças delgadas e seções com menos de 2,5 cm de recobrimento da armadura	0,40
Outros	0,45

(*) No caso da utilização de cimentos resistentes aos sulfatos, a relação a/c pode ser aumentada de 0,05.

Deve-se também obedecer às prescrições da NBR 6118/2003, em relação à classe de agressividade e qualidade do concreto.

Tabela 4– Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto (NBR 6118, 2003).

Concreto	Tipo	Classe de Agressividade Ambiental			
		I	II	III	IV
Relação a/c, em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto (NBR 8953)	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$

NOTAS:

1 CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado;

2 CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido;

3 O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.

Tabela 5 – Classe de Agressividade Ambiental (NBR 6118, 2003).

Classe de Agressividade Ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana	Pequeno
III	Forte	Marinha	Grande
		Industrial	
IV	Muito Forte	Industrial	Elevado
		Respingo de Maré	

A escolha da relação a/c em função da resistência mecânica do concreto deve ser feita com base na Curva de Abrams (Figura 10) do cimento a ser utilizado.

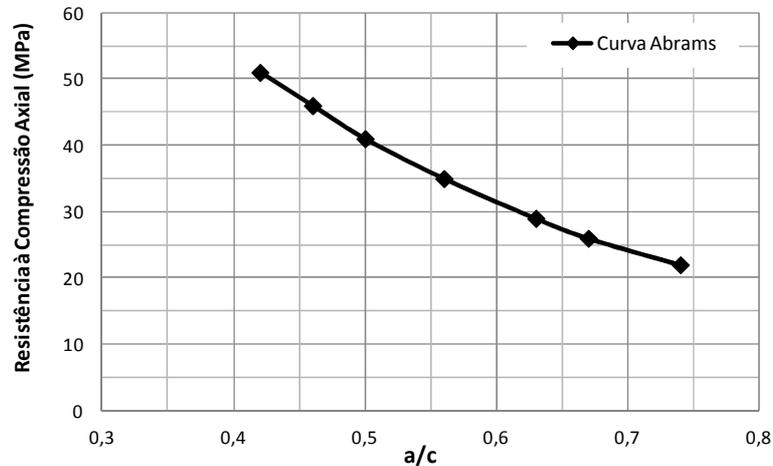


Figura 10 – Curva de Abrams.

2) Determinação aproximada do Consumo de água do Concreto (C_a)

A quantidade de água necessária para fornecer ao concreto fresco uma determinada consistência depende das características como distribuição granulométrica, forma e textura das partículas e das proporções dos materiais utilizados. Por isso, é muito difícil, segundo Rodrigues (1995), a expressão do consumo de água por meio de uma lei matemática ligando-a às características e quantidades dos outros constituintes do concreto.

A água de amassamento deverá ser determinada experimentalmente e os valores frequentemente recomendados, ou obtidos por meio de equações empíricas, devem ser usados apenas como primeira aproximação.

Os valores apresentados na Tabela 6 são recomendados como pontos de partida para o consumo de água de concretos preparados como agregado graúdo britado (granito), agregado miúdo (areia de rio), consumo de cimento da ordem de 300 kg/m^3 e abatimento entre 40 e 100 mm.

Tabela 6– Consumo de água aproximado (l/m^3).

Abatimento (mm)	Dimensão máxima característica do Agregado Graúdo (mm)				
	9,5	19	25	31,5	37,5
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

No caso do seixo rolado ser usado como agregado graúdo, os valores constantes na Tabela 6 podem ser reduzidos de 5 a 15%. Areias muito finas, como as pertencentes à zona 1 da NBR 7211/2005, podem gerar aumentos da ordem de 10% no consumo de água.

Experimentalmente, a determinação exata do consumo de água é bastante simples e pode ser obtida através de duas ou três tentativas, executando-se o ensaio de abatimento para medida da consistência do concreto. Para tal, deve-se fazer uso da Equação 6, onde a água requerida é função do consumo inicial, abatimentos inicial e requerido:

$$C_{ar} = C_{ai} \left(\frac{a_r}{a_i} \right)^{0,1} \quad \text{Equação 6}$$

Onde: C_{ar} = consumo de água requerida (l/m^3); C_{ai} = consumo de água inicial (l/m^3); a_r = abatimento requerido (mm); a_i = abatimento inicial (mm).

3) Determinação do Consumo de Cimento (C)

O consumo de cimento inicial é calculado diretamente com base no consumo de água e na relação a/c, através da Equação 7.

$$C = \frac{C_a}{a/c} \quad \text{Equação 7}$$

Consumos altos de cimento provocam maiores variações volumétricas e maior quantidade de calor, gerado pela sua hidratação. O consumo de cimento varia normalmente de 200 a 400 kg/m^3 .

4) Determinação do Consumo de Agregados

O consumo de agregados pode ser obtido pela diferença de volume necessária para compor 1 m^3 de concreto. Entretanto, os agregados são compostos por miúdo e graúdo, sendo necessário que se faça, de forma adequada, o proporcionamento de cada fração para a composição da curva granulométrica do agregado total. O consumo dos agregados é muito importante na dosagem do concreto, pois ele é quem vai ditar a trabalhabilidade e o custo final.

Neste método, o proporcionamento agregado miúdo/gráudo é feito determinando-se o teor ótimo de agregado graúdo na mistura, em função da sua dimensão máxima característica

e do módulo de finura da areia, enquanto que o consumo de areia será função dos teores de pasta e agregado graúdo do concreto.

O consumo estimado de agregado graúdo é obtido da Tabela 7, onde são fornecidos os volumes compactados a seco por metro cúbico de concreto, em função da sua dimensão máxima característica ($D_{m\acute{a}x}$) e do módulo de finura (MF) da areia.

Tabela 7 – Volume compactado seco (V_c) de agregado graúdo por m^3 de concreto.

MF	$D_{m\acute{a}x}$ (mm)				
	9,5	19	25	31,5	37,5
1,6	0,665	0,790	0,815	0,840	0,865
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

A determinação do consumo de brita é feita pela Equação 8:

$$C_b = V_c \cdot M_c \left(\frac{Kg}{m^3} \right) \quad \text{Equação 8}$$

Onde V_c e M_c são, respectivamente, o volume compactado por m^3 de concreto e a massa unitária compactada do agregado graúdo.

Para se determinar o consumo de agregado miúdo (C_m), pode-se fazer um cálculo imediato, pois admite-se que o volume de concreto é formado pela soma dos volumes absolutos do cimento (V_c), água (V_a) e agregados ($V_m - V_b$). Portanto, para $1 m^3$ de concreto, tem-se:

$$V_m = 1 - \left(\frac{C}{\rho_c} + \frac{C_b}{\rho_b} + \frac{C_a}{\rho_a} \right) \quad \text{Equação 9}$$

Onde ρ_c , ρ_b e ρ_a são, respectivamente, as massas específicas do cimento, agregado graúdo e água.

O consumo de areia será:

$$C_m = \rho_m \cdot V_m \quad \text{Equação 10}$$

Onde ρ_m é a massa específica da areia.

Segundo Rodrigues (1995), caso o concreto seja fabricado com aditivo incorporador de ar, o seu volume deve ser considerado no cálculo do volume de agregado miúdo. Em concretos normais o ar naturalmente arrastado é geralmente inferior a 2%, e o erro cometido em não considerá-lo é pequeno. Porém, para a dosagem dos concretos deste trabalho, considerou-se o volume de ar como 2%, sendo o mesmo contabilizado no cálculo do volume de areia.

5) Apresentação do Traço do Concreto

O traço é a indicação da quantidade, em massa ou volume, que cada um entra na sua composição, em relação a uma unidade de medida de cimento. A expressão é feita da seguinte maneira:

Cimento (1) : areia : gráudo : relação a/c

Em relação à massa de cimento seria (traço em massa):

$$1 : \frac{C_m}{C} : \frac{C_g}{C} : \frac{C_a}{C} \quad \text{Equação 11}$$

6) Mistura Experimental e Eventuais Correções – Recomendações

Esta etapa é muito importante para acertar o traço final do concreto e depende da experiência e bom senso do técnico que vai executar, pois a avaliação do aspecto da mistura se dá de forma subjetiva. Porém, Rodrigues (1995) dá algumas sugestões para a verificação experimental do traço teórico.

A mistura experimental para correção do traço deve ser realizada numa betoneira com as mesmas características da que será utilizada para fazer a mistura, pois dessa forma não se correrá o risco de obter uma trabalhabilidade inadequada, já que o tipo de mistura interfere na trabalhabilidade do concreto.

Quando se realiza a mistura de concreto, a água de amassamento nunca deve ser colocada de uma só vez, mas gradativamente, determinando-se a consistência do concreto pelo ensaio de abatimento, até que se obtenha a consistência desejada.

Este método de dosagem foi desenvolvido de maneira a fornecer, para misturas plásticas, o mais baixo teor de areia. Dessa forma, além de reduzir o custo, também se torna mais fácil para um operador inexperiente identificar uma mistura pouco argamassada do que com argamassa em excesso. Caso haja necessidade de correção de traço, deve-se acrescentar areia à mistura, mas mantendo constante a relação água/cimento, isto é, junto com a areia, deve-se colocar mais cimento e água na mesma proporção.

A forma de mistura dos materiais na betoneira indicada pelo método do ACI/ABCP é a seguinte: maior parte da água, agregado graúdo, cimento, agregado miúdo, resto da água.

4.1.2 Método IPT / EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992)

Este método parte do princípio que são necessários três pontos para montar o diagrama de dosagem, que correlaciona a resistência à compressão, relação água/cimento, traço e consumo de cimento.

O estudo consiste em se determinar um teor ideal de argamassa para um traço intermediário 1:5 (cimento:agregados secos totais, em massa), fixando-se um valor de abatimento. Baseado nas informações obtidas desta mistura, confeccionam-se mais duas, com os traços definidos em 1:3,5 (traço chamado de rico) e em 1:6,5 (traço chamado de pobre). Para cada traço, são moldados exemplares de corpos-de-prova para a determinação da resistência a compressão axial em idades pré-determinadas pelo executor. Com esses resultados monta-se o diagrama de dosagem.

4.1.2.1 Estudo Teórico

a) Conceitos Fundamentais

- A relação a/c é o parâmetro mais importante do concreto estrutural;
- Definida a relação a/c e definidos certos materiais, a resistência e a durabilidade do concreto passam a ser únicas;

- O concreto é mais econômico quanto maior for a dimensão máxima característica (DMC) do agregado graúdo e menor o abatimento do tronco de cone (consistência mais seca);
- São aceitas como “Leis de comportamento”:

a. Lei de Abrams:

$$f_{cj} = \frac{k_1}{k_2^{a/c}} \quad \text{Equação 12}$$

b. Lei de Lyse:

$$m = k_3 + k_4 \cdot a/c \quad \text{Equação 13}$$

c. Lei de Molinari:

$$C = \frac{1000}{(k_5 + k_6 \cdot m)} \quad \text{Equação 14}$$

d. Teor de argamassa seca:

$$\alpha = \frac{(1 + a)}{(1 + m)} \quad \text{Equação 15}$$

e.

$$m = a + p \quad \text{Equação 16}$$

Onde: f_{cj} = resistência à compressão axial, à idade j , em MPa; a/c = relação água/cimento em massa, em kg/kg; a = relação agregado miúdo seco / cimento em massa, em kg/kg; m = relação agregados secos / cimento em massa, em kg/kg; α = teor de argamassa seca; deve ser constante para cada diagrama de dosagem, em kg/kg; p = relação agregados graúdos secos / cimento em massa, em kg/kg; k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 e k_6 = constantes que dependem dos materiais (cimento, agregados miúdos, graúdos e aditivos).

- Diagrama de dosagem (modelo de comportamento);
- Leis complementares:

a. Consumo de cimento / m^3 :

$$C = \frac{\gamma}{1 + a + p + a/c} \quad \text{Equação 17}$$

b. Consumo de cimento / m^3 :

$$C = \frac{(1000 - ar)}{1/\gamma_c + a/\gamma_a + p/\gamma_p + a/c} \quad \text{Equação 18}$$

c. Consumo de água / m³:

$$C_a = C \cdot a/c \quad \text{Equação 19}$$

Onde: C = consumo de cimento / m³ de concreto adensado em kg/m³; γ = massa específica do concreto, medida no canteiro em kg/m³; γ_c , γ_a , γ_p = massas específicas do cimento, do agregado miúdo e do agregado graúdo, respectivamente, em kg/dm³; ar = teor de ar incorporado e/ou aprisionado por m³, em dm³/m³.

b) Informações básicas

O estudo de dosagem parte do pressuposto de que o concreto deva ter capacidade de ser lançado e adensado adequadamente no interior do elemento estrutural. Para isso, os autores indicam fazer um levantamento prévio da situação em que o concreto será submetido. A seguir têm-se informações orientativas necessárias para nortear o executor, podendo ser modificadas a depender da sua experiência.

- Resistência característica do concreto à compressão (fck);
- Determinação do espaçamento entre barras de aço (regiões críticas e predominantes);
- Escolha da dimensão máxima característica do agregado graúdo;
- Definição dos elementos estruturais a serem concretados com este traço: laje, pilar, viga etc;
- Escolha da consistência do concreto (medida através do ensaio de abatimento do tronco de cone) em função do tipo do elemento estrutural (Tabela 8);

Tabela 8 – Volume compactado seco (V_c) de agregado graúdo por m³ de concreto.

Elemento estrutural	Abatimento (mm)	
	Pouco armada	Muito armada
Laje	$\leq 60 \pm 10$	$\leq 70 \pm 10$
Viga e parede armada	$\leq 60 \pm 10$	$\leq 80 \pm 10$
Pilar do edifício	$\leq 60 \pm 10$	$\leq 80 \pm 10$
Paredes de fundação, sapatas, tubulões	$\leq 60 \pm 10$	$\leq 70 \pm 10$

OBS.: quando o concreto for bombeado, a consistência deve estar entre 70 e 100 mm, no máximo.

- Definição da relação água/cimento (a/c) para atender às condições de durabilidade;
- Uso de aditivo quando necessitar de condições especiais (plastificantes e retardadores);
- Estimativa de perda de argamassa do concreto no sistema de transporte e lançamento do concreto (em geral variando de 2 a 4%).

c) Cálculo da resistência de dosagem

- Para a determinação da resistência de dosagem, adota-se a Equação 20 constante da NBR 6118.

$$f_{cdj} = f_{ckj} + 1,65 \cdot s_d \quad \text{Equação 20}$$

Onde: $f_{cdj} = f_{cmj}$ = resistência à compressão de dosagem, a j dias de idade (em geral 28 dias), em MPa; s_d = desvio-padrão de dosagem, referido à idade j (em geral 28 dias), em MPa.

d) Cálculo da relação água/cimento (a/c)

É necessário determinar a correlação existente entre a resistência a compressão axial e o fator água/cimento para se obter a definição do traço inicial. Porém, para não precisar esperar a ruptura dos corpos-de-prova, os autores sugerem as correlações obtidas por Helene, em estudo desenvolvido a nível nacional, para alguns tipos de cimento. Estas correlações estão disponíveis em Helene e Terzian (1992), apresentando as curvas médias obtidas para as idades de três, sete, 28, 63 e 91 dias, para cada tipo de cimento estudado.

4.1.2.2 Estudo Experimental

São necessários três pontos para montar o diagrama de dosagem, que correlaciona a resistência à compressão, relação a/c, traço e consumo de cimento.

O início do estudo experimental parte da avaliação preliminar de parâmetros para um traço intermediário de 1:5 (cimento: agregados secos totais, em massa) e, baseado nas informações dessa mistura, confeccionam-se mais duas, sendo uma rica (1:3) e outra mais pobre (1:6,5).

- Determinação do teor ideal de argamassa

O objetivo desta fase é determinar o teor ideal de argamassa na mistura do concreto, repercutindo na adequabilidade do concreto quando lançado à forma. Para tal, através de variações no teor de argamassa da mistura, com o traço intermediário estabelecido, os autores sugerem determinar a proporção adequada por tentativas e observações práticas, descritas a seguir.

- Com a betoneira desligada, retirar todo material aderido nas pás e superfície interna;
- Com uma colher de pedreiro, trazer todo material para a região inferior da cuba da betoneira, introduzindo os agregados soltos no interior da mistura;
- Passar a colher de pedreiro sobre a superfície do concreto fresco, introduzi-la na massa e levantar no sentido vertical. Verificar se a superfície exposta está com vazios, indicando falta de argamassa;
- Verificar se há desprendimento de agregado graúdo da massa, o que indica falta de argamassa na mistura;
- Levantar uma porção da massa com a colher de pedreiro e deixar cair a fim de verificar se a mesma cai de forma compacta e homogênea, o que indica teor de argamassa adequado;

Para a mistura que apresentar um teor adequado de argamassa a partir das verificações anteriores, deve-se determinar o abatimento do tronco de cone. Caso o mesmo não atinja a faixa estabelecida, deve-se acrescentar a quantidade de água suficiente.

Para se determinar o teor de argamassa final, ainda deve ser feita a consideração da porcentagem de perda que, em processos usuais, pode ser estimado em 2 a 4%. Sendo assim, o teor final será o definido a partir das verificações anteriores acrescido da estimativa de perdas.

Deve-se realizar uma nova mistura com o traço 1:5, com o teor de argamassa definitivo e determinar as características do concreto fresco, descritas a seguir:

- a. Relação água/cimento;
- b. Consumo de cimento / m³ de concreto;
- c. Consumo de água / m³ de concreto;

- d. Massa específica do concreto fresco;
- e. Abatimento do tronco de cone.

Para finalizar esta etapa, devem-se moldar os corpos-de-prova (CPs) nas idades a serem ensaiadas e com o número de amostras determinado pelo executor. No livro, Helene e Terzian (1992) sugerem as idades de três dias (1CP), sete dias (1 CP), 28 dias (2 CPs), 63 dias (2 CPs) e 91 dias (1 CP).

- Obtenção dos traços auxiliares

A nova etapa do estudo de dosagem é produzir mais dois traços auxiliares, para montar o diagrama de dosagem, sendo um mais rico e outro mais pobre. Esses traços devem manter fixo o teor de argamassa (α) e o abatimento do tronco de cone, determinados para o traço de 1:5. Após isso fazer as mesmas determinações para o concreto fresco descritas anteriormente e moldar as mesmas quantidades de corpos-de-prova para as mesmas idades.

4.1.2.3 Traço Definitivo

- Diagrama de dosagem

Com os dados obtidos no estudo experimental devem-se construir as correlações entre o traço de concreto e a relação água/cimento, $m = f(a/c)$; consumo de cimento e traço, $C = f(m)$. Isso dará origem ao diagrama de dosagem, que é válido somente para o mesmo tipo e classe de cimento. As curvas de correlação de Helene entre a relação a/c e a resistência a compressão axial, permitem a obtenção do traço inicial, logo após o término do estudo experimental, sem a necessidade de aguardar a ruptura dos CP à idade de 28 dias (ou mais).

- Parâmetros do traço definitivo

Esta é a etapa final do estudo de dosagem, onde é obtido um traço logo após o estudo experimental, que permite iniciar a produção do concreto com segurança, atendendo aos parâmetros desejados. Porém, este traço pode ainda ser o definitivo ou não, necessitando de correção.

- Correção do traço

Após a ruptura dos corpos-de-prova nas idades estabelecidas, os resultados devem ser confrontados com os das curvas de referência. A necessidade de correção do traço vai depender dos resultados da resistência e seu desvio padrão, ficando a decisão ao profissional responsável. Os autores recomendam que a resistência efetiva do concreto esteja próxima do valor de referência num intervalo máximo de $\pm sd$ (desvio-padrão adotado na dosagem).

Para a introdução dos materiais de modo individual na betoneira, os autores sugerem a seguinte ordem: água (80%); agregado graúdo (100%); agregado miúdo (100%); cimento (100%); restante da água e aditivo (se houver).

4.2 Procedimento de Dosagem de Concretos de Alto Desempenho

Neste tópico serão apresentados dois métodos de dosagem de concreto de alto desempenho (CAD), com o intuito de se estudar o comportamento de concretos reciclados dosados a partir destes métodos. Serão apresentados brevemente dois métodos de dosagem, um baseado no critério do volume absoluto, Método de Aitcin (1998) e o outro baseado na otimização do esqueleto granular, o Método de Mehta e Aitcin (1990b).

4.2.1 Método Aitcin (1998)

Este método segue a mesma abordagem da norma ACI 211-1 “*Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavy weight and Mass Concrete*” (1989), sendo uma combinação de resultados empíricos e matemáticos baseados no método do valor absoluto para quantificar os materiais utilizados. A água trazida pelo superplastificante é considerada como parte da água de mistura. A Figura 11 a seguir ilustra o fluxograma deste método de dosagem.

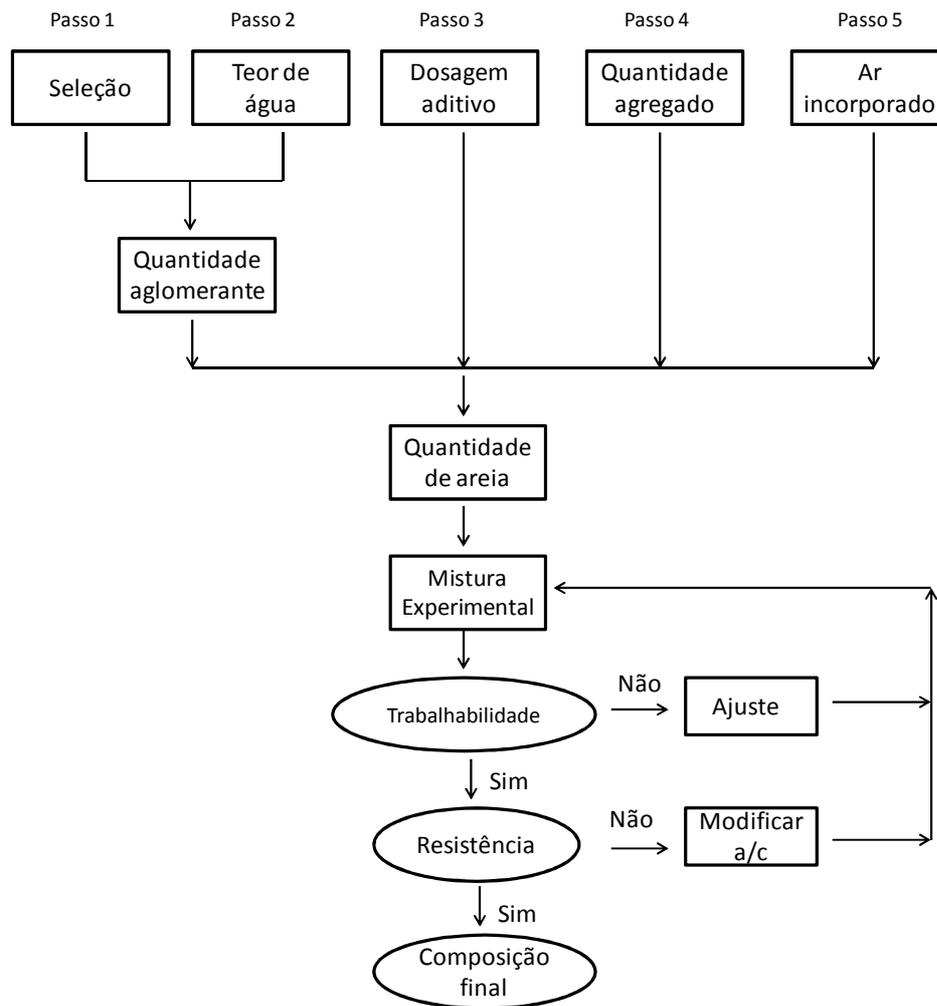


Figura 11 - Fluxograma do método de dosagem Aitcin (1998).
Fonte: Modificado de Aitcin (1998).

O procedimento deste método é iniciado a partir do estudo de cinco diferentes características em sequência determinada, descritas a seguir.

a) Relação água/aglomerante (a/a)

O autor sugere que a relação água/aglomerante seja retirada da Figura 12, para uma dada resistência à compressão a 28 dias. Devido a variações que podem ocorrer na resistência de diferentes materiais cimentícios suplementares, esta curva apresenta uma larga faixa de valores da relação a/a para uma dada resistência. Quando não se conhece a eficiência dos materiais cimentícios empregados através de experiências anteriores, o autor sugere que se utilize a curva média para uma estimativa inicial do traço.

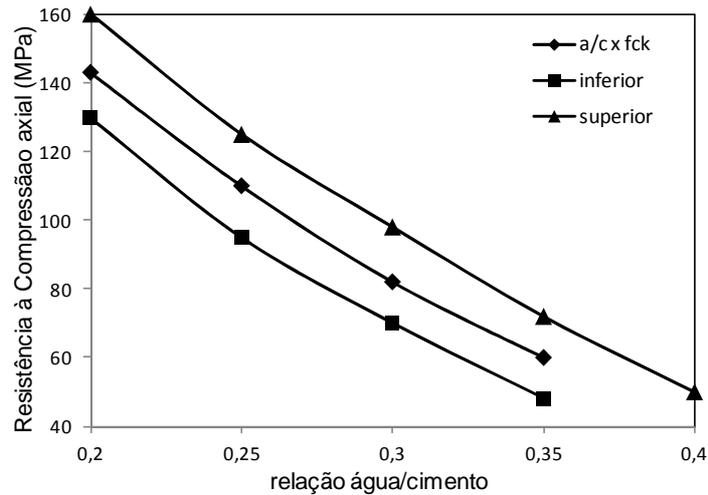


Figura 12 - Relações propostas entre a relação água/aglomerante e a resistência à compressão.
Fonte: Modificado de Aitcin (1998).

b) Teor de água

Segundo o autor, é difícil determinar o teor de água na dosagem de concretos de alto desempenho, pois a trabalhabilidade é controlada por diversos fatores: a quantidade de água inicial, a “reatividade do cimento”, a quantidade de superplastificante etc. O autor ainda afirma que um determinado abatimento pode ser conseguido misturando um concreto com um baixo teor de água e elevado teor de superplastificante ou com um alto teor de água e baixo teor de aditivo.

O autor sugere a utilização da Figura 13 para se definir o teor de água a partir do ponto de saturação do superplastificante. Se este não for conhecido, o autor sugere um teor de água inicial de 145 l/m³.

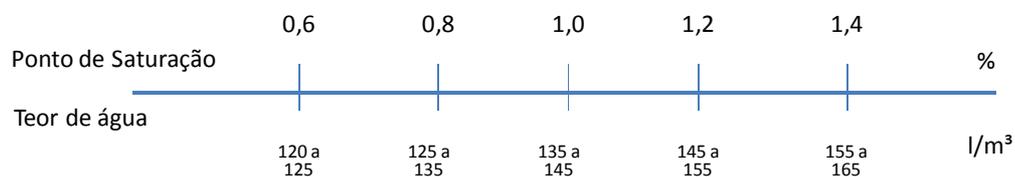


Figura 13 - Determinação da dosagem mínima de água.
Fonte: Modificado de Aitcin (1998).

c) Dosagem de Superplastificante

De acordo com o autor, a dosagem do aditivo pode ser deduzida da dosagem no ponto de saturação. Se este não for conhecido, ele sugere começar com um teor de 1,0%.

d) Teor de Agregado graúdo

A quantidade de agregado graúdo é função da forma típica das partículas. O autor sugere a utilização da Figura 14, que correlaciona a dosagem de agregado graúdo pela forma da partícula. Caso exista alguma dúvida em relação à forma do agregado ou se esta não for conhecida, o autor sugere um teor inicial de 1000 kg/m³.

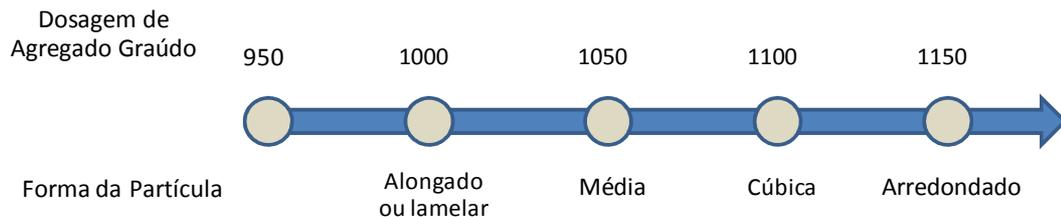


Figura 14 - Teor de agregado graúdo.
Fonte: Modificado de Aitcin (1998).

e) Teor de Ar

Segundo Aitcin (1998), em ambientes sem condição de congelamento, o único ar que estará presente na mistura é o ar aprisionado, cujo volume depende parcialmente das proporções do traço. Para melhorar o manuseio do concreto no lançamento e no acabamento, o autor sugere usar 1,5% como uma estimativa inicial para o teor de ar incorporado e, então, ajustá-lo com base nos resultados obtidos com as misturas experimentais.

4.2.1.1 Planilha de dosagem

O autor deste método sugere a utilização de uma planilha de dosagem, onde todos os cálculos necessários para o proporcionamento da mistura são apresentados. A planilha é dividida em duas partes, onde na parte superior são relacionadas as propriedades especificadas para o concreto, com as características dos materiais a serem utilizados. Esta parte da planilha deve ser preenchida antes que qualquer cálculo seja feito, pois esses dados servirão de subsídios para os cálculos que seguirão.

O autor comenta que se alguma das propriedades físicas necessárias para os cálculos não são conhecidas, é necessário adotar valores razoáveis para elas, baseados na melhor informação disponível.

A Figura 15 ilustra a planilha de dosagem deste método. A parte inferior da planilha está na forma de tabela, na qual todas as células estão numeradas na ordem em que devem ser preenchidas. Esta tabela é dividida em seis colunas, numeradas no topo. Dados iniciais e cálculos são registrados na primeira coluna. O volume do agregado miúdo é calculado na coluna 2. As proporções SSS do traço são apresentadas na coluna 3. As diferentes correções na quantidade de AGU que tiverem de ser feitas são calculadas na coluna 4. As proporções do traço usando as matérias-primas reais são dadas na coluna 5 e as proporções das misturas experimentais podem ser calculadas na coluna 6.

A seguir têm-se os símbolos e abreviações contidos na mesma.

G_C – massa específica do cimento ou do material cimentício;

G_{SSS} – massa específica do agregado em condições saturado de superfície seca;

A_{abs} – água absorvida no agregado em porcentagem;

A_{tot} – quantidade total de água no agregado em porcentagem;

A_u – teor de umidade do agregado em porcentagem: $A_u = A_{tot} + A_{abs}$;

G_{sup} – massa específica do superplastificante;

M_{sol} – massa de sólidos no superplastificante;

d – dosagem do superplastificante como uma porcentagem da massa de sólidos em comparação com a massa total de material cimentício;

V_{liq} – volume do superplastificante líquido;

V_a – volume de água no superplastificante líquido;

V_{sol} – volume de sólidos no superplastificante líquido;

A – massa da água em kg por metro cúbico do concreto;

B – massa dos aglomerantes em kg por metro cúbico.

MISTURA

Resist. à compressão

Tabela	G_{sup}	%
Cimento	3,14	

PLANILHA DE PROJETO DE TRAÇO

Agregado	G_{SSS}	%		
		A_{abs}	A_{tot}	A_u
Graúdo				
Miúdo				

$A_u = A_{tot} + A_{abs}$ $M = M_{SSS} (1 + h)$

SUPERPLASTIFICANTE		$M_{sol} = C \times \frac{d}{100}$	$V_{liq} = \frac{M_{sol}}{s \times G_{sup}} \times 100$	$V_a = V_{liq} \times G_{sup} \times \left(\frac{100-s}{100}\right)$	$V_{sol} = V_{liq} - V_a$
Massa espec. (G_{sup})	Dosagem sólida s (%)	15	E 24	F 21	G 11
					H

MATERIAIS	1		2		3		4		5		6			
	Teor kg/m ³		Volume l/m ³		Dosagem Condições SSS kg/m ³		Correção da água l/m ³		Composição					
									1 m ³		Mistura experimental			
ÁGUA	2		2		2				23		25			
CIMENTO	$\frac{A}{B} = 0,$ 1		3		4-1				4-1		4-1		26-1	
			4-2		8-2				4-2		4-2		26-2	
			4-3		8-3				4-3		4-3		26-3	
AGREGADO GRAÚDO	5		9		5		18		17		27			
AGREGADO MIÚDO			13		14		20		19		28			
AR			6		10									
	POR CENTO													
SUPERPLAS-TIFICANTE	7		11		15		21		24		V_{liq} 29			
TOTAL			12		16		22				30			

Figura 15 - Planilha de projeto de traço.
Fonte: Aitcin (1998).

4.2.1.2 Composição da mistura

As proporções obtidas a partir da mistura experimental são sempre para a condição SSS dos agregados. Porém, os agregados contidos nas baias das usinas normalmente não estão nesta condição, sendo necessário o ajuste da quantidade de água da mistura. A quantidade de água trazida pelo superplastificante também tem que ser subtraída do teor da água de mistura.

Para facilitar esses cálculos, o autor sugere a planilha da Figura 16, que é dividida em duas partes.

PLANILHA DE MISTURA

AGLOMERANTE		Agregados		Fornecedor	A _{tot}	A _u	A _{abs}
TIPO	MARCA	Graúdo	Ø _{max} = mm				
		Miúdo	mf =				
		$A_u = A_{tot} + A_{abs}$		$M = M_{SSS} (1+h)$			

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO		SUPERPLASTIFICANTE	
	MPa	Massa específica (C _{sup})	Teor de sólidos s (%)
a/a	0,	$V_a = V_{liq} \times C_{sup} \times \left(\frac{100-s}{100} \right)$ $M_{sol} = V_{liq} \times C_{sup} \times \frac{s}{100}$	
		TIPO	MARCA

	1	2	3	4
MATERIAIS	Condições SSS 1 m ³	Correção da água l/m ³	Condição úmida 1 m ³	Condição úmida _____ m ³
ÁGUA	1		13	14
SUPER PLASTIFICANTE	2 2-1	7	2	15-1 15-2
CIMENTO	3-1		3-1	16-1
	3-2		3-2	16-2
	3-3		3-3	16-3
AGREGADO GRAÚDO	4	9	8	17
AGREGADO MIÚDO	5	11	10	18
TOTAL	6	12		19

Figura 16 - Planilha de mistura.

Fonte: Aitcin (1998).

Na parte superior, devem ser registradas as características necessárias para fazer as correções da água, os tipos e marcas de cimento e aditivo, a relação a/a e a resistência à compressão pretendidas.

Na parte de baixo da planilha, existe uma tabela de quatro colunas. Na coluna 1 são registrados os resultados da mistura experimental (células de 1 a 5). A M_{sol} contida no superplastificante é calculada, usando-se a fórmula dada na parte superior e escrita na célula 2-1. Somando-se esses valores, é encontrada a massa específica do concreto (célula 6).

A massa de água, V_a , adicionada à mistura pelo aditivo, é calculada e registrada na célula 7.

A massa de agregado graúdo úmido, M , que deve ser pesada, é igual a $M_{SSS}(1+A)$; ela é registrada na célula 8 e a massa de água que deve ser adicionada ou subtraída do teor de água é registrada na célula 9. O mesmo é feito para o agregado miúdo nas células 10 e 11.

A convenção de sinais utilizada para calcular as correções de água é a seguinte: se o agregado traz água para a mistura, o seu teor de água tem que ser subtraído da dosagem de água, portanto um sinal negativo será usado na célula correspondente, enquanto um sinal positivo será usado quando o agregado absorve alguma água da mistura. Essa convenção é a mesma para preencher a planilha da Figura 15.

O valor registrado na célula 12 é somado ou subtraído do teor de água constante da célula 1, para calcular a massa de água de mistura necessária para fazer 1 m³ de concreto com os agregados que estão nas baias (valor registrado na célula 13).

Já as massas dos diferentes materiais necessários para fazer “X” m³ de concreto podem ser calculadas, multiplicando-se por “X” todos os valores aparecendo na coluna 3. Isto é feito nas células de 14 a 18.

Os valores aparecendo nas células 14, 15-1, 16-1, 16-2, 16-3, 17 e 18 são somados e esta soma é registrada na célula 19. Multiplicando-se por “X” o valor da célula 6, é possível verificar o valor registrado na célula 19.

Ordem de colocação dos materiais na betoneira: agregado graúdo; parte da água; início da mistura; cimento; restante da água; adição mineral (se houver); aditivo; agregado miúdo; e mais aditivo, se necessário.

4.2.2 Método de Mehta e Aitcin (1990b)

Mehta e Aitcin (1990) propuseram um procedimento simplificado de dosagem aplicável para concretos de peso normal com valores de resistência à compressão entre 60 MPa e 120 MPa. O método é adequado para agregados graúdos tendo um tamanho máximo entre 10 mm e 15 mm e valores de abatimento entre 200 mm e 250 mm.

Os autores deste método ainda sugerem que o concreto de alto desempenho sem ar incorporado tem um volume de ar aprisionado de 2%, que pode ser aumentado até 5% ou 6% quando o concreto tem ar incorporado. O valor ótimo sugerido pelos autores para o volume de agregado é 65% do volume do concreto de alto desempenho.

Este método segue a abordagem da otimização do esqueleto granular. O princípio fundamental desta abordagem é a otimização de um esqueleto granular que apresente o menor índice de vazios possível.

A seguir têm-se os passos do procedimento de dosagem para este método.

a) Determinação da resistência

Uma tabela lista cinco níveis de concreto com resistência à compressão média de 28 dias, variando de 65 a 120 MPa, conforme a Tabela seguinte:

Tabela 9 – Grau de Resistência x Resistência a Compressão média.

Grau de Resistência	Resistência média (MPa)
A	65
B	75
C	90
D	105
E	120

Segundo os autores, esta faixa começa com 65 MPa, por ser este um valor que caracteriza um concreto de baixa permeabilidade e boa resistência à abrasão, como espera-se que seja o concreto de alta resistência. O limite superior é fixado em 120 MPa, pois, de acordo com os autores, este é o valor máximo que se pode alcançar utilizando-se agregados naturais e aumentando-se a resistência da pasta de cimento através do controle do consumo de água e das adições.

b) Teor de água

O tamanho máximo do agregado graúdo e os valores do abatimento não são considerados para selecionar o teor de água, uma vez que são considerados apenas tamanhos máximos entre 10 e 15 mm e porque o abatimento desejado pode ser conseguido pelo controle do superplastificante. O teor de água é especificado para os diferentes níveis de resistência, conforme Tabela 10 que segue.

Tabela 10– Relação entre resistência a compressão média e o teor máximo de água

Grau Resistência	Teor Máximo de água (kg/m ³)
A	160
B	150
C	140
D	130
E	120

Fonte: Modificado de Mehta/Aitcin (1990b).

c) Escolha do Aglomerante

O volume de pasta aglomerante é adotado como 35% do volume total do concreto. Os volumes do teor de ar (aprisionado ou incorporado) e da água de mistura são subtraídos do volume total da pasta de cimento para calcular o volume remanescente do aglomerante. O autor sugere que o aglomerante seja adotado como uma das seguintes combinações:

Opção 01: 100% de cimento Portland (CP) para ser usado absolutamente quando necessário;

Opção 02: 75% de cimento Portland (CP) e 25% de cinza volante (CV) ou de escória de alto-forno (EAF), em volume;

Opção 03: 75% de cimento Portland (CP), 15% de cinza volante (CV) ou escória de alto forno (EAF) e 10% de sílica ativa (SA), em volume.

A Tabela 11 a seguir relaciona os volumes de cada fração de aglomerante para cada nível de resistência.

Tabela 11– Fração em volume dos componentes em 0,35 m³ de pasta de cimento, m³

Grau Resistência	Água	Ar	Total material cimentício	Opção 01 (CP)	Opção 02 (CP + CV ou EAF)		Opção 03 (CP + CV ou EAF + SA)		
A	0,16	0,02	0,17	0,17	0,1275	0,0425	0,1275	0,0255	0,0170
B	0,15	0,02	0,18	0,18	0,1350	0,0450	0,1350	0,0270	0,0180
C	0,14	0,02	0,19	0,19	0,1425	0,0475	0,1425	0,0285	0,0190
D	0,13	0,02	0,20	*	0,1500	0,0500	0,1500	0,0300	0,0200
E	0,12	0,02	0,21	*	0,1575	0,0525	0,1575	0,0315	0,0210

(*) Concretos com resistência nos graus D e E não são feitos sem aditivo mineral.

Fonte: Modificado de Mehta/Aitcin (1990b).

d) Escolha do teor de agregado

O autor sugere que o volume total de agregado seja igual a 65% do volume de concreto. Para os níveis de resistência A, B, C, D e E as relações dos volumes do agregado miúdo para o agregado graúdo estão sugeridas como 2,00:3,00, 1,95:3,05, 1,90:3,10, 1,85:3,15, 1,80:3,20, respectivamente, conforme Tabela 12.

Tabela 12 – Relação entre resistência e proporção agregado miúdo/graúdo.

Grau Resistência	Proporção agregado miúdo/graúdo	Agregado miúdo (m ³)	Agregado graúdo (m ³)
A	2,00:3,00	0,260	0,390
B	1,95:3,05	0,254	0,396
C	1,90:3,10	0,247	0,403
D	1,85:3,15	0,241	0,409
E	1,80:3,20	0,234	0,416

Assume-se que usando uma adequada proporção de agregado graúdo pode ser obtida uma estabilidade dimensional adequada do concreto de alto desempenho (por exemplo, comportamento elástico, retração à secagem e fluência) quando se utiliza a proporção fixa de 35-65% em volume de pasta de cimento / agregado, respectivamente. Os autores consideram essa proporção ideal entre o esqueleto granular e a pasta de cimento hidratada que apresenta o menor índice de vazios possível.

e) Cálculo da massa da mistura

De acordo com os autores, para calcular as massas das diferentes frações constituintes do concreto, pode-se utilizar os volumes dessas frações e os valores das massas específicas de cada uma delas. Os valores usuais das massas específicas do cimento Portland, cinza volante tipo C, escória de alto-forno e sílica ativa são 3,14, 2,5, 2,9 e 2,1, respectivamente. A massa específica para a areia natural silicosa e do cascalho de peso normal ou da pedra britada podem ser tomados como sendo 2,65 ou 2,70, respectivamente.

f) Teor de superplastificante

Para a primeira mistura experimental, os autores recomendam usar 1% de sólidos do superplastificante em relação à massa de aglomerante. A massa e o volume da solução de aditivo são então calculados, levando-se em conta a porcentagem de sólidos na solução e a massa específica do superplastificante.

g) Ajuste da umidade

O volume de água incluído no superplastificante é calculado e subtraído da quantidade inicial de água de mistura. De modo semelhante, a massa do agregado e a de água são ajustadas de acordo com as condições de umidade.

h) Ajuste da mistura experimental

Normalmente, durante a dosagem, são feitas algumas suposições que gerarão a primeira mistura experimental. Esta deverá ser ajustada para atingir a trabalhabilidade desejada e os critérios de resistência. O tipo de agregado, a relação agregado miúdo/grauído, o tipo e a dosagem do superplastificante, o tipo e a combinação dos materiais cimentícios suplementares devem ser ajustados numa série de misturas experimentais para otimizar a dosagem.

Se a trabalhabilidade do concreto não foi atingida e ele apresentar uma consistência muito dura, deve-se aumentar a dosagem de superplastificante gradualmente até que a consistência adequada seja alcançada. O aumento do aditivo pode ser acompanhado de determinados efeitos indesejados, como tendência à segregação e retardamento de pega. O primeiro pode ser corrigido através do aumento da relação entre o agregado miúdo/grauído ou usando um agregado miúdo com módulo de finura inferior. Para misturas sem adições minerais, este problema pode ser resolvido com a incorporação de cinza volante, sílica ativa ou de ambos.

Em relação ao problema de retardamento de pega, os autores sugerem que sejam feitos testes de combinações entre tipos ou marcas de superplastificantes disponíveis localmente e cimentos. Os autores sugerem ainda, que nesses casos, se utilize um aditivo acelerador de pega disponível comercialmente. Os autores advertem que quando a causa de uma consistência mais dura da mistura de concreto for o alto teor de C_3A reativo no cimento, as doses adicionais de aditivo por si só não resolvem o problema. Nesses casos, eles alertam que um aumento na relação água/cimento torna-se inevitável.

Se a resistência à compressão axial aos 28 dias do concreto for menor que a especificada, um exame da superfície de fratura das amostras e análise das curvas tensão x deformação podem fornecer uma pista para o componente mais fraco do composto. No caso de rupturas freqüentes na zona de transição entre pasta de cimento e agregado grauído, a pasta de cimento deve ser reforçada ou deve-se melhorar a aderência da superfície do agregado.

Ordem de colocação dos materiais na betoneira: agregado grauído; aproximadamente metade da água; início da mistura; cimento; restante da água; parte do aditivo; adição mineral (se houver); mais aditivo; areia e mais água se necessário.

4.3 Procedimento de Dosagem de concretos com agregados reciclados

Os agregados de resíduo de construção e demolição são bastante heterogêneos, apresentam alta porosidade e absorção. Para se dosar um concreto utilizando estes agregados, é necessário ajustar alguns parâmetros a fim de não comprometer as propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido.

Uma mistura de concreto com agregados reciclados necessita de mais água do que uma mistura convencional para se atingir uma mesma consistência, devido à alta absorção desses agregados. Porém, a quantidade de água deve ser controlada, pois um excesso da mesma acarretaria numa menor resistência do concreto reciclado.

Poon *et al.* (2004) estudaram a influência dos estados de umidade dos agregados naturais e reciclados na trabalhabilidade e na resistência à compressão de concretos. Para tal, fizeram misturas com os agregados em três situações: secos em estufa, secos ao ar e saturados superfície seca. Os autores concluíram que os diferentes estados de umidade dos agregados afetaram a trabalhabilidade dos concretos frescos. As misturas de concreto feitas com agregados secos em estufa obtiveram um slump inicial alto e uma perda mais rápida de trabalhabilidade, devido ao aumento da quantidade de água livre adicionada à mistura inicialmente, o que não ocorreu com os agregados nos demais estados citados. Esse slump inicial alto é indesejável na prática, pois pode levar à segregação do concreto durante a moldagem, embora exista a possibilidade de perda rápida de trabalhabilidade devido à absorção de água pelo agregado reciclado seco. De acordo com os autores, o slump inicial do concreto foi fortemente dependente do teor de água livre inicial das misturas. Dentre as misturas de concreto preparadas com a incorporação de agregados reciclados, os concretos com agregados na condição seca ao ar exibiram uma maior resistência à compressão. Os agregados reciclados no estado saturado superfície seca foram os que apresentaram maior efeito negativo sobre a resistência do concreto, devido ao excesso de água nos agregados pré-molhados no concreto fresco. Baseado nos resultados desse estudo, os autores concluíram que para uma substituição de até 50% de agregados naturais por reciclados, os agregados no estado secos ao ar (como são recebidos) são ideais para fabricar concretos com resistência normal (35 MPa).

Para realizar o estudo de dosagem dos concretos é necessário conhecer as massas específica e unitária dos agregados. Segundo Leite (2001), pela diferença de valores dessas propriedades para os agregados reciclados e convencionais, existe a necessidade de realizar uma compensação da quantidade de material reciclado a ser utilizada nas misturas de

concreto, quando traços em massa de concretos convencionais são aplicados aos concretos reciclados. Sem este procedimento, o volume de material reciclado correspondente à massa de agregado natural seria maior, resultando numa distorção entre os volumes de concreto convencional e reciclado produzidos a partir de um mesmo traço unitário. A compensação do volume do material foi feita por Leite (2001) utilizando a Equação 21.

$$M_{AMR} = M_{AMN} \cdot \frac{\gamma_{AMR}}{\gamma_{AMN}} \quad \text{Equação 21}$$

Onde: M_{AMR} = Massa do agregado miúdo reciclado (Kg); M_{AMN} = Massa do agregado miúdo natural (Kg); γ_{AMR} = Massa específica do agregado miúdo reciclado (Kg/dm³); γ_{AMN} = Massa específica do agregado miúdo natural (Kg/dm³).

Na maioria dos trabalhos pesquisados com resíduos até o momento, a forma de dosar compensando a taxa de absorção foi a mais encontrada. Porém, os autores divergem na forma de pré-saturar os agregados, no tempo de pré-saturação e na forma como misturam os concretos na betoneira.

Por exemplo, Ferreira, de Brito e Barra (2011), compararam dois procedimentos para produzir concreto com agregado reciclado e, chegaram a conclusão de que as misturas de concreto usando o método de pré-saturação exibiram um comportamento ligeiramente pior nos estados fresco e endurecido do que as misturas feitas com o método de compensação de água na mistura. Os referidos autores explicam que isso ocorreu, possivelmente, devido ao desenvolvimento de uma zona interfacial fraca entre os agregados reciclados e a matriz. No entanto, as diferenças de comportamento observadas foram, em geral, pequenas e, às vezes, não conclusivas. Portanto, segundo os autores, os resultados não foram significativos para a produção do concreto em larga escala.

Foi constatado também que alguns pesquisadores, tais como Ângulo (1998); Leite (2001); Gómez-Sóberon (2002); Vieira (2003); Carrijo (2005); Ângulo (2005); Etxeberria *et al.* (2007); Evangelista e Brito (2007); Evangelista e Brito (2010); González-Fonteboa *et al.* (2011); Mas *et al.* (2012) ajustam parâmetros de métodos de dosagem convencionais e utilizam esses métodos adaptados para dosar concretos reciclados a partir dos traços unitários obtidos para o concreto de referência, o que reforça ainda mais a necessidade do desenvolvimento de estudos acerca da dosagem para concretos com agregados reciclados.

Durante a pesquisa bibliográfica realizada, foram encontradas algumas práticas de dosagem de concretos com agregados reciclados, que serão explanadas com mais detalhes a seguir.

4.3.1 Estudos com compensação

Alguns pesquisadores partem do pressuposto de que, devido à alta absorção dos agregados, estes devem ser pré-umedecidos como forma de compensar a necessidade de água que esses agregados possuem e, também, de evitar que eles acabem diminuindo consideravelmente a trabalhabilidade da mistura, por “roubar” parte da água de amassamento.

A capacidade de absorção dos agregados reciclados e o estado de umidade no qual eles são utilizados influenciam as propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido. Quando agregados pré-umedecidos são utilizados, alguns autores concluem que não há diferença significativa entre a resistência de concretos convencionais e reciclados. No entanto, outros autores concluem que no caso da utilização de AR no estado saturado, o elevado teor de água no interior das partículas pode resultar em “exsudação” durante o lançamento, consequentemente, a resistência à compressão do concreto seria reduzida (GONZÁLEZ-FONTEBOA *et al.* 2011).

Segundo Leite (2001), quando se produz concretos com agregados reciclados existe a necessidade de acrescentar mais água à mistura, comparando com um mesmo traço feito com agregado natural. A depender da quantidade de água a mais a ser incorporada na mistura, haverá um aumento da relação *a/c* e conseqüente redução da resistência mecânica. Assim, para manter a resistência haverá a necessidade do aumento do consumo de cimento, o que aumenta o custo do concreto produzido. Ainda segundo a referida autora, compensar apenas parcialmente a taxa de absorção dos agregados reciclados é uma boa alternativa para minimizar os problemas com a trabalhabilidade das misturas e ao mesmo tempo para que não haja excesso de água no concreto com conseqüente redução da resistência mecânica.

De acordo com González-Fonteboa *et al.* (2011, 2012), devido a alta capacidade de absorção dos agregados reciclados que acaba influenciando a consistência do concreto fresco, eles podem ser empregados de duas maneiras distintas: agregados secos, aumentando-se a quantidade de água incorporada à mistura, ou utilizando-os pré-umedecidos. Este último apresenta, por sua vez, várias opções de processo: imersão por 24h, pré-umedecimento por 10 minutos ou aspersão.

A imersão por 24 horas implica em trabalhar com agregados saturados, sendo que alguns autores consideram que este sistema apresenta excesso de água, ocasionando um efeito deletério sobre a resistência do concreto reciclado. O segundo método consiste em pré-umedecer os agregados por 10 minutos. Estudos realizados por Nealen e Schenk (1998) indicam que este sistema garante saturação de água de 79,96% para frações graúdas,

permitindo a correção da demanda de água em agregados reciclados. O terceiro método requer a aspersão dos agregados. A desvantagem neste sistema é a necessidade de uma grande superfície sobre a qual os agregados podem ser adequadamente espalhados para assegurar uma distribuição uniforme de água (GONZÁLEZ-FONTEBOA *et al.* 2011).

Leite (2001) compensou parcialmente a taxa de absorção dos agregados reciclados miúdos e graúdos em 50% e 40%, respectivamente. A autora desenvolveu um ensaio de absorção para agregados reciclados, monitorando o ganho de massa dos mesmos num período de 24 horas, gerando um gráfico do ganho de massa com o tempo.

Carrijo (2005) determinou o tempo a partir do qual a absorção dos agregados reciclados se tornava lenta, sendo este o tempo de pré-umedecimento que seria adotado para a confecção dos concretos. Logo, para cada faixa de densidade dos agregados reciclados a autora monitorou a absorção de água, obtendo-se a curva de ganho de massa em função do tempo. A referida autora observou que em 10 minutos de imersão, os agregados absorviam de 70 a 86% da absorção total determinada anteriormente pela NBR NM 53. Levando-se em conta que cada tipo de agregado necessitaria de uma quantidade de água a ser compensada nas misturas, para se facilitar a etapa de fabricação dos concretos, Carrijo (2005) estipulou que a quantidade de água a ser adicionada à água total de cada traço seria fixada em 70% da taxa total de absorção de cada agregado.

Carrijo (2005) e Leite (2001) utilizaram a taxa de compensação para o tempo de 10 minutos e justificaram a compensação de apenas parte da água total, com o argumento de que fazendo a compensação parcial permite que não haja um excesso muito grande de água no concreto, fato que levaria as resistências mecânicas a valores muito baixos.

Ângulo (2005) fez um tratamento dos agregados da seguinte forma: os agregados graúdos foram secos em estufa a 110 °C por 24 horas e resfriados por aproximadamente duas horas até atingirem o equilíbrio térmico com a condição ambiente. Antes da mistura, eles foram imersos durante 10 minutos numa quantidade de água que equivale a 70% do valor de absorção de água. A partir desse valor de pré-saturação, o autor considera que a influência da absorção de água dos agregados nas propriedades do concreto, no estado fresco, é pequena.

De acordo com os resultados do ensaio de absorção de Vieira (2003), ela encontrou uma absorção média de 11,08% para o agregado miúdo reciclado e de 6,04% para o agregado graúdo reciclado, medidos a partir do ensaio proposto por Leite (2001). A autora comenta a alta taxa de absorção dos agregados reciclados, explicando a necessidade de pré-umedecimento dos mesmos minutos antes da execução das concretagens. Ficou estabelecido que as taxas de absorção seriam compensadas para que os agregados não absorvessem toda a

água do traço e as misturas se tornassem pouco trabalháveis devido à falta de água. Entretanto, a autora ressalta que esse procedimento precisa ser feito cuidadosamente, para que não haja um excesso de água na mistura, ocasionando um aumento da relação água/cimento e, conseqüentemente, uma diminuição nas resistências mecânicas dos concretos produzidos. Para evitar que fatos como esses ocorram, a compensação de água foi empregada na ordem de 50% da taxa de absorção dos agregados, tirada a partir da curva de absorção em 24 horas, e adicionada à água do traço para que não houvesse uma diminuição da relação água/cimento das misturas.

Lovato (2007) fez a pré-umidificação dos agregados reciclados, ou seja, os agregados foram pré-molhados de acordo com as curvas de absorção verificadas durante a caracterização dos materiais. Para a obtenção dessas curvas, a referida autora utilizou o método de ensaio de absorção de agregados reciclados proposto por Leite (2001). A autora utilizou a compensação para 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 da relação água/cimento.

Correia (2006) *apud* Pedrozo (2008) propõe a pré-molhagem dos agregados reciclados por um tempo de 30 minutos, a fim de minimizar o efeito da elevada absorção dos grãos dos agregados reciclados e melhorar a trabalhabilidade.

Segundo Etxeberria *et al.* (2007), devido a alta capacidade de absorção, os agregados reciclados devem ser umedecidos antes da sua utilização nas misturas de concreto. Ainda segundo os referidos autores, se os agregados reciclados não forem umedecidos, eles podem absorver a água da pasta, acarretando numa perda de trabalhabilidade do concreto fresco e também do controle da relação água/cimento efetiva na pasta. Em estudo realizado, esses autores utilizaram agregados graúdos reciclados e fizeram o umedecimento dos mesmos através de um sistema de aspersão, no dia anterior ao uso dos agregados e cobriram os mesmos com um plástico para manter a alta umidade.

O nível recomendado de umidade, de acordo com Etxeberria *et al.* (2007), é de 80% do total da capacidade de absorção dos agregados. Entretanto, os autores ressaltam que o fator mais importante é que os agregados sejam utilizados úmidos para reduzir a sua capacidade de absorção no momento da mistura.

Etxeberria *et al.* (2007) não recomendam a utilização dos agregados saturados, pois, segundo eles, isso resultaria numa zona de transição interfacial efetiva fraca entre o agregado graúdo reciclado saturado e a nova pasta de cimento. O mecanismo que ocorre, explicado pelos autores, é que quando os agregados reciclados são introduzidos na mistura com um teor

de umidade moderado, eles podem absorver certa quantidade de água livre, diminuindo a relação água/cimento inicial na zona de transição no começo da hidratação. O processo gradual de preenchimento da região pelos hidratos recém-formados melhora a ligação interfacial entre os agregados e o cimento.

González-Fonteboa *et al.* (2011) utilizaram a pré-molhagem dos agregados por 10 minutos, considerando que isso reduziria o grau de exsudação do concreto no momento do lançamento. O período de 10 minutos foi fixado através de testes preliminares para atingir a saturação de 70%. O procedimento utilizado para pré-umedecer os agregados era realizado imediatamente antes da mistura, os agregados graúdos eram imersos em água durante 10 minutos, e depois deixava-se escorrer por mais 10 minutos. Considerando que os agregados graúdos foram saturados até 70% da sua capacidade, e levando em conta que a areia natural absorveu 70% da diferença entre a sua capacidade de absorção e teor de umidade, a quantidade de água adicional incorporada à mistura pode ser determinada, obtendo-se assim um parâmetro representativo que González-Fonteboa *et al.* denominaram, dentro da estrutura de sua pesquisa, de relação a/c efetiva.

González-Fonteboa *et al.* (2012) fizeram a pré-umidificação dos agregados por 10 minutos. Este período foi fixado através de testes preliminares (absorção de água em função do tempo) para atingir a saturação de 70%, levando em conta a consideração de Oliveira e Vazquez (1996) que aponta um nível recomendado de umidade de 80% da capacidade de absorção total. O procedimento de pré-umedecimento dos agregados era o seguinte: imediatamente antes da mistura os agregados graúdos eram imersos em água durante 10 minutos e, depois, deixava-se escorrer por igual período.

Ferreira, de Brito e Barra (2011) pesquisaram a influência de dois procedimentos para produzir concretos reciclados: a pré-saturação e a compensação de água do agregado graúdo de concreto reciclado (AGCR). O procedimento de pré-saturação foi definido para ser prático e executável, a fim de ser aplicado na produção de concreto num canteiro de obra. Os referidos autores determinaram que a pré-saturação iria ocorrer no interior do misturador, em movimento, misturando a quantidade total de água (de amassamento com a água adicional da absorção) e o agregado de concreto graúdo reciclado utilizado, garantindo completa submersão dos agregados. Também foi definido que a pré-saturação duraria tempo suficiente para os agregados atingirem um nível de umidade estável. Com base na curva de absorção de água *versus* tempo (método adaptado de Leite, 2001), foi escolhido um período de cinco minutos de pré-saturação, que corresponde a aproximadamente 90% do potencial de absorção de água. Após este período, a absorção teve pequena variação e o agregado reciclado não teria

atingido ainda a sua saturação, garantindo que o agregado não devolveria água para a pasta (FERREIRA, DE BRITO e BARRA, 2011).

De acordo com Ferreira, de Brito e Barra (2011), comparando as densidades das misturas feitas com a pré-saturação do agregado reciclado e com o método de compensação, os autores indicaram que a mistura em que os agregados eram pré-saturados apresentaram maior porosidade. Em relação às diferenças de consistência, aferidas pelo *slump test*, os autores perceberam que o abatimento esperado de 80 ± 10 mm foi atingido em todas as misturas, portanto, a trabalhabilidade do concreto não foi sensível em relação ao método de controle tecnológico adotado. Para concretos com um teor de 20% de incorporação de agregado reciclado, utilizando o método de compensação de água na mistura, mostrou um desempenho muito bom, com um comportamento muito semelhante ao concreto de referência.

Evangelista e Brito (2007) estudaram o comportamento mecânico do concreto feito com agregado miúdo de concreto reciclado. Os autores ajustaram o método de dosagem de Faury, que seria somente para o concreto convencional e fizeram as adaptações necessárias para utilizá-lo em todas as misturas, inclusive as de concreto com agregados reciclados, levando em conta as diferentes relações água/cimento, que segundo os autores, deveriam aumentar juntamente com a taxa de substituição dos agregados reciclados. O aumento de água, segundo os autores, tem a ver com uma maior absorção dos agregados finos reciclados e à maior necessidade de água da mistura, por causa do atrito de partículas maiores, que geram os agregados reciclados. Para estimar a água que o agregado reciclado absorveria durante a mistura, os autores consideraram a relação proposta por Leite (2001), que estabeleceu a absorção de água do agregado reciclado através do tempo.

Para verificar a adequação da proposta de Leite (2001), Evangelista e Brito (2007) utilizaram duas técnicas diferentes para misturar os agregados miúdos (naturais e reciclados) com água. Na primeira técnica, os agregados miúdos foram inseridos em água ($2/3$ da água necessária à mistura, mais a água que foi estimada para ser absorvida) e foram misturados durante 10 minutos. Após esse tempo, os demais materiais foram colocados. Na segunda técnica, o mesmo procedimento de mistura foi usado, porém o tempo de duração da mistura do agregado miúdo com a água foi aumentado para 20 minutos. Os valores de resistência à compressão sofreram pequena alteração de uma técnica para outra, porém os valores de resistência obtidos para a primeira técnica foram levemente superiores. Os autores com base nos trabalhos de Poon *et al.* (2004) e Barra de Oliveira e Vasquez (1996), concluíram que o nível de saturação dos agregados reciclados pode afetar a resistência do concreto, uma vez que, em níveis mais elevados de saturação, a ligação mecânica entre a pasta de cimento e os

agregados reciclados fica mais fraca. Portanto, como na segunda técnica, o tempo de duração da mistura foi maior, isso pode ter contribuído a um desempenho inferior dos concretos, em relação aos concretos fabricados com a primeira técnica.

Ainda segundo Evangelista e Brito (2007), eles substituíram os agregados miúdos naturais por agregados miúdos reciclados de concreto nas proporções de 0%, 10%, 20%, 30%, 50% e 100%. Eles obtiveram resultados de resistência à compressão, de maneira geral, superiores para os concretos com resíduos em relação aos de referência. Com base em uma explicação de Katz (2003), os autores concluíram que os agregados reciclados têm níveis elevados de cimento (hidratado e não hidratado), que pode atingir até 25% de seu peso, aumentando assim a quantidade total de cimento da mistura, o que contribui para a resistência global.

Evangelista e Brito (2010) em estudo acerca da durabilidade de concreto com agregados miúdos reciclados de concreto, tiveram de corrigir a relação a/c para os concretos com agregados reciclados, pois a forma mais angular das partículas de agregados finos reciclados produziu um maior atrito interno. Segundo os autores, foi necessário acrescentar a água que os agregados reciclados iriam absorver durante a mistura, para evitar que a escassez da mesma prejudicasse o processo de hidratação, bem como o desempenho do concreto.

De acordo com Evangelista e Brito (2010) existem duas relações a/c que precisam ser determinadas: a relação a/c global, que eles definem como sendo a relação entre a quantidade total de água introduzida na mistura e a quantidade de cimento que, embora seja muito simples de determinar, não é de particular interesse para o estudo das misturas de concreto e a relação a/c efetiva, que é a relação entre a quantidade de água livre dentro da mistura e a quantidade de cimento, cuja determinação, embora seja fundamental para entender o desempenho do concreto, é difícil porque a evolução da absorção de água pelos agregados reciclados em função do tempo tem que ser conhecida em detalhe. Em pesquisa realizada no IST e UPC (Barcelona, Espanha), o efeito do método de compensação para agregados graúdos de concreto reciclado com absorção excessiva de água nas misturas de concreto tem sido estudado. Segundo Evangelista e Brito (2010), os resultados mostram que o método de compensação de água durante a mistura, a fim de atingir uma dada relação a/c efetiva, leva a melhores resultados de desempenho para concreto feito com esses agregados, quando comparado àqueles feitos utilizando o método tradicional (pré-saturação de agregados). A evolução da quantidade de água absorvida pelos agregados reciclados ao longo do tempo foi determinada usando o método proposto por Leite (2001). Evangelista e Brito (2010) realizaram a pré-saturação dos agregados com duração entre 10 e 20 minutos antes da adição

do cimento. Eles compensaram uma quantidade de água correspondente a 50% da capacidade máxima de absorção de água dos agregados miúdos reciclados, abatendo a quantidade de água já presente nos agregados em condições ambientais.

Sagoe-Crentsil & Taylor (2001) pré-saturaram os agregados reciclados por 10 minutos no misturador e depois os levaram a uma sala com temperatura constante antes da mistura do concreto. Esses autores determinaram a absorção dos agregados naturais e reciclados, que apresentaram absorção de 1,0% e 5,6%, respectivamente, sendo essa última considerada alta se comparada ao valor dos agregados convencionais.

Segundo Gómez-Sóberon (2002), devido à dificuldade em determinar a relação água/cimento real por causa da alta variação da absorção do agregado de concreto reciclado, foi decidido usar conceitos de misturas básicos do ACI, de acordo com os seguintes critérios:

- A substituição do agregado natural pelo reciclado foi realizada usando frações de volume iguais, com as seguintes condições:

$$r = \frac{ACR_{graúdo}}{ACR_{graúdo} + AN_{graúdo}} \quad 0.00 \leq r \leq 1.00 \quad \text{Equação 22}$$

Onde: r = porcentagem de agregado natural (AN) substituído pelo agregado de concreto reciclado (ACR), em volume.

- O ACR mostrou um aumento na absorção proporcional ao tempo de permanência em água. O tempo admitido para a mistura foi de 20 minutos, com até 97% de brita 5-10 mm e 77% de brita 10-20 mm, em todos os casos com comparação após 24 horas.
- A quantidade de água absorvida pelo agregado foi levada em conta separadamente, além do umedecimento dos agregados antes da mistura e a água livre que fazia parte da mesma.

No estudo feito por Mas *et al.* (2012), a absorção do AR foi corrigida por adição de água no próprio misturador, levando em conta a real umidade dos agregados, simplificando assim o processo para possíveis aplicações industriais. Para determinar a absorção a ser levada em conta para a compensação do processo de mistura foi decidido usar a absorção a 2h como referência; este é o tempo livre médio dos cimentos utilizados nos vários testes, extraído das especificações dos fabricantes. Esse tempo de duas horas corresponde a cerca de 80% da

absorção total do AR utilizado no estudo feito por Mas *et al.* (2012). A decisão de considerar a absorção de 2h foi baseada na experiência da equipe de pesquisa, que notou uma elevada perda de trabalhabilidade quando se trabalha com AR em testes preliminares. Entretanto os autores mencionam que outros pesquisadores, como Evangelista e Brito (2007) consideram que durante o período de 10-30 min de mistura, a absorção de água já estabiliza, atingindo cerca de 50% da sua capacidade máxima. Mas *et al.* (2012) notaram que ao introduzir o ligante na mistura, a absorção dos AR foi significativamente reduzida porque este sela os poros dos agregados, limitando as trocas de água, porém mesmo assim para um período de 30 min de mistura o AR teve uma taxa de absorção de 75% em relação a sua capacidade máxima.

4.3.2 Estudos sem compensação

Diferentemente das dosagens com compensação vista no item anterior, as dosagens sem compensação mantém a relação água/cimento inicial da mistura, sem alterá-la ao longo do processo. Os ajustes para melhorar aspectos das misturas de concreto sem compensar parte da água, ocorrem na forma de misturar os componentes, nas considerações iniciais da mistura e/ou no uso de aditivos, com o intuito de melhorar a consistência. A seguir, será descrito o método de mistura em dois estágios, que não utiliza compensação.

4.3.2.1 Abordagem em dois estágios de mistura (Tam *et al.*, 2005)

O método de mistura em dois estágios foi proposto por Tam *et al.* (2005) e divide o processo de mistura em duas partes, com a divisão proporcional da quantidade de água em duas, que serão adicionadas em diferentes tempos.

Os autores compararam concretos reciclados dosados com um método de dosagem normal (MMN) e o método em dois estágios (MMDE), conforme esquema da Figura 17. No método de dosagem normal, a água é adicionada em sua totalidade imediatamente antes de ligar o misturador. A Figura 18 apresenta a legenda dos símbolos utilizados.

Foram utilizados dois tamanhos de agregados reciclados (AR), sendo 20 mm e 10 mm. Os AR com 20 mm apresentaram absorção de 1,65% e teor de umidade de 0,33%; enquanto que os AR com 10 mm apresentaram absorção de 2,63% e teor de umidade de 0,49%. O agregado natural utilizado apresentou absorção de 0,77% para 20 mm e 0,57% para 10 mm.

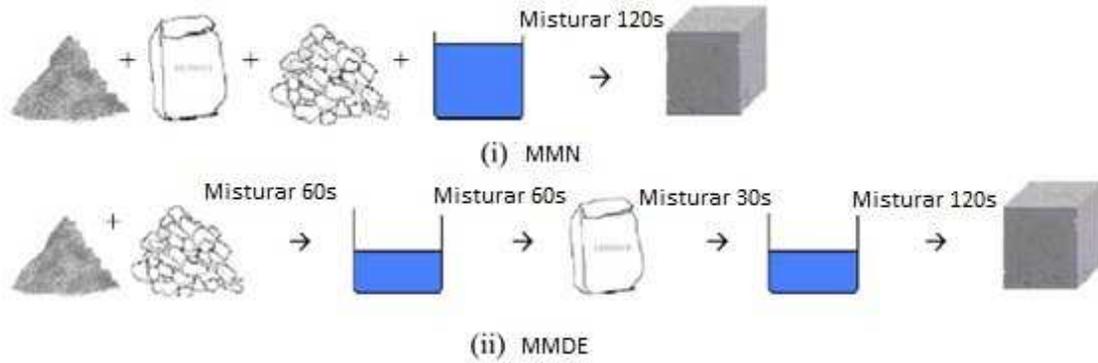


Figura 17 – Procedimentos de mistura (i) método normal (ii) método de mistura em dois estágios.
Fonte: Modificado de Tam *et al.* (2005).

Onde:

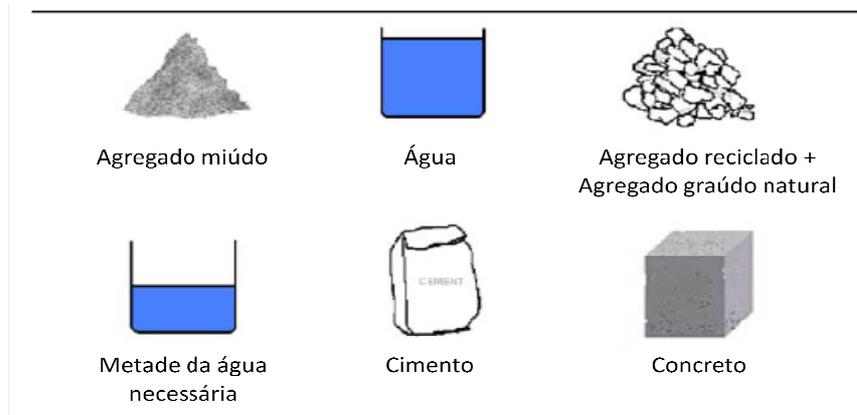


Figura 18 – Símbolos utilizados para representar os materiais.
Fonte: Modificado de Tam *et al.* (2005).

De acordo com os autores, como muitos estudos recomendam um limite de 30% de incorporação de agregado reciclado, eles estudaram substituições de 0%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%, utilizando os dois métodos de mistura, já citados anteriormente. A relação a/c adotada foi de 0,45 e o slump foi de 75 mm para os dois métodos de dosagem.

A resistência à compressão das misturas foi comparada nas idades de 7, 14, 28 e 56 dias. Os autores encontraram, em geral, melhorias graduais na resistência com o aumento das porcentagens de agregado reciclado, utilizando o método de mistura em dois estágios.

Eles explicam que o concreto é um sistema composto por três fases, sendo elas, agregado graúdo, matriz de argamassa com agregado fino e zonas de interface entre os agregados graúdos e a matriz. Estas zonas, segundo os autores, desempenham um papel crítico no concreto, determinando o desempenho mecânico do mesmo. Os autores estimam que essas zonas ocupam cerca de 20 a 40% do total de volume da matriz cimentícia, assumindo uma espessura de 40 μm .

Eles ainda explicam que, de fato, a estrutura do concreto com agregado reciclado é muito mais complicada que a do concreto convencional. Isso ocorre porque o agregado de concreto reciclado possui duas zonas de interface, sendo uma entre o agregado reciclado e a nova pasta de cimento, denominada de nova zona, e a outra entre o agregado reciclado e a antiga argamassa aderida, denominada de antiga zona, como mostrado na Figura 19.

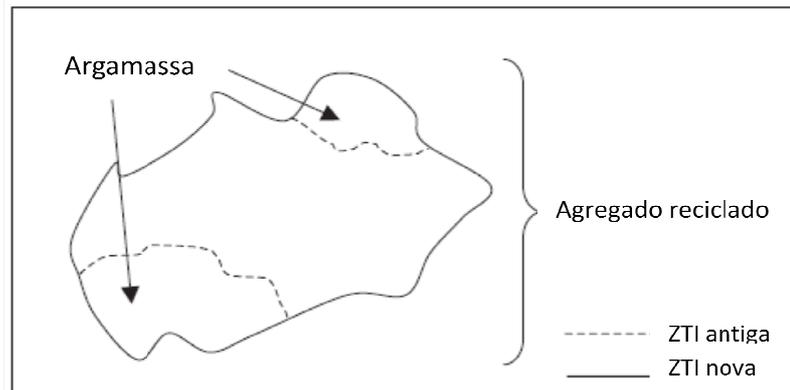


Figura 19 – Interfaces do Agregado Reciclado.
Fonte: Modificado de Tam *et al.* (2005).

A argamassa permanece na zona de transição do agregado reciclado, formando o elo fraco do concreto reciclado, que é composto de muitos poros e fissuras, o que afeta criticamente a resistência dos concretos com agregados reciclados. Esses poros e fissuras aumentam o consumo de água, deixando menos água disponível para a hidratação na zona de transição do concreto reciclado.

Em relação ao método de dosagem em dois estágios, durante o primeiro estágio de mistura, é utilizada apenas metade da água necessária, levando à formação de uma fina camada de pasta de cimento sobre a superfície do agregado reciclado, que penetrará nos poros da argamassa antiga, preenchendo as fissuras e os vazios. Na segunda etapa de mistura, a água restante é adicionada para completar o processo de mistura do concreto.

Com o objetivo de verificar o comportamento da estrutura interna dos concretos dosados por ambos os métodos, foram realizados exames de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Tam *et al.* (2005) constataram que as fissuras no agregado reciclado foram preenchidas, após a adoção do método de mistura em dois estágios, o que não ocorreu para o método de mistura normal. Portanto, mais vazios e fissuras foram encontrados entre o agregado reciclado e a argamassa para o método de mistura normal, uma vez que a completa hidratação da argamassa na zona interfacial é dificultada, devido à insuficiência de água.

Os experimentos mostram que a mistura em dois estágios pode aumentar a resistência à compressão do concreto com agregados reciclados, por desenvolver uma zona interfacial forte. Portanto, segundo os autores, como existe um aumento da resistência na região de contato pasta-agregado, a resistência do concreto, em geral, também aumenta.

As micrografias mostram uma nova zona interfacial do concreto reciclado mais forte e densa, após adotar o método de mistura em dois estágios, comparado com uma pior zona de interface proporcionada pelo método normal. Além disso, os autores constataram também que o mesmo ocorre para a zona interfacial velha (entre o agregado e a argamassa aderida), também melhorada utilizando o método em duas fases de mistura.

Segundo Tam *et al.* (2005), tanto a zona interfacial antiga, como a nova, são mais fortes com o método de mistura em dois estágios do que com o método normal. Portanto, a abordagem de mistura em dois estágios pode melhorar a zona de transição do agregado reciclado e, assim, a resistência á compressão do concreto reciclado. A Figura 20 ilustra o cenário da matriz de concreto para o método em dois estágios.

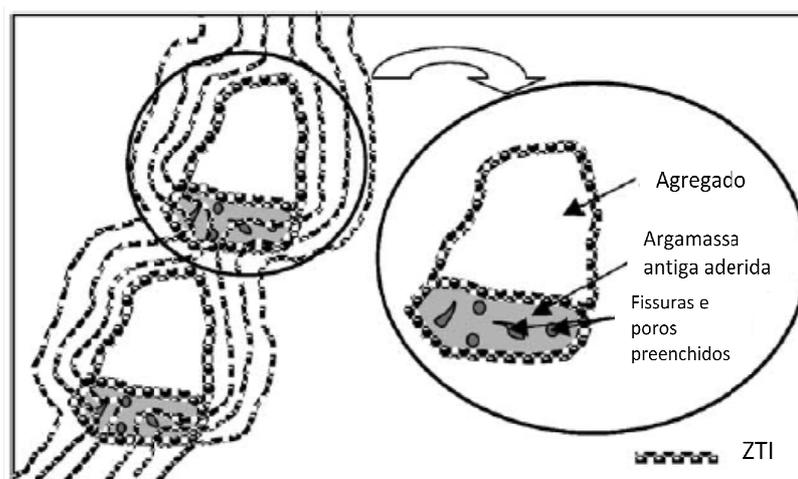


Figura 20 – Estrutura do agregado reciclado utilizando o método de mistura em dois estágios.
Fonte: Modificado de Tam *et al.* (2005).

Por fim, Tam *et al.* (2005) concluem que a má qualidade do concreto reciclado é proveniente de uma alta absorção de água, alta porosidade, uma zona interfacial mais fraca entre o agregado reciclado e a nova argamassa, dificultando a aplicação do concreto reciclado com fins estruturais.

A abordagem de mistura em dois estágios propõe reforçar o elo mais fraco do concreto reciclado, a saber, a zona de transição agregado-pasta. Esta abordagem dá lugar para a pasta

de cimento, funcionando como um gel, que irá preencher as fissuras e os poros dentro do agregado reciclado, proporcionando uma maior resistência na zona de interface.

A partir de experimentos de laboratório, a resistência à compressão foi melhorada. A abordagem de mistura em dois estágios, segundo os autores, pode fornecer um método eficaz para aumentar a resistência à compressão e outros desempenhos mecânicos do concreto reciclado e, assim, a abordagem abre um leque maior de aplicações para o concreto reciclado dosado a partir desse método.

4.4 Considerações sobre os Procedimentos de Dosagem existentes para Concretos Reciclados e as formas de mistura

De acordo com a revisão de literatura apresentada acerca de procedimentos de dosagem para concretos com agregados reciclados, nota-se que basicamente existem duas formas de dosar as misturas: compensando parte da água de absorção do agregado e não compensando. Neste trabalho, a autora irá desenvolver ambas as formas para cada método de dosagem de concretos convencionais e de alto desempenho. Os resultados serão comparados, analisando suas principais influências nas propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido.

Nos estudos pesquisados até o momento, verifica-se também que os pesquisadores da área divergem quanto à forma de misturar os materiais na betoneira, conforme será mostrado a seguir.

Primeiramente, deve-se entender que ao alterar a ordem de introdução dos materiais no misturador, pode-se estar modificando as propriedades do concreto reciclado. De acordo com Barra (1996), para uma determinada unidade de produção, o processo de mistura apresenta duas variáveis: a ordem de introdução dos materiais e o tempo de mistura. Ainda segundo a referida autora, a ordem como são adicionados os materiais na betoneira é importante, sobretudo devido à grande capacidade de absorção dos agregados reciclados em relação aos convencionais. Em estudos preliminares realizados, a referida autora verificou que para as mesmas quantidades de materiais, eram produzidos concretos reciclados de diferentes propriedades, a depender da ordem em que os materiais em colocados na betoneira.

Barra (1996) utilizou três procedimentos diferentes de mistura dos materiais na betoneira, que serão descritos a seguir.

- Procedimento “A”: (a) colocou primeiramente os agregados grossos e a água no misturador, (b) depois misturou durante 2 minutos; (c) depois deixou em repouso o agregado e a água dentro da betoneira coberta durante 3 minutos; (d) repetiu os procedimentos “b” e “c” duas vezes; (f) introduziu a areia e misturou durante 3 minutos. Tempo total de mistura: 21 minutos.
- Procedimento “B”: (a) introduziu a água e o cimento e misturou durante 3 minutos; (b) adicionou os agregados grossos e misturou durante 3 minutos; (c) colocou a areia e misturou outros 3 minutos. Tempo total da mistura: 9 minutos.
- Procedimento “C”: (a) introduziu a água e o cimento e misturou por 3 minutos; (b) colocou a areia e misturou por mais 3 minutos; (c) adicionou os agregados grossos e misturou durante 3 minutos. Tempo total da mistura: 9 minutos.

Segundo Barra (1996), nos concretos produzidos segundo o procedimento “A” se pode determinar a relação água/cimento efetiva, já que a quantidade de água que o agregado absorve se pode estabelecer a partir do coeficiente de absorção efetivo do agregado. Nos outros concretos, produzidos pelos procedimentos “B” (pasta + agregado graúdo) e “C” (argamassa + agregado graúdo), a determinação da relação água/cimento efetiva da pasta não é possível, pois não se sabe a quantidade de água que pode ter sido absorvida da pasta pelo agregado.

Barra (1996) explica que quando o agregado grosso reciclado, na condição seco ao ar, é adicionado à pasta de cimento ou à argamassa, supõe-se que ele absorverá água da pasta. A determinação da quantidade de água que o agregado absorverá é complicada, pois este fenômeno é difícil de ser quantificado. Ainda segundo a referida autora, a perda de água da pasta ou da argamassa em benefício do agregado não será uniforme, pois o agregado absorverá a água da pasta que está na zona de contato agregado-pasta. A relação água/cimento da pasta provavelmente será variável, apresentando um gradiente decrescente em direção à superfície do agregado.

Zordan (1997), com o intuito de confeccionar concretos a partir de entulho, misturou os materiais da seguinte forma: inicialmente a fração graúda do entulho foi colocada na betoneira, com cerca de 70 % da água de amassamento. Como o entulho apresentava uma alta absorção, deixou-se esta mistura na betoneira ligada, por cerca de 4 a 5 minutos, tentando-se evitar que a água necessária para a reação do cimento fosse absorvida pelo agregado graúdo,

quando a mistura estivesse completa. Depois desse procedimento, adicionou-se o cimento, a fração miúda do entulho e o restante da água, até que a consistência adotada para o concreto fosse atingida. A medida da consistência foi feita pelo abatimento do tronco de cone. Atingido o valor prescrito, os corpos de prova foram moldados.

Machado *et al* (2000) utilizou primeiro o agregado graúdo com parte da água, depois o cimento, depois o agregado miúdo e o restante da água, misturando tudo por 3 minutos.

Levy (2001) manteve fixa a forma de mistura, colocando primeiro o agregado graúdo, metade da água, depois o agregado miúdo, depois o aglomerante e o restante da água. Os agregados reciclados da pesquisa de Levy (2001) foram divididos em agregados de concreto e de alvenaria, utilizando frações miúdas e graúdas.

Leite (2001) e Vieira (2003) misturaram primeiro o agregado graúdo, um pouco da água, cimento, resto da água e por fim, a areia. Para a produção dos seus concretos, Leite (2001) observou alguns aspectos quando se utilizava agregado reciclado. Primeiro, na produção de concretos com altos percentuais de substituição, tanto do agregado graúdo, quanto do miúdo, ocorreu a necessidade da utilização de aditivo superplastificante para minimizar o efeito da textura rugosa dos agregados e ainda da sua alta taxa de absorção, que foi parcialmente compensada. O aditivo era colocado antes da colocação da areia para que a dispersão dos grãos de cimento pudesse ser mais eficaz. Outro aspecto da mistura que deve ser mencionado é que Leite (2001) e Vieira (2003) fizeram a compensação de parte da absorção de água do agregado reciclado antes da mistura dos materiais na betoneira. Essa quantidade adicional de água foi definida e variava com o percentual e o tipo de substituição de cada traço. O processo consistiu de uma pré-umidificação do material durante um intervalo de tempo de 10 minutos, definido a partir do ensaio de absorção, antes da mistura dos agregados na betoneira.

Carrijo (2005) e Ângulo (2005) utilizaram agregados graúdos de RCD e misturaram seus concretos da seguinte forma: o agregado graúdo reciclado com 70% água de absorção eram primeiramente inseridos na bateadeira e deixados em repouso. Após 10 minutos, a bateadeira era ligada e colocava-se metade da água de amassamento, o cimento, a areia e por fim o resto da água. O aditivo era adicionado até que o concreto atingisse visualmente uma consistência plástica.

Com o tempo da mistura estabelecido e a quantidade de água necessária, Gómez-Sóberon (2002) definiu a ordem da mistura dos materiais, com o intuito de garantir, sempre que possível, a imobilidade da água e o melhoramento da zona de transição. A ordem das misturas foi: (a) primeiramente os agregados graúdos e a água foram introduzidos no

misturador, (b) eles foram misturados por 2 minutos; (c) em seguida, o misturador foi desligado por 3 minutos; (d) os estágios “b” e “c” foram repetidos duas vezes; (e) o cimento foi introduzido e misturado por 3 minutos; e (f) a areia foi adicionada e misturada por 3 minutos.

Tam *et al.* (2005) desenvolveram o método de mistura em dois estágios, onde primeiro se colocavam os agregados miúdos e graúdos, misturava por 60 segundos, depois acrescentava metade da água, misturava por 60 segundos, depois colocava o cimento, misturava por 30 segundos e, por fim, o resto da água, misturando por 120 segundos.

Ferreira, de Brito e Barra (2011) produziram os concretos num misturador de eixo vertical, com capacidade de 50 litros. A primeira fase da produção das misturas que utilizaram o método de compensação de água consistiu em misturar os agregados graúdos, o cimento e água por 90 segundos. Nas misturas em que foi usado o método de pré-saturação, a primeira fase consistiu em adição de cimento (e, em seguida, os agregados graúdos restantes), adição da mistura pré-saturada de agregado reciclado e da quantidade total de água. A areia foi então adicionada num tempo de 30 s, e para finalizar o processo, um período de mistura de 180 s. O procedimento de mistura durou um total de 5 min, de acordo com a Figura 21.

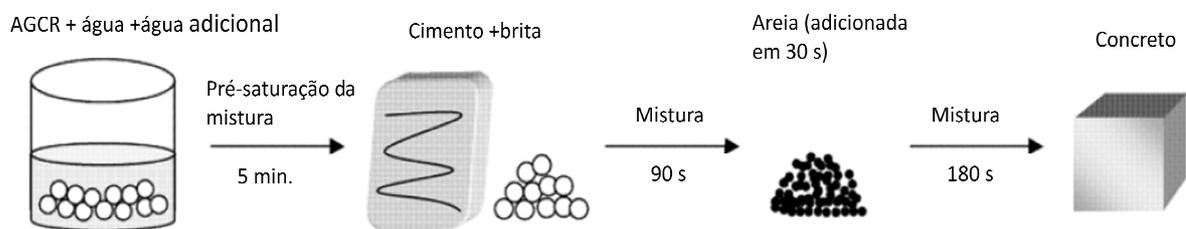


Figura 21 – Procedimento de mistura.
Fonte: Adaptado de Ferreira, de Brito e Barra (2011).

No estudo feito por Mas *et al.* (2012), a sequencia de adição dos diferentes componentes da mistura foi areia, metade do agregado graúdo (mistura por 60 segundos), depois acrescenta metade da água (mistura por 120 s), acrescenta o cimento e a segunda parte do agregado graúdo (mistura por 30 s), depois coloca a outra metade da água (mistura por 180 s), e por fim, coloca-se o aditivo (mistura por 420 s).

Diante do exposto, pode-se constatar que não existe um consenso acerca da melhor forma de introduzir os materiais no misturador, sendo necessário um estudo mais amplo para verificar diferentes formas de mistura e suas influências nas propriedades do concreto reciclado.

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A fim de se cumprir os objetivos específicos propostos, foram dosados concretos a partir de métodos convencionais e de métodos de dosagem de concretos de alto desempenho (CAD). Foram utilizados dois métodos para cada tipo de concreto, os métodos convencionais são o ACI/ABCP e o IPT/EPUSP; os métodos de CAD são o Aitcin (1998) e o Mehta/Aitcin (1990b). Para cada método citado, foram testadas misturas com compensação de parte da água de absorção dos agregados, como também sem compensação, para que se possam avaliar as influências provocadas pela adoção das diferentes formas de se dosar um concreto reciclado.

Foram feitas misturas de referência, somente com agregados naturais, e misturas com substituições de 25% e 50% de agregados miúdos naturais (AMN) por miúdos reciclados (AMR). Esses teores de substituição foram escolhidos por representarem uma situação média (50%) e uma situação intermediária entre o concreto de referência e a média (25%). Somente houve a determinação de teores de substituição para realizar os estudos de dosagem com teores de incorporação fixos, que são essenciais para a comparação entre os métodos de dosagem.

Neste capítulo serão apresentadas as etapas necessárias que foram cumpridas para o desenvolvimento do programa experimental desta pesquisa, a saber, o beneficiamento e caracterização do resíduo, os materiais utilizados e suas caracterizações, os ensaios realizados para as misturas de argamassa e concreto nos estados fresco e endurecido, o estudo de dosagem das misturas e as quantidades de corpos-de-prova moldados.

5.1 Resíduo de Construção e Demolição (RCD)

5.1.1 Definição da empresa geradora

O resíduo de construção e demolição foi proveniente do canteiro de obra de uma construtora da cidade de Salvador. Esta obra trata-se de um condomínio residencial composto por duas torres, com área de lazer e garagem integradas. São dois níveis de garagem, um playground e 15 pavimentos-tipo em cada torre, com 5 apartamentos por andar, num total de área construída de 25.186,45m².

Esta obra possui um PGRCC – Programa de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil, tendo boas práticas de coleta, acondicionamento, segregação e destinação

de resíduos em seu canteiro, sendo esse o maior motivo de sua escolha. A seguir tem-se a Tabela 13, que correlaciona os diferentes estágios da obra com os materiais e sistemas adotados.

Tabela 13 – Estágios da obra x Materiais e sistemas adotados.

Estágio	Materiais e Sistemas Adotados
Fundação	Estaca metálica com bloco de coroamento, cintas e vigas em concreto armado. Sem forma, apenas chapiscado.
Estrutura	Em concreto armado convencional (pilares, vigas e lajes), com fôrmas de madeira, travamentos de madeira para as vigas e metálicos para os pilares. Escoras metálicas.
Vedações Verticais	Alvenarias de blocos cerâmicos não paginada, assentados com argamassa.
Revestimentos	Serão utilizados diversos tipos de revestimentos. Pisos: contra-piso, cerâmica, porcelanato. Paredes: chapisco, argamassa de revestimento e cerâmica, pastilha ou pintura.
Forros	Placas de gesso.
Impermeabilização	Membranas asfálticas moldadas no local para piscinas, reservatórios e área descoberta (play).
Instalações	Inclui instalações elétricas, hidrossanitárias, telefônicas e de gás completas e preparação para lógica e ar condicionado.

O Programa de Gerenciamento de Resíduo dessa obra foi desenvolvido pelo SENAI e ocorreu considerando a necessidade de segregação por meio de dispositivos de coleta que facilitam o trabalho de triagem realizado pelos operários. A escolha dos dispositivos, sua distribuição e sinalização foram feitas de modo a facilitar a remoção e permitir sua destinação adequada, mantendo-se sempre o controle sobre o fluxo dos resíduos através de seu registro documental.

Como dispositivos de acondicionamento, a obra utiliza bombonas, bags, baias e caçambas estacionárias. Além disso, os dispositivos foram devidamente sinalizados de acordo com o material que deveriam conter.

As bombonas eram dispostas em grupos de quatro para resíduos Classe B: plástico, papel, metal e madeira. Por ser uma obra vertical, foi prevista a alocação de um conjunto de bombonas por pavimento, de preferência num local central ou próximo ao dispositivo de transporte vertical (elevador de carga ou grua). Para armazenamento final dos resíduos de plástico e papel eram utilizados os bags e para resíduos de metal, madeira e gesso eram utilizadas baias ou caçambas. A Figura 23 ilustra os bags posicionados no canteiro e as bombonas posicionadas em um dos pavimentos-tipo.

Os resíduos Classe A (alvenaria, concreto, argamassa, cerâmica) eram acondicionados em caçambas estacionárias ou baias localizadas em pontos diferentes no entorno da edificação. Além disso, as duas torres possuem dutos coletores de entulho (Figura 22), que facilitam o transporte vertical do resíduo Classe A, despejando-o em baias ou caçambas.



Figura 22 - Duto coletor de entulho.

No refeitório e na cozinha as latas de lixo possuíam tampa para disposição de resíduos orgânicos e resíduos de vidros.

A destinação final dos resíduos desta obra leva em consideração dois aspectos, o princípio da destinação comprometida ambientalmente e a viabilidade econômica. Os resíduos Classe A, foco desta pesquisa, eram britados num moinho de martelo e reutilizados na massa de contrapiso dos pavimentos-tipo. Os resíduos desta Classe que, por algum motivo, não poderiam ser reciclados eram destinados num aterro licenciado de resíduos Classe A da Região Metropolitana de Salvador (RMS).



Figura 23 – a) Bags para armazenamento de materiais leves; b) Bombonas nos pavimentos.

5.1.2 Coleta, transporte e Segregação do RCD

A coleta e segregação dos resíduos ocorreram no próprio canteiro de obras na baia de resíduos Classe A, como ilustra a Figura 24. O entulho foi separado manualmente a fim de determinar sua composição gravimétrica em frações de argamassa, concreto, alvenaria e outros (classificam-se como “outros” as partes contendo mais de um resíduo, como por exemplo, parte de blocos cerâmicos com argamassa aderida). As frações constituintes estão ilustradas na Figura 25.

É importante comentar a fase em que se encontra a obra na época da coleta dos resíduos, pois isso tem influência direta na composição final do entulho. Por exemplo, durante a fase de coleta do resíduo foco deste trabalho, a obra se encontrava em fase de elevação de alvenaria de blocos cerâmicos, portanto praticamente 50% da fração de cerâmica é que compõe o entulho geral, sendo seguida por argamassa, concreto e outros.



Figura 24 - a) Baia de Resíduo Classe A; b) Aspecto do resíduo da obra.



Figura 25 - a) Frações Argamassa e Material Cerâmico; b) Frações Concreto e “Outros”.

Após a separação nas bandejas plásticas, as frações eram empilhadas em sacos de 50 litros, que eram pesados com o auxílio de uma balança digital, aferida, com capacidade máxima de 150 kg e precisão de 0,1 g (Figura 26).



Figura 26 - a) Sacos empilhados com as frações de entulho; b) Balança utilizada na composição gravimétrica.

Após a pesagem das frações constituintes do resíduo, foi determinada a composição gravimétrica do mesmo, ilustrada na Figura 27 a seguir.

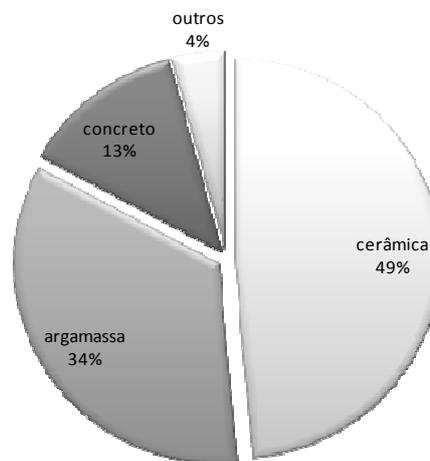


Figura 27 - Composição gravimétrica do resíduo em estudo

Após a verificação da composição gravimétrica, as frações do entulho foram britadas na própria obra e, em seguida, transportadas para o laboratório de Materiais de Construção da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, onde esse agregado seria peneirado e, posteriormente, caracterizado.

5.1.3 Britagem e Classificação granulométrica do RCD

A britagem do resíduo ocorreu num britador de martelo no próprio canteiro de obras. Este britador pertence à Construtora e já era utilizado anteriormente para britar resíduos “Classe A” a fim de incorporar os agregados provenientes do mesmo na massa de contrapiso.

O britador de martelo (Figura 28) é um tipo de máquina que fornece um agregado reciclado de granulometria mais fina em comparação com o britador de mandíbulas.



Figura 28 - a) Britador de martelo; b) Aspecto interno do britador; c) Operação de britagem.

Terminada a fase de britagem, os resíduos, já transformados em agregados, foram transportados até o laboratório de Materiais de Construção da UFBA em caminhão cedido pela Construtora. No laboratório estes agregados foram peneirados em peneira de malha 4,75 mm, a fim de determinar a faixa granulométrica de utilização da areia reciclada (Figura 29).

Foi utilizado como agregado miúdo reciclado toda porção passante na peneira de malha 4,75 mm.



Figura 29 - a) Peneiramento #4,75 mm; b) Fração retida; c) Fração passante.

5.1.4 Caracterização do RCD

Para os ensaios com agregados reciclados, foram utilizados os mesmos procedimentos normalizados para agregados convencionais, com exceção do ensaio de absorção, realizado a partir do método proposto por Leite (2001) e adaptado por Reis (2009).

Os agregados miúdos reciclados tiveram as seguintes características físicas determinadas: massa específica (NBR NM 52, 2009), absorção (Proposta de Norma para o ensaio de determinação da absorção de água de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição – LEITE, 2001), massa unitária em estado solto (NBR NM 45, 2006), composição granulométrica, segundo NBR NM 248 (2003) (granulometria, dimensão máxima característica e módulo de finura), teor de materiais pulverulentos (NBR NM 46, 2003) e impurezas orgânicas (NBR NM 49, 2001).

Foi determinada, também, a área superficial específica (BET), utilizando-se o equipamento Nova 1000 *Quantachrome*, usando nitrogênio como gás adsorvente, após preparação em vácuo à 200°C por 3 horas.

A Tabela 14 mostra os resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo reciclado utilizado neste estudo.

Tabela 14 – Resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo reciclado.

Materiais Pulverulentos	NBR NM 46, 2003	6,09%
Massa Específica	NBR NM 52, 2009	2,46 kg/dm ³
Impurezas Orgânicas	NBR NM 49, 2001	Apresentou uma coloração mais clara que a amostra padrão – ok.
Massa Unitária Solta	NBR NM 45, 2006	1,16 kg/dm ³
Granulometria	NBR NM 248, 2003	Módulo de finura: 2,44
		Dimensão Máxima Característica: 4,75 mm

Tabela 15 – Requisitos da NBR 15.116 (ABNT, 2004).

Requisitos	Resíduo de Concreto	Resíduo Misto
ABS (%)	< 7 (graúdo)	< 12 (graúdo)
	< 12 (miúdo)	< 17 (miúdo)
Fração < # 75 µm (% em massa)	10 (graúdo)	10 (graúdo)
	15 (miúdo)	20 (miúdo)
Outros	Pré-saturação dos agregados (resistência de 10-15 MPa)	

A Tabela 15 mostra alguns requisitos estabelecidos pela NBR 15.116/2004. Esta norma só recomenda o emprego dos agregados de RCD em concretos com resistência de até 15 MPa, além de indicar a utilização dos agregados reciclados pré-saturados.

A areia reciclada teve uma área superficial específica de 10,1 m²/g, enquanto que a da areia natural foi de 4,2 m²/g. Como a área específica do AMR é mais que o dobro da área da areia natural, quando se utilizar areia reciclada nas misturas, será necessária uma área de molhagem maior para envolver todos os grãos. Isso implica em dizer, que nas misturas com agregado reciclado, haverá uma necessidade de se utilizar mais água ou aditivos para reduzir a fricção entre os grãos, a fim de que as misturas recicladas atinjam a mesma trabalhabilidade das misturas convencionais.

A Figura 30 mostra a curva granulométrica do agregado miúdo reciclado, em que se encontra dentro dos limites da zona ótima inferior e superior.

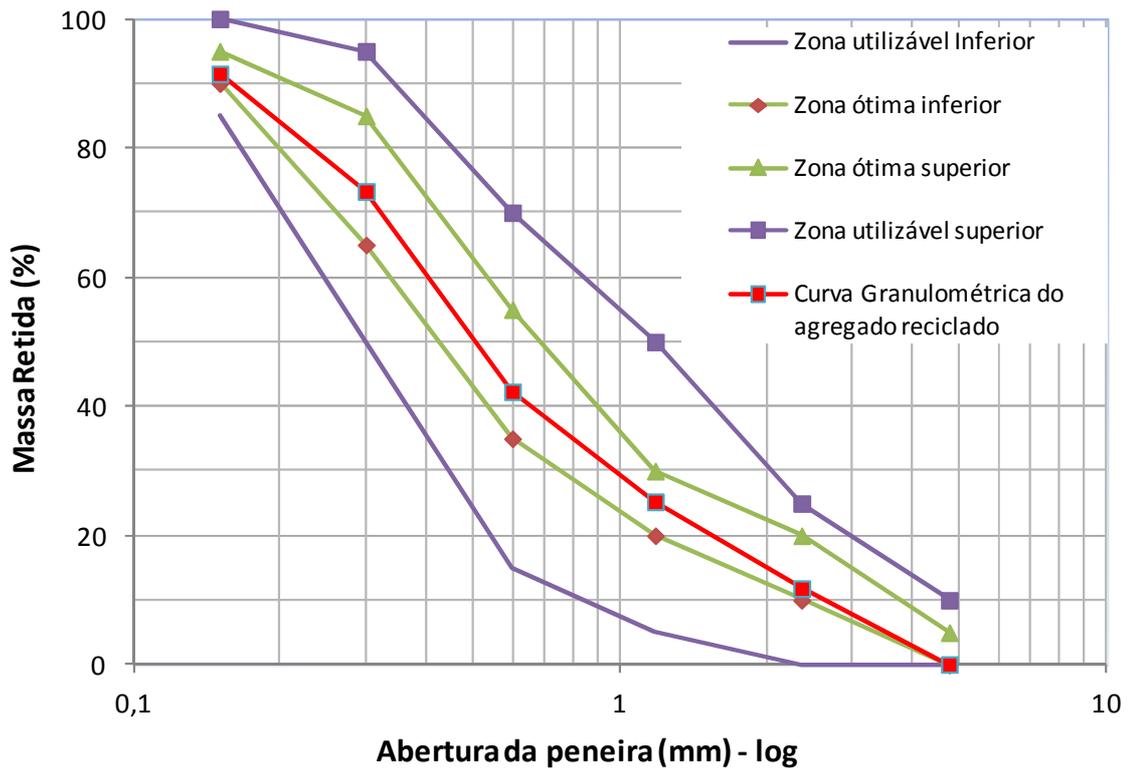


Figura 30 – Curva Granulometria do Agregado miúdo reciclado.

A distribuição granulométrica dos finos da areia reciclada foi determinada através do ensaio de difração a laser (Cilas 1180L). Os resultados estão apresentados na Tabela 16 e o gráfico da distribuição dos finos do AMR está ilustrado na Figura 31.

Tabela 16 – Distribuição granulométrica finos da areia reciclada.

Diâmetro	Areia de RCD (menor que 0,106 mm)
	μm
Diâmetro a 10%	4,64
Diâmetro a 50%	45,67
Diâmetro a 90%	88,73
Diâmetro Médio	46,95

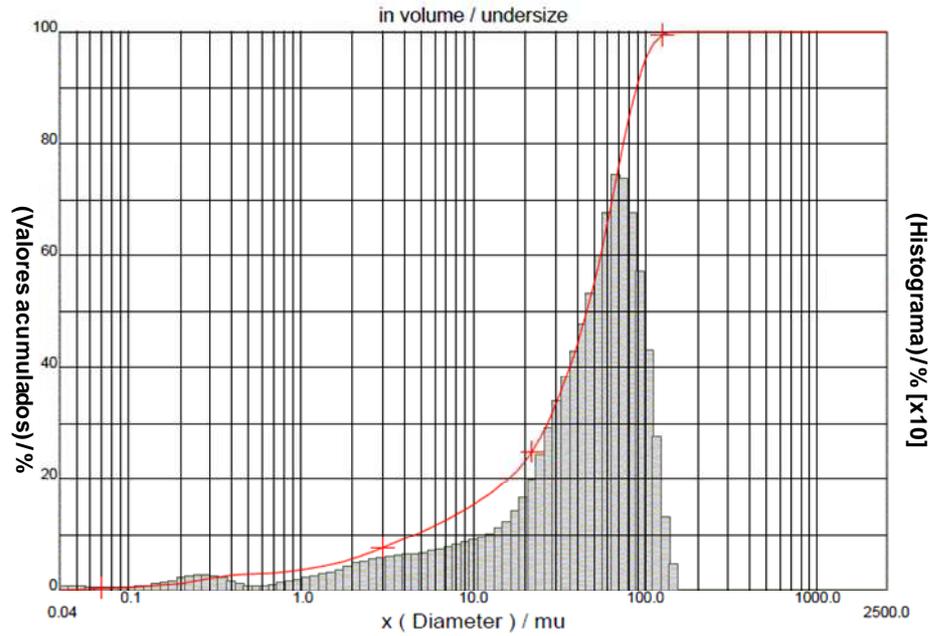


Figura 31 – Distribuição granulométrica dos finos do agregado miúdo reciclado.

A Figura 32 apresenta as micrografias realizadas para o agregado miúdo reciclado desta pesquisa.

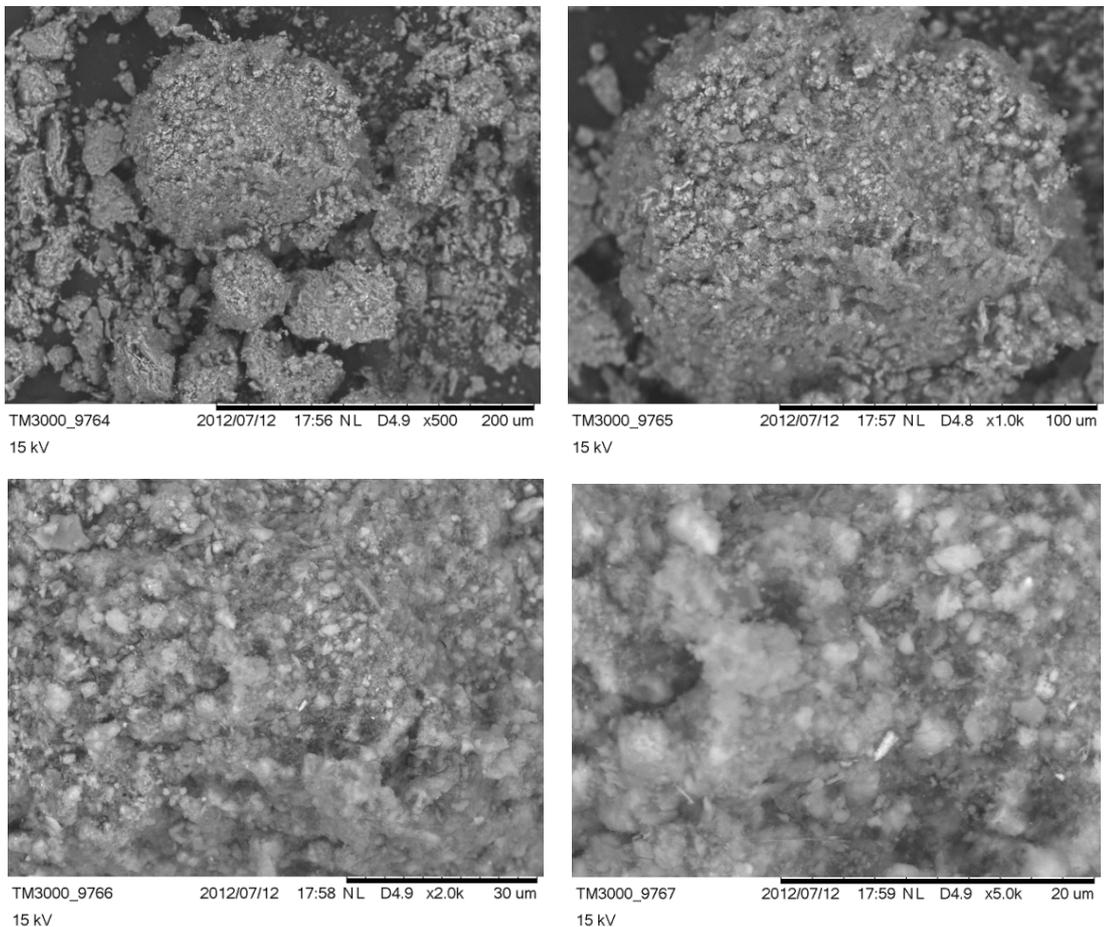


Figura 32 – Microscopia eletrônica de varredura da areia reciclada em quatro tamanhos diferentes.

Pode-se notar pelas imagens acima que a morfologia do grão da areia reciclada é semelhante à esférica, porém com contornos irregulares. Nota-se, também, a rugosidade e porosidade da superfície do AMR, características que influenciam nos parâmetros de dosagem como teor de água, teor de pasta, além de outros, em misturas de concretos e argamassas. Grãos rugosos favorecem um maior intertravamento das misturas, devido ao aumento da tensão cisalhante entre os mesmos, proporcionando uma maior dificuldade no escoamento.

A Figura 33 ilustra os resultados de coloração para o ensaio de impurezas orgânicas realizado.



Figura 33 – Ensaio de Impurezas Orgânicas.

A solução central é a padrão e as duas laterais são referentes às duas amostras do resíduo ensaiadas. Pode-se perceber que a coloração da solução padrão é mais forte que a das outras duas, estando, portanto o teor de impurezas orgânicas dentro dos limites aceitáveis, de acordo com a NBR NM 49 (2001).

A Figura 34 a seguir ilustra o ensaio de absorção para agregados reciclados, proposto inicialmente por Leite (2001) e adaptado por Reis (2009). A Figura 36 apresenta o gráfico obtido a partir da realização do ensaio de absorção pelo tempo.

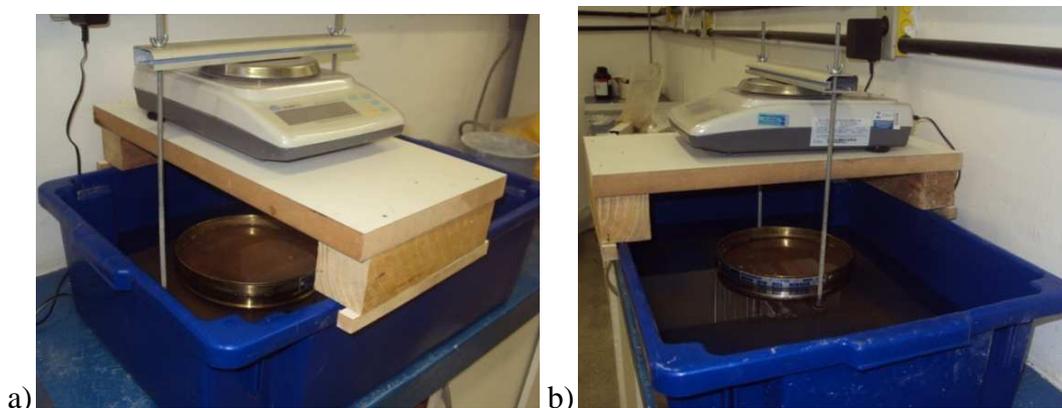


Figura 34 – Ensaio de Absorção de agregados reciclados (Leite, 2001) adaptado por Reis (2009).

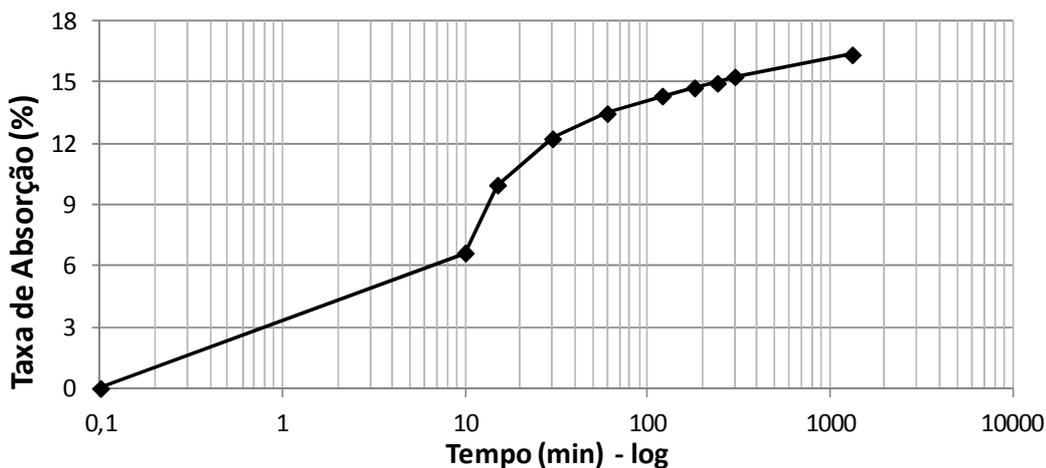


Figura 35 – Relação entre a taxa de absorção e o tempo para o agregado reciclado.

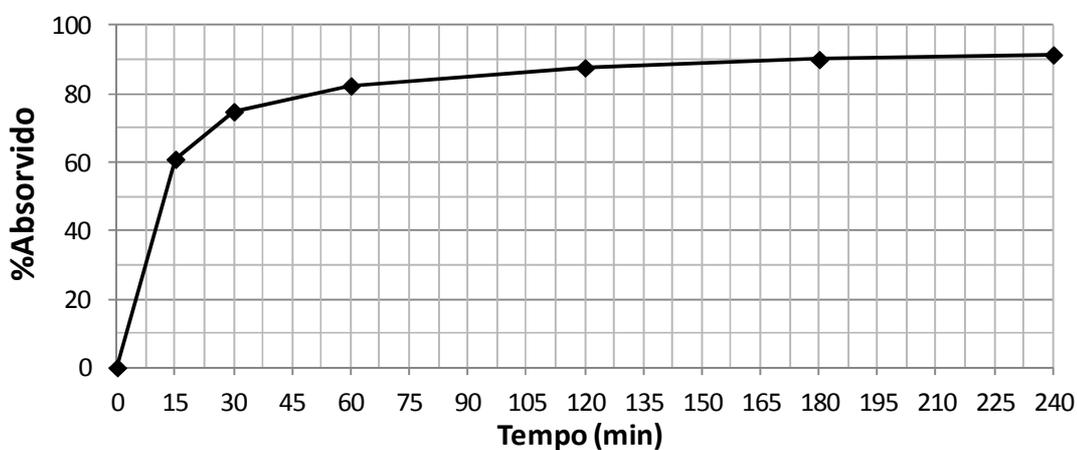


Figura 36 – Relação entre o ganho de massa e o tempo para o agregado reciclado.

A partir deste ensaio pôde-se obter a taxa de absorção total do agregado, que foi de 16,35%, taxa esta utilizada para fazer a compensação de parte da água de absorção dos agregados reciclados.

Foi utilizada como taxa de compensação a porcentagem absorvida referente ao tempo de 10 minutos. Para o agregado reciclado deste estudo, essa taxa correspondeu a 40,71%. Pode-se perceber pelo gráfico que o maior ganho de massa pelo AMR é até os 15 primeiros minutos, no entanto, este tempo é muito alto para se esperar o pré-umedecimento do agregado antes da mistura. Logo, adotou-se nesta pesquisa a taxa de compensação para um tempo de 10 minutos.

5.2 Materiais Utilizados

5.2.1 Cimento

Na execução dos concretos e argamassas foi utilizado o cimento Portland composto CP V - ARI (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial). Este tipo de cimento foi escolhido por não possuir adição pozolânica, fato este que pode influenciar nos resultados dos ensaios, além de conferir uma alta resistência inicial logo nas primeiras idades. As características químicas, físicas e mineralógicas do cimento utilizado foram provenientes do fabricante. As Tabelas a seguir mostram essas características.

Tabela 17 – Composição química do CP V ARI.

Composição Química (%)	
Perda ao fogo	3,92
RI	1,49
SO ₃	3,46
CaO livre	2,14

Tabela 18 – Resistência à Compressão do CP V ARI.

Resistência à Compressão (MPa)	
01 dia	18,05
03 dias	30,88
07 dias	34,34
28 dias	45,44

Tabela 19 – Finura, Expansibilidade, Pega e Consistência do CP V ARI.

Finura				Expansibilidade	Pega		Consistência
Massa específica (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	#325 (%)	#200 (%)	Quente (mm)	Início (mm)	Fim (mm)	Normal (%)
3,11	4.200	3,10	0,15	0,50	145	210	28,80

A caracterização do cimento fornecida pelo fabricante está de acordo com a NBR 5733 (ABNT, 1991).

5.2.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi areia natural de origem quartzosa, comercializada no mercado de Salvador e utilizada toda a fração passante na malha de # 4,75 mm, sendo descartada toda fração superior a este valor.

Os agregados miúdos tiveram as seguintes características físicas determinadas: massa específica (NBR NM 52, 2009), massa unitária em estado solto (NBR NM 45, 2006), composição granulométrica, segundo NBR NM 248 (2003) (granulometria, dimensão máxima característica e módulo de finura), teor de materiais pulverulentos (NBR NM 46, 2003) e impurezas orgânicas (NBR NM 49, 2001).

Tabela 20 – Resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo natural.

Materiais Pulverulentos	NBR NM 46, 2003	4,38%
Massa Específica	NBR NM 52, 2009	2,62 kg/dm ³
Impurezas Orgânicas	NBR NM 49, 2001	Apresentou uma coloração mais clara que a amostra padrão – ok.
Massa Unitária Solta	NBR NM 45, 2006	1,57 kg/dm ³
Granulometria	NBR NM 248, 2003	Módulo de finura: 1,52
		Dimensão Máxima Característica: 1,18 mm

A Figura 37 ilustra a curva granulométrica da areia natural utilizada.

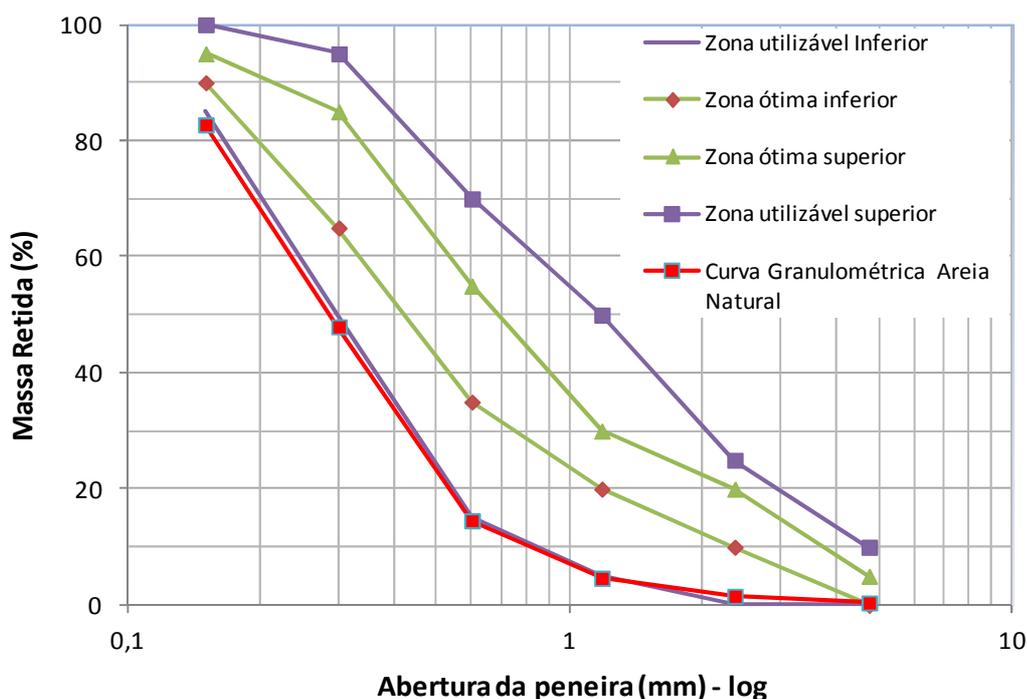


Figura 37 – Curva granulométrica da Areia natural.

5.2.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi pedra britada de origem granítica, doada por uma Pedreira da região metropolitana de Salvador, possuindo uma dimensão máxima característica de 19 mm.

As características físicas determinadas para o agregado graúdo foram: massa específica e absorção (NBR NM 53, 2003), massa unitária em estado compactado e seco (NBR NM 45, 2006), composição granulométrica, de acordo com NBR NM 248 (2003) (granulometria, dimensão máxima característica e módulo de finura), teor de materiais pulverulentos (NBR NM 46, 2003).

A Tabela 21 mostra os resultados obtidos dos ensaios de caracterização do agregado graúdo utilizado.

Tabela 21 – Resultados dos ensaios de caracterização do agregado graúdo natural.

Materiais Pulverulentos	NBR NM 46, 2003	0,59%
Massa Específica	NBR NM 53, 2003	2,73 kg/dm ³
Absorção	NBR NM 53, 2003	0,52%
Massa Unitária compactada	NBR NM 45, 2006	1,50 kg/dm ³
Granulometria	NBR NM 248, 2003	Módulo de finura: 7,0
		Dimensão Máxima Característica: 19,0 mm

A Figura 38 apresenta a Curva Granulométrica da Brita utilizada.

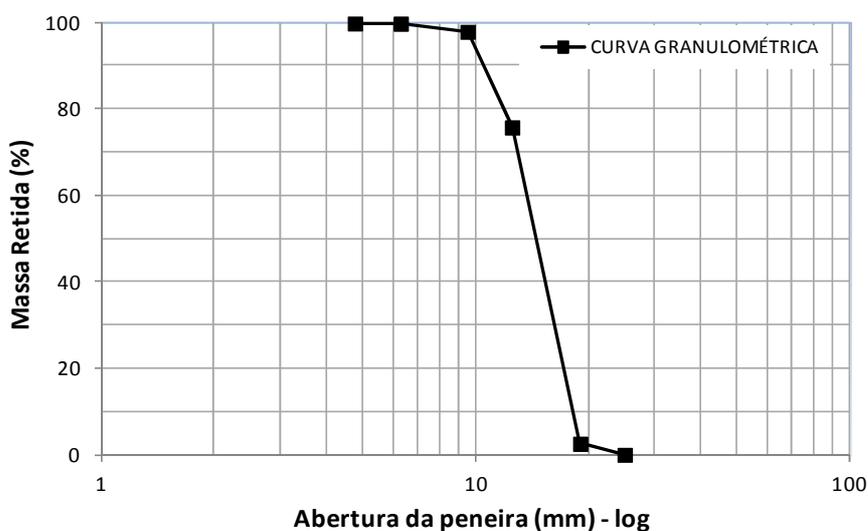


Figura 38 – Curva granulométrica do agregado graúdo.

5.2.4 Superplastificante

O aditivo utilizado é um superplastificante de terceira geração para concreto. Ele tem aspecto líquido, cor branca turva e base química de éter policarboxílico.

Este aditivo é baseado em uma cadeia de éter policarboxílico modificado que atua como dispersante do material cimentício, propiciando super plastificação e alta redução água, tornando o concreto com maior trabalhabilidade sem alteração do tempo de pega.

A sua utilização é recomendada para fabricação de todo tipo de concreto onde se necessita baixo fator a/c e alta fluidez, além disso, é compatível com todos os tipos de Cimento Portland.

De acordo com a ficha técnica do fabricante, o que diferencia este superplastificante dos aditivos superplastificantes tradicionais (à base de naftaleno sulfonato ou melamina sulfonada) é o tipo de mecanismo de ação que melhora sensivelmente a dispersão das partículas de cimento. Os polímeros tradicionais normalmente são absorvidos pelas partículas de cimento, estas recobrem a superfície das partículas no processo de mistura do concreto.

O fabricante explica que os grupos sulfônicos das cadeias de polímeros aumentam a carga negativa da superfície das partículas de cimento e dispersam estas por repulsão elétrica. Este mecanismo eletrostático causa a dispersão da pasta de cimento e a consequência positiva é que se requer menos água na mistura para se obter uma determinada consistência do concreto.

Para uma utilização de acordo com a ficha técnica do produto, este aditivo deve ser adicionado após o final da mistura dos componentes do concreto, (Cimento Portland, água e agregados, etc.), ou junto à segunda parte da água de amassamento que será utilizada na mistura. Nunca deve ser adicionado aos componentes secos do concreto ou cimento.

A dosagem recomendada pelo fabricante é de 0,2 a 1,0% sobre o peso de cimento. Estas dosagens são orientativas, sendo imprescindível a realização de testes laboratoriais e/ou de campo. Ainda segundo o fabricante, a dosagem ótima deste aditivo para uma boa redução de água (>20%) pode variar de acordo com a temperatura ambiente, tipo de cimento, quantidade de finos na mistura, fator a/c, condições de mistura, tipos de agregados, etc.

5.3 Metodologia

Neste tópico serão descritos os procedimentos para avaliar a influência da incorporação de agregado de resíduo de construção e demolição nas propriedades das argamassas e dos concretos nos estados fresco e endurecido.

5.3.1 Argamassa

O estudo das argamassas não foi realizado com o objetivo prioritário de desenvolver uma aplicação para as mesmas, e sim de se estudar as argamassas dos concretos que seriam produzidos com e sem resíduo para avaliar a influência do agregado reciclado nas misturas, a partir de ensaios de reologia, resistência à compressão axial, absorção por imersão e termogravimetria.

Para desenvolver o estudo com as argamassas do concreto, fixou-se um traço de 1:1,5 (cimento: areia), considerando ser este representativo em relação aos traços de concretos obtidos no estudo de dosagem, já que a proporção cimento:areia dos concretos em estudo ficaram em torno de 1:1,7.

Para o estudo das argamassas, foram utilizados três fatores a/c: 0,4, 0,5 e 0,6, sendo as amostras analisadas em seus estados fresco e endurecido. Foram moldados 16 corpos-de-prova para cada traço, mais uma amostra coletada num saquinho para a análise termogravimétrica, de acordo com a Figura 39.

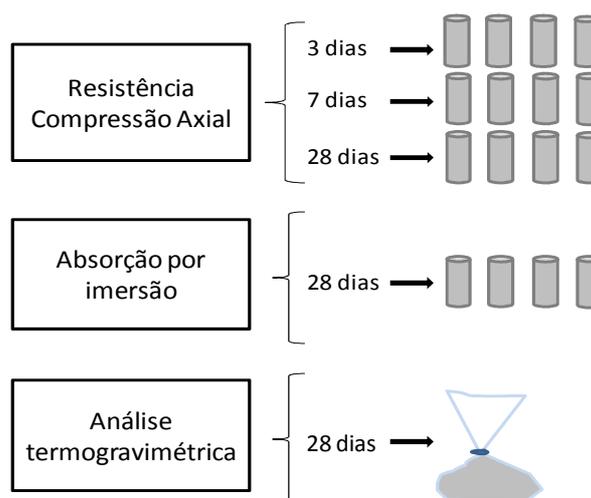


Figura 39 – Distribuição dos corpos-de-prova de argamassa por ensaio.

As argamassas estão divididas em:

- ARG REF: argamassas de referência, somente com agregados naturais.

- ARG 25%AMR: argamassas com 25% de substituição do agregado miúdo natural (AMN) pelo agregado miúdo reciclado (AMR), que tiveram suas taxas de absorção parcialmente compensadas;
- ARG 25% AMR SC: argamassas com 25% de substituição do agregado miúdo natural (AMN) pelo agregado miúdo reciclado (AMR), sem compensação;
- ARG 50%AMR: argamassas com 50% de substituição do agregado miúdo natural (AMN) pelo agregado miúdo reciclado (AMR), que tiveram suas taxas de absorção parcialmente compensadas;
- ARG 50% AMR SC: argamassas com 50% de substituição do agregado miúdo natural (AMN) pelo agregado miúdo reciclado (AMR), sem compensação.

5.3.1.1 Argamassa no estado fresco

Para a análise das argamassas no estado fresco, utilizou-se o ensaio de mesa de consistência (*flow table*) de acordo com a NBR 7215/1996, e o viscosímetro Brookfield (Figura 40).

O viscosímetro Brookfield possui rotação controlada que mede a viscosidade da argamassa através da rotação do “spindle” (palheta), que fica imerso no fluido, além de atuar em faixas limitadas de torque. Quando o torque é aplicado ao fluido, ocorre a medida do cisalhamento resultante. O ensaio foi realizado no Labest (Laboratório de Estruturas – COPPE/UFRJ), onde os quinze traços foram reproduzidos em quantidade menor, porém suficiente para fazer as análises reológicas.

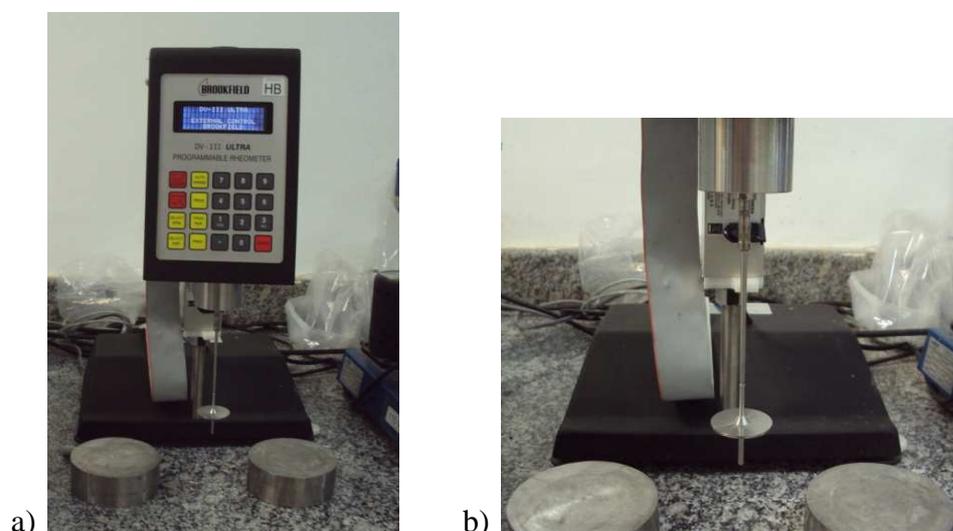


Figura 40 – a) Viscosímetro Brookfield; b) Detalhe do *spindle* utilizado.

A Figura 41 apresenta a programação de ensaio adotada para o viscosímetro Brookfield. O procedimento consiste em impor às argamassas velocidades de rotação crescentes (15 a 75 rpm) em patamares iguais de 20 segundos.

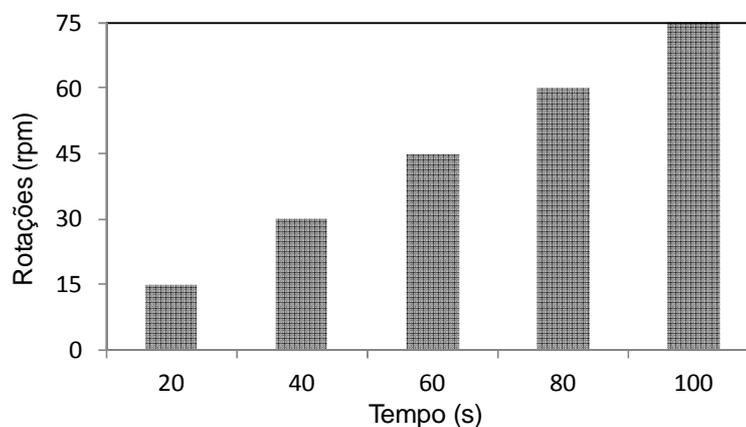


Figura 41 – Programação feita no Viscosímetro Brookfield.

5.3.1.2 Argamassa no estado endurecido

Para se avaliar as propriedades das argamassas convencionais e recicladas, no estado endurecido, foram realizados os ensaios abaixo.

- Resistência à Compressão Axial – NBR 7215 (ABNT, 1996)

Para a análise das argamassas no estado endurecido foi realizado o ensaio de Resistência à compressão axial nas idades de 3, 7 e 28 dias, com quatro exemplares de corpos-de-prova para cada idade. Estes foram moldados, curados imersos em água saturada de cal até as idades do ensaio, e capeados com mistura de enxofre a quente, com todas as etapas de acordo com a NBR 7215 (1996).

- Absorção por Imersão - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica – NBR 9778 (ABNT, 2005)

Foram realizados ensaios de absorção para avaliar a influência da adição de agregados reciclados nesta propriedade, bem como na sua porosidade e massa específica. Os ensaios foram feitos na idade de 28 dias, com quatro corpos-de-prova para esta idade.

- Análise termogravimétrica

Esta análise foi realizada com o intuito de verificar a influência da incorporação de agregado reciclado nas argamassas com a/c = 0,5, através da variação da água combinada das misturas para os diferentes percentuais de substituição.

Para as análises termogravimétricas, as argamassas foram preparadas e conservadas em sacos plásticos selados, sem troca de CO₂ ou umidade com o ambiente, até a idade da realização do teste. As condições experimentais empregadas foram: atmosfera inerte (N₂), faixa de temperatura entre a temperatura ambiente (22 ± 1°C) e 1000°C, taxa de aquecimento de 10°C/min., cadinho de platina e massa do material analisado em torno de 10 mg. Na idade de 28 dias, as amostras foram trituradas e a hidratação foi interrompida com o uso de acetona a fim de manter as mesmas condições de cura até o momento do ensaio, pois este não ocorreu no mesmo dia para todas as amostras. O equipamento utilizado para as análises, mostrado na Figura 42b, foi o modelo TA *Instruments* SDT Q600 TGA/DTA/DSC Simultâneo.

As análises térmicas foram realizadas no Laboratório de Estrutura da Coordenação de Programas de Pós-Graduação em Engenharia (COPPE/UFRJ). A Figura 42a ilustra a fase de trituração da amostra.

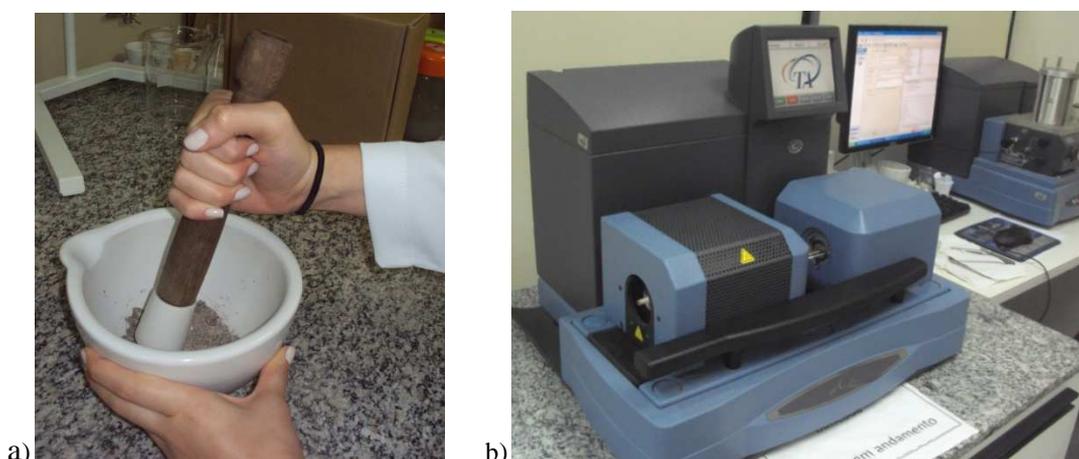


Figura 42 – Análise Termogravimétrica. a) Preparação da amostra no cadinho; b) Equipamento utilizado para o ensaio.

Para calcular a quantidade de água quimicamente combinada das argamassas, foram utilizadas as Equações a seguir (GONÇALVES, TOLEDO FILHO e FAIRBAIRN, 2006):

$$RHC = \frac{M_{tiCH} - M_{tfCH}}{M_{1000^{\circ}C}} \quad \text{Equação 23}$$

$$TH = \frac{M_{100^{\circ}C} - M_{tfCH}}{M_{1000^{\circ}C}} \quad \text{Equação 24}$$

$$OH = TH - RHC \quad \text{Equação 25}$$

Onde: RHC é a quantidade de água quimicamente combinada relativamente ao hidróxido de cálcio em relação à perda de massa a 1000°C; M_{tiCH} é a massa referente a temperatura inicial do pico característico ao CH (%); M_{tfCH} é a massa referente a temperatura final do pico característico ao CH (%); TH é a quantidade de água quimicamente combinada dos hidratos entre 100°C e a temperatura final do pico característico ao CH (%); $M_{100^{\circ}C}$ é a massa referente a temperatura de 100°C (%); $M_{1000^{\circ}C}$ é a massa referente a temperatura de 1000°C (%); OH é a diferença entre a quantidade de água quimicamente combinada entre 100°C - temperatura final do CH e a água combinada inerente ao CH.

5.3.2 Concreto

Para confeccionar as misturas de concreto foram utilizados quatro métodos de dosagem, sendo dois para concretos convencionais, ACI/ABCP e IPT/EPUSP e dois para concretos de alto desempenho, Mehta/Aitcin e Aitcin, mantendo fixo entre eles o fator água/cimento de 0,50 e o abatimento de 70 ± 10 mm.

De cada método foram confeccionados um concreto de referência (sem adição de resíduo) e quatro concretos com agregados reciclados, sendo dois nos teores de 25% e 50% AMR com compensação e os outros dois 25% e 50% AMR sem compensação.

Para cada traço foram moldados 23 corpos-de-prova, distribuídos de acordo com o esquema da Figura 43.

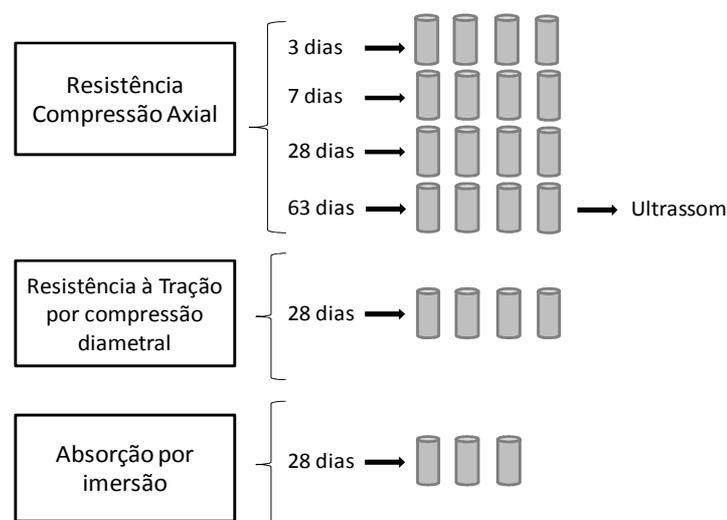


Figura 43 – Distribuição dos corpos-de-prova de concreto por ensaio.

Os concretos estão divididos em:

- CONC REF: concretos de referência, somente com agregados naturais;
- CONC 25%AMR: concretos com 25% de substituição do agregado miúdo natural (AMN) pelo agregado miúdo reciclado (AMR), que tiveram suas taxas de absorção parcialmente compensadas;
- CONC 25% AMR SC: concretos com 25% de substituição do agregado miúdo natural (AMN) pelo agregado miúdo reciclado (AMR), sem compensação;
- CONC 50%AMR: concretos com 50% de substituição do agregado miúdo natural (AMN) pelo agregado miúdo reciclado (AMR), que tiveram suas taxas de absorção parcialmente compensadas;
- CONC 50% AMR SC: concretos com 50% de substituição do agregado miúdo natural (AMN) pelo agregado miúdo reciclado (AMR), sem compensação.

Essas misturas foram avaliadas nos estados fresco e endurecido, de acordo com as metodologias descritas a seguir.

5.3.2.1 Concreto no estado fresco

Com o intuito de avaliar a trabalhabilidade dos concretos produzidos com agregados reciclados, foi utilizado o ensaio de abatimento do tronco de cone – NBR NM 67 (ABNT, 1998). Este ensaio foi realizado com o objetivo de controlar a produção dos concretos desenvolvidos, ou seja, o ensaio tem um caráter qualitativo dentro do desenvolvimento do experimento.

É importante ressaltar que para os concretos com resíduo incorporado, a medida de trabalhabilidade pelo *slump test* não é muito representativa. O que se percebe é que devido às características do agregado reciclado, como textura rugosa, grãos lamelares e alta absorção que compromete a água livre da mistura, esta se torna mais áspera, com um aspecto de pouco trabalhável. Porém, ao moldar os corpos-de-prova, percebe-se que elas são perfeitamente adensáveis. Isso foi observado por Leite (2001), onde ela percebeu que seria necessário introduzir uma medida dinâmica da trabalhabilidade das misturas de concreto reciclados.

5.3.2.2 Concreto no estado endurecido

Para se avaliar as propriedades dos concretos convencionais e reciclados, no estado endurecido, foram realizados os ensaios abaixo.

- Resistência à Compressão Axial - NBR 5739 (ABNT, 2007)

Para verificar a resistência à compressão axial dos concretos de referência e dos concretos com agregados reciclados, foram realizados testes de resistência nas idades de 3, 7, 28 e 63 dias, com quatro exemplares de corpos-de-prova para cada idade. Os corpos-de-prova foram capeados com enxofre.

- Resistência à Tração por Compressão Diametral – NBR 7222 (ABNT, 2011)

Para verificar a resistência à tração dos concretos de referência e dos concretos com agregados reciclados, foram realizados testes de resistência à tração por compressão diametral na idade de 28 dias, com quatro exemplares de corpos-de-prova para esta idade.

- Absorção por Imersão - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica – NBR 9778 (ABNT, 2005)

Foram realizados ensaios de absorção para avaliar a influência da adição de agregados reciclados nesta propriedade, bem como na sua porosidade e massa específica. Para tal, os ensaios ocorreram na idade de 28 dias, com três corpos-de-prova para esta idade.

- Ensaios não destrutivos: Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica – NBR 8802 (ABNT, 1994)

Foram realizados ensaios para determinar a velocidade de propagação de onda ultrassônica (UPV) nos corpos-de-prova de concreto na idade de 63 dias, sob condição saturada superfície seca, utilizando os transdutores na posição de transmissão direta (Figura 45), sendo quatro exemplares por método de dosagem.

O ensaio foi realizado de acordo com a NBR 8802/94 que prescreve o método de ensaio não destrutivo para determinar a velocidade de propagação de ondas longitudinais, obtidas por pulsos ultrassônicos, através de um componente de concreto, e tem como principais aplicações:

- a) verificação da homogeneidade do concreto;
- b) detecção de eventuais falhas internas de concretagem, profundidade de fissuras e outras imperfeições;
- c) monitoramento de variações no concreto, ao longo do tempo, decorrentes de agressividade do meio (ataque químico) principalmente pela ação de sulfatos.

Para a execução do ensaio, os corpos-de-prova (CPs) foram preparados, tendo suas superfícies planas, lisas e isentas de sujeiras. Para os CPs que não forem suficientemente lisos, suas superfícies de ensaio foram regularizadas através de processos mecânicos ou com camada de pasta de cimento.

Os corpos-de-prova ensaiados tinham as mesmas condições de composição e umidade relativa. Para a execução do ensaio, foram seguidos os procedimentos abaixo, de acordo com a NBR 8802/94:

- Calibrar o aparelho usando a barra de referência ou dispositivo equivalente.
- Verificar se as superfícies de ensaio dos corpos-de-prova ou componentes de concreto se encontram regularizadas;
- Aplicar fina camada de acoplante (graxas de silicone ou mineral, vaselina etc.) nas faces dos transdutores ou no corpo-de-prova a ser ensaiado.
- Posicionar os transdutores de acordo com a Figura 44:
 - a) transmissão direta, com os transdutores nas faces opostas do material;
 - b) transmissão indireta, com os transdutores na mesma face;
 - c) transmissão semidireta, com os transdutores nas faces adjacentes.

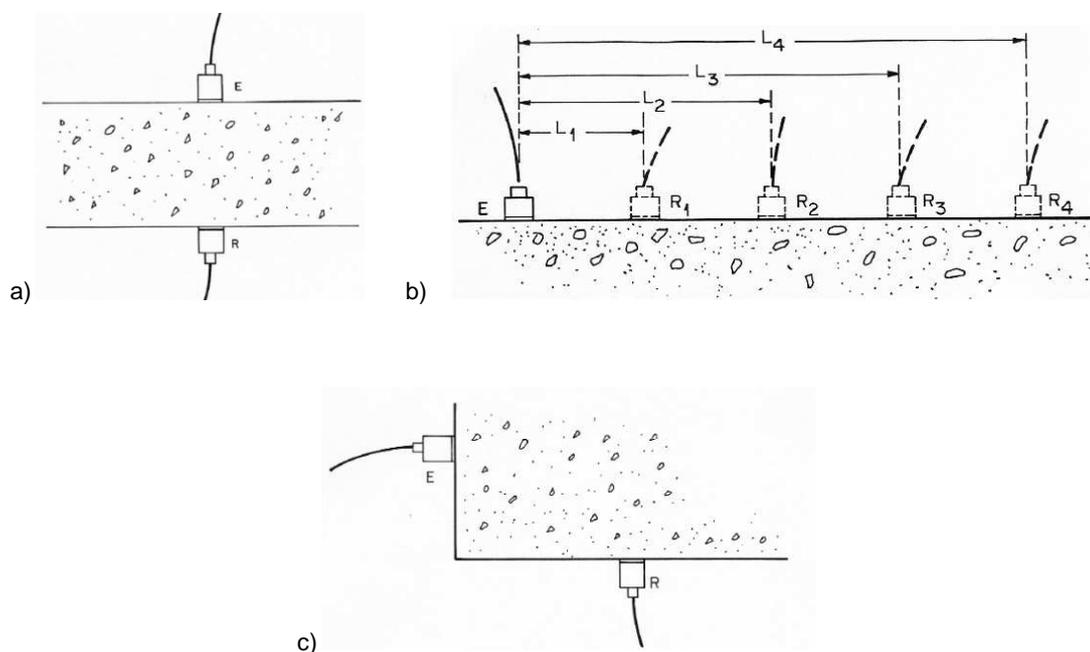


Figura 44 – Tipos de transmissão do pulso ultrassônico – a) transmissão direta; b) transmissão indireta; c) transmissão semidireta.

Fonte: NBR 8802 (ABNT,1994).

- De acordo com a Norma deste ensaio, o acoplamento e a pressão entre as superfícies dos transdutores e do corpo-de-prova ou componente que está sendo ensaiado devem

ser considerados satisfatórios quando for obtido o valor mínimo de leitura com variação de até $\pm 1\%$.

- A medida da distância entre os pontos onde devem ser acoplados os centros das faces dos transdutores deve ser determinada com precisão de $\pm 1\%$.

Para o tratamento dos dados obtidos através deste ensaio, deve-se calcular a velocidade de propagação de ondas conforme a seguinte equação:

$$V = \frac{L}{t} \quad \text{Equação 26}$$

Onde: V = velocidade de propagação (m/s); L = distância entre os pontos de acoplamento dos centros das faces dos transdutores (m); t = tempo decorrido desde a emissão da onda até a sua recepção (s).

A Tabela 22 apresenta valores de referência das velocidades do pulso ultrassônico em função da qualidade dos concretos. Esta Tabela foi extraída do trabalho de Lorenzi (2009), citando uma publicação do ano de 2002 do IAEA (Instituto Internacional de Energia Atômica).

Tabela 22 – Classificação da qualidade do concreto em função do ensaio de UPV.

UPV (m/s)	Qualidade do Concreto
> 4500	Excelente
3500 < UPV < 4500	Ótimo / Bom
3000 < UPV < 3500	Bom / Duvidoso
2000 < UPV < 3000	Regular
UPV < 2000	Ruim

Fonte: Modificado de Lorenzi (2009), citando IAEA (2002).

O equipamento utilizado para medir a velocidade do pulso ultrassônico neste trabalho está ilustrado na Figura 45.

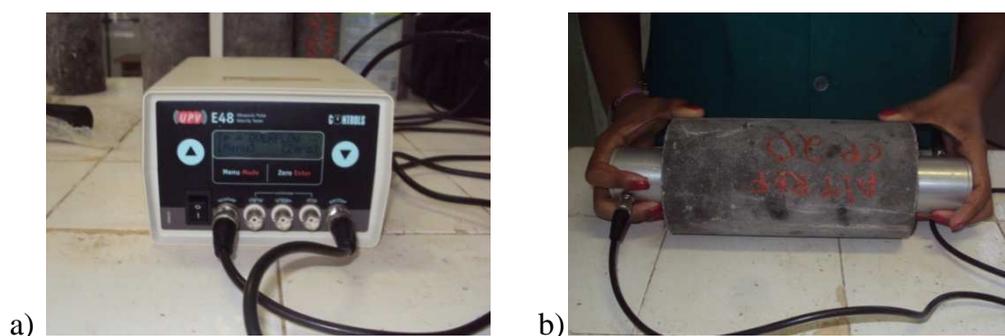


Figura 45 – Equipamento utilizado para o ensaio de UPV.

5.4 Estudo de Dosagem

Após o beneficiamento dos resíduos, os agregados provenientes dos mesmos foram caracterizados e utilizados para a confecção das misturas de argamassa e concreto.

Os concretos foram moldados a partir dos métodos de dosagem já citados e das práticas de compensação ou não de parte da taxa de absorção dos agregados reciclados. A taxa de compensação utilizada foi referente ao tempo de dez minutos, sendo os agregados pré-umedecidos em água dez minutos antes da mistura.

As misturas com agregado reciclado, sem compensação, foram moldadas normalmente, até o ponto em que ainda eram “trabalháveis”. Quando a mistura se apresentava muito áspera, impedindo a moldagem dos corpos-de-prova, foi utilizado um aditivo superplastificante a base de éter policarboxílico.

A partir das análises dos resultados, será possível entender melhor aspectos da dosagem de concretos com agregados reciclados, bem como questões acerca da variação do teor de água combinada.

5.4.1 Dosagem de concretos com RCD

Para a realização do estudo de dosagem dos concretos, inicialmente fixou-se o fator água/cimento em 0,50 e a consistência em 70 ± 10 mm, com o objetivo de preservar algumas características do concreto a fim de poder comparar de uma forma mais igualitária os diferentes métodos de dosagem entre si. A Tabela 23 apresenta os parâmetros fixados para o desenvolvimento de cada dosagem de acordo com os métodos escolhidos.

A Tabela 24 mostra os resultados do primeiro estudo comparativo de dosagem entre os métodos, antes do ajuste experimental.

Tabela 23 – Parâmetros fixados para cada método de dosagem.

Métodos	Abatimento	Relação a/c	Teor de Argamassa (α)	35-65% em volume pasta/agregado	Agregados secos ao ar (correção de umidade)	OBSERVAÇÕES
ACI/ABCP	X	X			X	Critério do Volume Absoluto
IPT/EPUSP	X	X	X		X	Diagrama de Dosagem
MEHTA/AITCIN	X	X		X	X	Otimização do esqueleto granular
AITCIN	X	X			X	Critério do Volume Absoluto

Tabela 24 – a) Traços dos concretos e Consumos dos materiais; b) Volume dos materiais, de pasta e de argamassa da mistura; teor de umidade e teor de argamassa dos concretos.

a)

Método	Traço unitário				C _{CIM} (kg/m ³)	C _{AREIA} (kg/m ³)	C _{BRITA} (kg/m ³)	C _{ÁGUA} (l/m ³)
	c	a	p	a/c				
ACI/ABCP	1	1,39	2,99	0,5	400,00	556,77	1197,00	200,00
IPT/EPUSP _{RICO}	1	1,30	2,20	0,42	489,44	636,27	1076,76	204,83
IPT/EPUSP _{MÉDIO}	1	2,06	2,94	0,56	364,46	750,78	1071,50	203,37
IPT/EPUSP _{POBRE}	1	2,83	3,67	0,70	290,31	821,57	1065,43	202,49
MEHTA/AITCIN	1	1,94	2,38	0,50	403,00	783,12	958,50	200,00
AITCIN	1	1,90	2,50	0,50	400,00	758,93	1000,00	200,00

b)

Método	V _{CIM} (l)	V _{AREIA} (l)	V _{BRITA} (l)	V _{ÁGUA} (l)	V _{PASTA} (l/m ³)	V _{ARG} (l/m ³)	ar apris.	H% (teor água)	α % (teor argamassa)
ACI/ABCP	129,03	212,51	438,46	200,00	349,03	561,54	0,02	9,29	44
IPT/EPUSP _{RICO}	157,88	242,85	394,42	204,83	382,71	625,56	0,02	9,30	51
IPT/EPUSP _{MÉDIO}	117,57	286,56	392,49	203,37	340,93	627,49	0,02	9,30	51
IPT/EPUSP _{POBRE}	93,65	313,58	390,27	202,49	316,14	629,71	0,02	9,30	51
MEHTA/AITCIN	130,00	298,90	351,10	200,00	350,00	648,90	0,02	9,33	55
AITCIN	129,03	289,67	366,30	200,00	344,03	633,70	0,015	9,26	54

Onde: C_{cim}, C_{areia}, C_{brita} e C_{água} são os consumos de cimento, areia, brita e água, respectivamente, por m³ de concreto; V_{cim}, V_{areia}, V_{brita}, V_{água} são os volumes de cimento, areia, brita e água, respectivamente, em litros; V_{pasta} é o somatório dos volumes de cimento, água e ar; V_{argamassa} é o somatório dos volumes de cimento, areia, água e ar; H é o teor de água da mistura, em %; α é o teor de argamassa da mistura, em %.

Após o estudo que gerou a tabela anterior, foi realizado o ajuste experimental para os Métodos ACI/ABCP; Mehta/Aitcin e Aitcin, gerando novos traços e parâmetros para as misturas.

Para o método do IPT/EPUSP foi realizado um estudo de dosagem separado, em que foram confeccionadas três misturas, uma média (1:5), uma mais rica (1:3,5) e outra mais pobre (1:6,5) a fim de montar o diagrama de dosagem deste método para os materiais utilizados. O estudo realizado está descrito no tópico 5.4.3 deste capítulo.

Após os ajustes feitos para os quatro métodos, garantindo o fator a/c fixo em 0,5 e o slump na faixa pré-determinada, foi confeccionada uma nova tabela comparativa de dosagem (Tabela 25). Os traços utilizados para as moldagens dos corpos-de-prova de concretos foram os apresentados nesta última tabela.

Tabela 25 – Tabela Final - a) Traços dos concretos e Consumos dos materiais; b) Volume dos materiais, de pasta e de argamassa da mistura; teor de umidade e teor de argamassa dos concretos.

a)

Método	Traço unitário				C _{CIM} (kg/m ³)	C _{AREIA} (kg/m ³)	C _{BRITA} (kg/m ³)	C _{ÁGUA} (l/m ³)
	c	a	p	a/c				
ACI/ABCP	1	1,54	3,30	0,50	374,17	576,22	1234,75	187,08
IPT/EPUSP	1	1,73	2,63	0,50	400,61	693,06	1053,61	200,31
MEHTA/AITCIN	1	1,91	2,34	0,50	406,85	777,09	952,04	208,00
AITCIN	1	1,72	2,27	0,50	426,27	734,50	966,47	216,00

b)

Método	V _{CIM} (l)	V _{AREIA} (l)	V _{BRITA} (l)	V _{ÁGUA} (l)	V _{PASTA} (l/m ³)	V _{ARG} (l/m ³)	ar apris.	H% (teor água)	α % (teor argamassa)	Slump alcançado (mm)
ACI/ABCP	120,70	219,93	452,29	187,08	327,78	547,71	0,02	8,56	43	75,0
IPT/EPUSP	129,23	264,53	385,94	200,31	349,54	614,06	0,02	9,33	51	80,0
MEHTA/AITCIN	122,00	301,27	348,73	208,00	350,00	651,27	0,02	9,52	55	65,0
AITCIN	137,51	277,48	354,02	216,00	368,51	645,98	0,015	10,02	55	70,0

5.4.2 Procedimento de mistura dos materiais

Neste tópico serão relatados os equipamentos e procedimentos utilizados para a confecção das misturas de argamassas e concretos, além dos equipamentos usados para medir a trabalhabilidade de ambos. Serão relatados ainda aspectos de adensamento e cura dos corpos-de-prova.

5.4.2.1 Procedimento de compensação do AMR

Devido à elevada absorção do agregado miúdo reciclado, utilizou-se o procedimento de compensação de parte da sua água de absorção. A taxa de compensação utilizada foi referente ao tempo de dez minutos na curva da porcentagem absorvida versus tempo, correspondendo a 40,71% da absorção total. O AMR teve uma absorção para 24 horas de 16,35%, logo, a taxa compensada foi equivalente a 40,71% dos 16,35%, sendo igual a 6,66%. A Figura 46 apresenta o procedimento de compensação, realizado acrescentando a água referente a taxa de 6,66% ao AMR, dez minutos antes da mistura, fazendo a homogeneização.



Figura 46 – Pré-umedecimento do agregado miúdo reciclado.

Para as misturas que não tiveram o procedimento de compensação, ditas sem compensação, o processo de mistura dos componentes ocorreu de forma igual ao das misturas com compensação, porém sem o pré-umedecimento do agregado. Ou seja, a única água adicionada à mistura era referente à água de amassamento. Como a absorção do agregado reciclado era alta, em algumas misturas foi necessário utilizar aditivo superplastificante.

5.4.2.2 Argamassa

As argamassas foram moldadas numa argamassadeira com capacidade máxima de 5 litros (Figura 47). O procedimento adotado foi de acordo com a NBR 7215/96:

1. Colocar inicialmente na cuba toda água e adicionar o cimento, misturando durante 30s em velocidade baixa;
2. Sem paralisar a operação de mistura, iniciar a colocação da areia em quatro frações previamente misturadas, com cuidado para que toda areia seja colocada gradualmente durante o tempo de 30s;
3. Mudar a velocidade para alta, misturando os materiais durante 30s;
4. Desligar o misturador durante 1 min e 30s. Nos primeiros 15s, deve-se retirar com o auxílio de uma espátula a argamassa que ficou aderida às paredes da cuba e à pá e que não foi suficientemente misturada, colocando-a no interior da cuba. No tempo restante (1 min e 15s) a argamassa deve ficar de repouso na cuba, coberta com pano limpo e úmido.
5. Ligar o misturador na velocidade alta por mais 1 minuto.

OBS.: Para as misturas de argamassa com agregado miúdo reciclado com compensação, este processo era feito separadamente, durante um período de 10

minutos. A adição do AMR na mistura era feita em partes, após a colocação da areia natural (etapa 2). Para as misturas com AMR sem compensação, a areia reciclada era adicionada juntamente com a areia natural (previamente misturadas) e colocadas em partes no misturador. Para todas as misturas com AMR, estes eram inicialmente secos em estufa, a fim de garantir que antes dos procedimentos, não tivesse água livre contida nos grãos.



Figura 47 – Argamassadeira utilizada.

Para avaliar a consistência das argamassas foi realizada uma avaliação reológica no viscosímetro Brookfield (Figura 48a), além do ensaio na mesa de consistência (Figura 48b).



a)



b)

Figura 48 – a) Ensaio no Viscosímetro Brookfield; b) Mesa de consistência.

A Figura 49 apresenta os corpos-de-prova de argamassa ainda na fôrma de 5x10 cm. Eles foram adensados em mesa vibratória.



Figura 49 – Corpos-de-prova de argamassa.

Após a desforma, ocorrida com 24h após a moldagem, os corpos-de-prova de argamassa foram curados num tanque, imersos em água com cal.

5.4.2.3 Concretos

Os concretos foram moldados numa betoneira com capacidade máxima de 120 litros (Figura 50).



Figura 50 – Betoneira utilizada para confecção das misturas de concreto.

Todas as misturas de concreto foram realizadas de acordo com o seguinte procedimento:

1. Colocar toda a brita e 80% da água total (misturar por 30 segundos);
2. Colocar todo o cimento (misturar por 1 minuto);
3. Colocar toda areia (misturar por 1 minuto);
4. Desligar a betoneira para retirar o excesso de material aderido às pás;
5. Ligar a betoneira e colocar o restante da água (misturar por 2 minutos e 30s)

OBS.: Para as misturas de concretos com agregado miúdo reciclado com compensação, esta era feita separadamente, durante um período de 10 minutos, e a adição do AMR na mistura era feita em partes, após a colocação da areia natural (etapa 3). Para as misturas com AMR sem compensação, a areia reciclada também era adicionada após a areia natural, aos poucos, no misturador. Para todas as misturas com AMR, estes eram inicialmente secos em estufa.

As misturas de concreto tinham sua trabalhabilidade avaliada por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone (Figura 51a). Os corpos-de-prova eram adensados numa mesa vibratória de acordo com a Figura 51b.

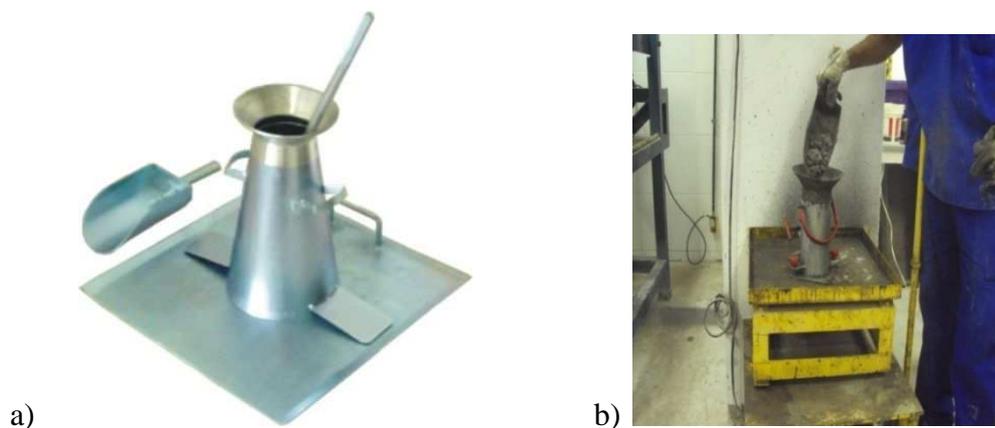


Figura 51 – a) Equipamento utilizado para o *slump test*; b) Adensamento na mesa vibratória.



Figura 52 – Corpos-de-prova de concreto.

Após a desforma, ocorrida com 24h após a moldagem, os corpos-de-prova de concreto foram curados num tanque, imersos em água com cal (Figura 53).



Figura 53 – Tanque de cura.

5.4.3 Diagrama de Dosagem – Método IPT/EPUSP

Para a confecção do traço a partir do método do IPT foi necessário realizar um estudo de dosagem específico para os materiais que seriam utilizados, a saber, o cimento CP V-ARI, areia natural, agregado graúdo natural 19 mm e água. Este método fornece as curvas médias de correlação entre resistência à compressão axial e relação água/cimento para o Cimento Portland comum (CP I- 32), Cimento Portland de alto-forno (CP III- 32) e Cimento Portland pozolânico (CP IV- 32).

O método ainda faz referência a outros dois tipos de cimento. Para o Cimento Portland comum CP I- 40, os autores sugerem aumentar em 20% os resultados de resistência do CP I-32. Para o Cimento Portland de alta resistência inicial CP V-ARI, os autores sugerem aumentar em 25% os resultados de resistência do CP I-32 até sete dias e em 20% até 91 dias.

Para a realização desta pesquisa, optou-se em fazer o estudo de dosagem com as curvas do próprio cimento. Para isso foram moldados corpos-de-prova com três traços diferentes, sendo um traço médio, um mais pobre e outro mais rico, mantendo o mesmo teor de argamassa e o mesmo valor de abatimento entre eles. Esses corpos-de-prova foram rompidos nas idades de 3, 7, 28 e 63 dias, possibilitando traçar um diagrama mais próximo da realidade para os materiais utilizados.

Esse diagrama foi utilizado para a confecção do traço final, que seria utilizado para uma relação a/c fixa e igual a 0,50. A Tabela 26 mostra os traços experimentais, as relações a/c e os resultados das rupturas para as idades propostas.

A Figura 54 mostra o diagrama de dosagem traçado para os materiais utilizados nesta pesquisa. A partir dele foi possível dosar o traço do concreto pelo método do IPT para uma relação a/c = 0,50, mesma relação utilizada para os outros métodos.

Tabela 26 – Misturas Experimentais para estudo de dosagem - IPT.

Traço em massa	Número	T-1			T-2			T-3		
	1 : m	1 : 3,5			1 : 5,0			1 : 6,5		
	Teor de argamassa α (%)	51			51			51		
	1 : a : p	1	1,3	2,2	1	2,06	2,94	1	2,83	3,67
Quantidade de CP's		10			10			10		
Volume de 1 CP (L)		1,57			1,57			1,57		
Volume do ensaio de massa específica (L)		8,00			8,00			8,00		
Massa total de cimento (kg)		12,64			9,48			7,59		
Agregado miúdo (Kg)		16,44			19,54			21,47		
Agregado graúdo (Kg)		27,82			27,88			27,84		
Água (Kg)		5,29			5,29			5,29		
Massa específica do concreto (kg/m ³)		2,24			2,21			2,22		
Consumo/m ³ de concreto	Cimento (Kg)	479,66			357,17			284,51		
	Água (l)	200,74			199,30			198,44		
Relação água/cimento		0,42			0,56			0,70		
Abatimento (\pm 10 mm)		70			70			70		
Número dos corpos de prova		1 a 8			9 a 16			17 a 24		
Data de moldagem		11/04/2011			11/04/2011			12/04/2011		
Teor de ar incorporado		0,02			0,02			0,02		
Resistência à compressão axial média (MPa)	Exemplares	CP1	CP2	MÉDIA	CP1	CP2	MÉDIA	CP1	CP2	MÉDIA
	3 dias	27,25	31,07	29,16	22,54	21,39	21,97	12,99	13,75	13,37
	7 dias	32,34	38,96	35,65	25,59	26,87	26,23	16,30	16,55	16,43
	28 dias	40,74	38,2	39,47	32,09	34,76	33,43	22,15	23,05	22,60
	63 dias	46,98	43,16	45,07	33,87	35,78	34,83	29,16	27,5	28,33

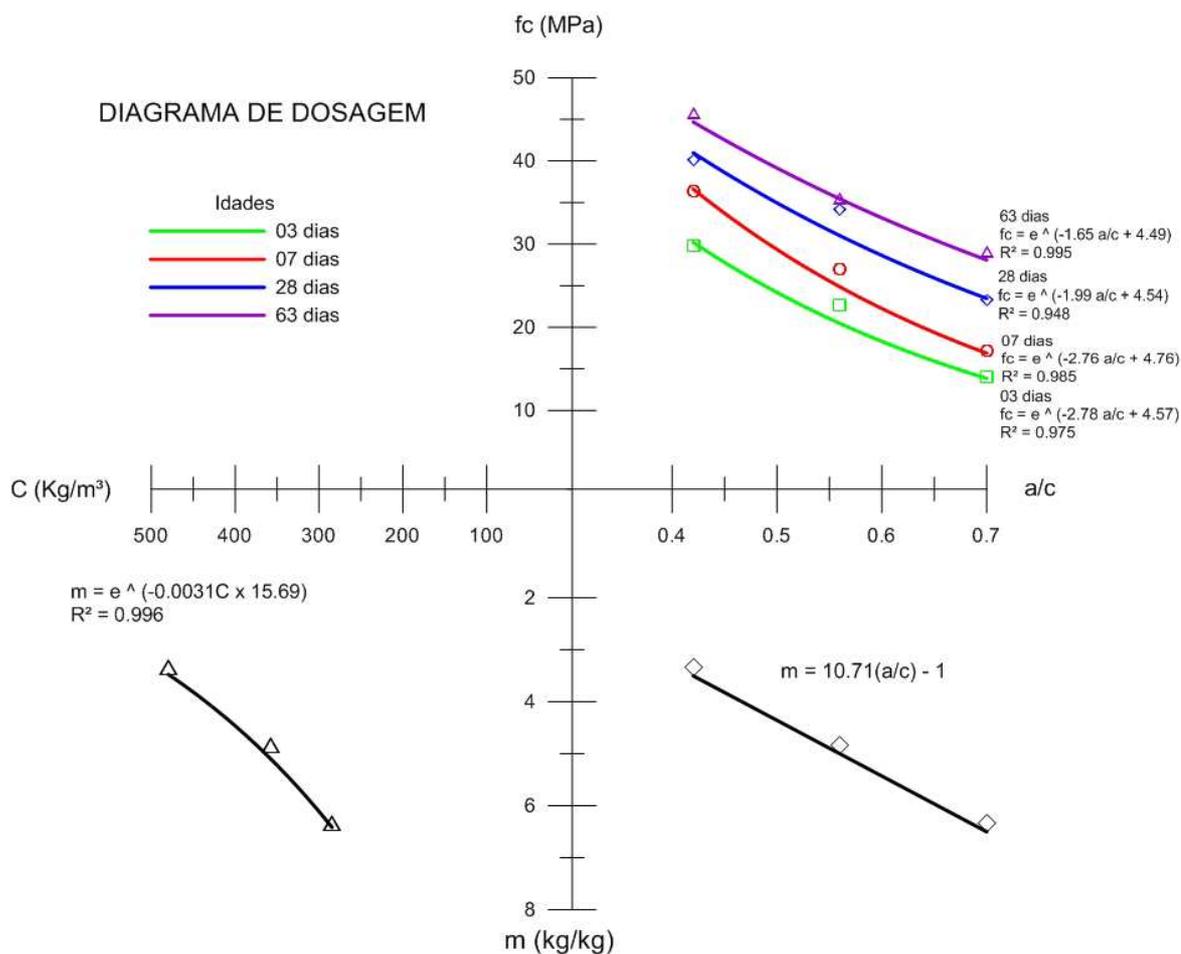


Figura 54 – Diagrama de dosagem de concretos de referência dosados pelo Método do IPT

5.5 Fluxograma do Programa Experimental

Neste tópico serão apresentados os fluxogramas do Programa Experimental desenvolvido para esta pesquisa. Para uma melhor organização, primeiramente será ilustrado o fluxograma do estudo desenvolvido para as argamassas (etapa 1) e, posteriormente, para os concretos (etapa 2).

5.5.1 Argamassas

A Figura 55 ilustra o fluxograma do estudo desenvolvido para as misturas de argamassas, representando a Etapa 1.

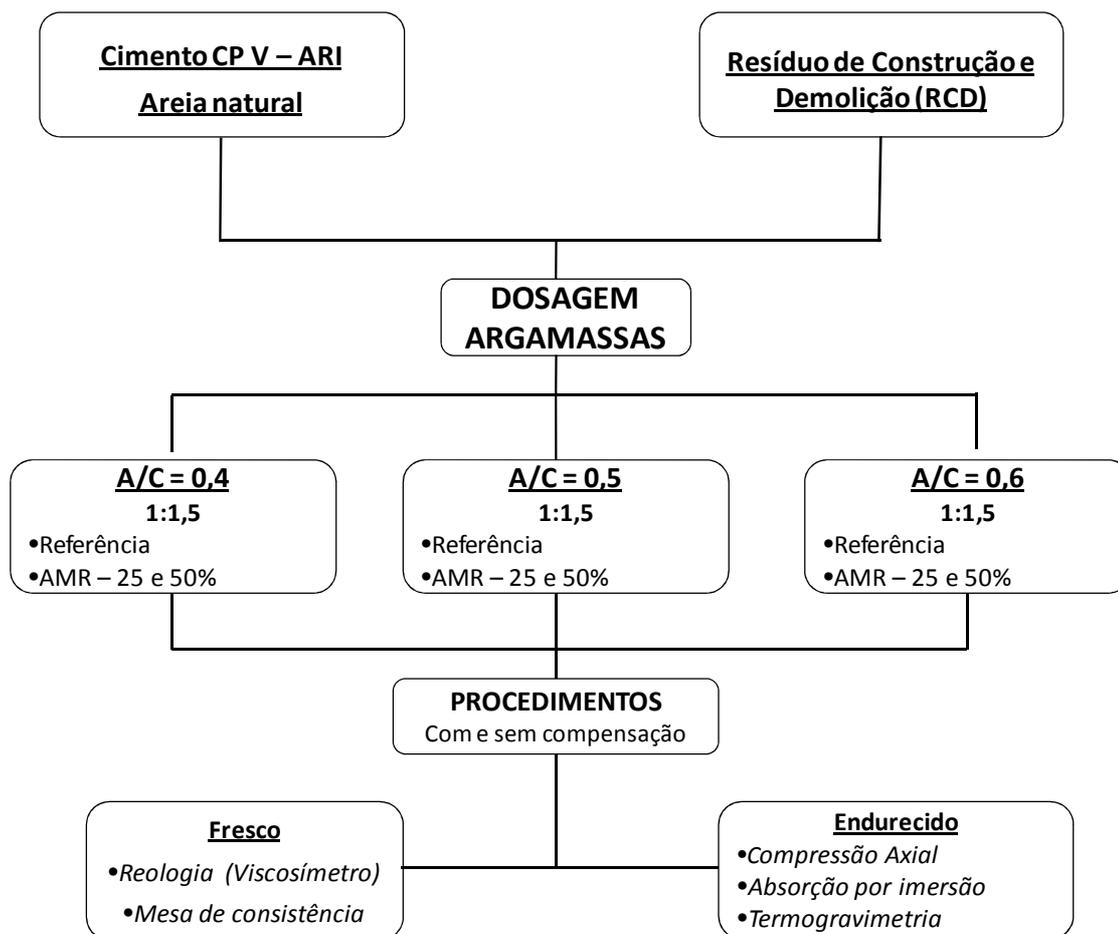


Figura 55 – Fluxograma do Programa Experimental para as Argamassas.

Este fluxograma apresenta os materiais utilizados para a confecção das argamassas, as relações água/cimento estudadas, os traços realizados, os teores de substituição da areia natural pela areia reciclada, os procedimentos utilizados para misturas com AMR (com e sem compensação de parte da água de absorção) e os ensaios realizados nos estados fresco e endurecido.

5.5.2 Concretos

A Figura 56 apresenta o fluxograma do estudo desenvolvido para os concretos, representando a Etapa 2 desta pesquisa.

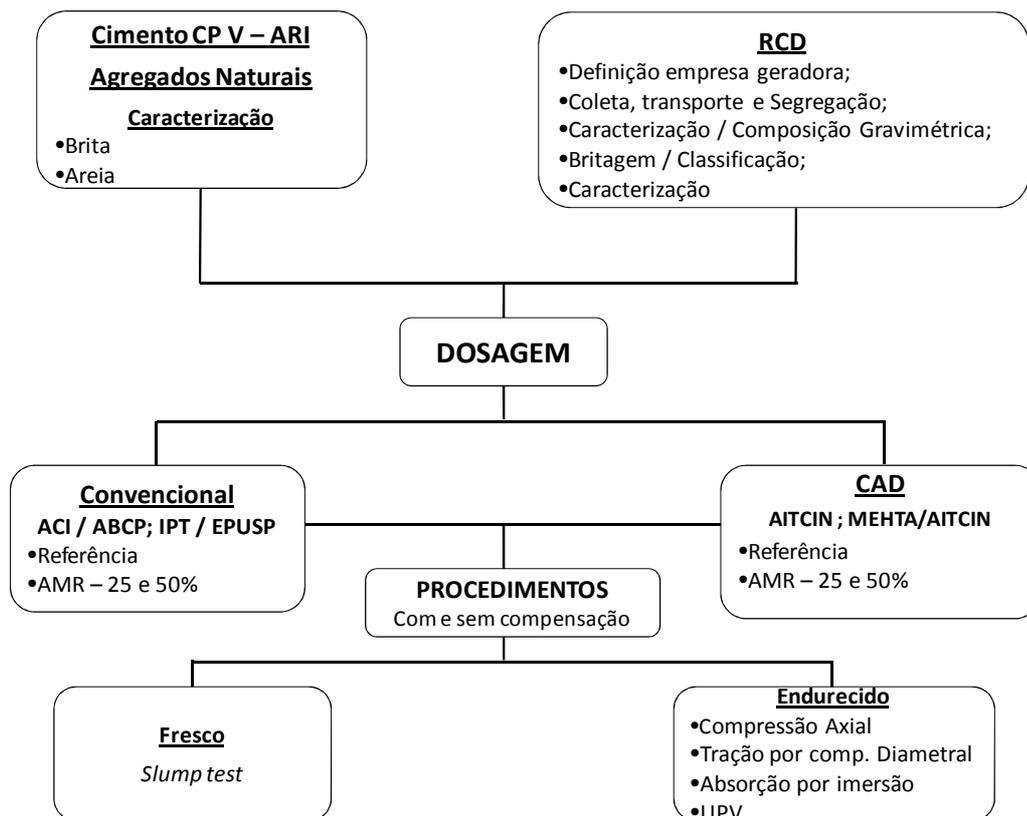


Figura 56 – Fluxograma do Programa Experimental para os Concretos.

Este fluxograma apresenta os materiais utilizados para a produção dos concretos, as etapas do beneficiamento do RCD, os métodos de dosagem utilizados (métodos para concreto convencional e de alto desempenho), os teores de substituição da areia natural pela areia reciclada, os procedimentos utilizados para misturas com AMR (com e sem compensação de parte da água de absorção) e os ensaios realizados nos estados fresco e endurecido.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos para esta pesquisa, que estarão subdivididos em resultados dos ensaios em argamassas (Etapa 1) e resultados dos ensaios em concretos (Etapa 2).

6.1 Etapa 1: Argamassas

Os resultados das misturas de argamassas foram divididos em resultados no estado fresco e estado endurecido.

6.1.1 Estado Fresco

Neste tópico serão apresentados os resultados das consistências das argamassas produzidas. Para tal, foram realizados ensaios de mesa de consistência, de acordo com a NBR 7215/1996, e no viscosímetro Brookfield.

A Tabela 27 apresenta o proporcionamento dos materiais empregados para a confecção das argamassas. São apresentados, também, os valores do índice de consistência e a dosagem de aditivo utilizada para a produção das misturas de argamassa até que as mesmas apresentassem condições de moldabilidade.

Tabela 27 – Proporcionamento dos materiais: valores de consistência e quantidade de aditivo usado.

PROP. MAT.	ARG REF			ARG 25%			ARG 25% SC			ARG 50%			ARG 50% SC		
	0,4	0,5	0,6	0,4	0,5	0,6	0,4	0,5	0,6	0,4	0,5	0,6	0,4	0,5	0,6
c	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
AMN	1,50	1,50	1,50	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
AMR	-	-	-	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
Δx	-	-	-	0,02	0,02	0,02	-	-	-	0,05	0,05	0,05	-	-	-
Aditivo (%)	-	-	-	-	-	-	0,06	-	-	-	-	-	0,1	-	-
IC (mm)	278	343	380	183	330	405	180	300	377	170	273	355	193	274	352

Onde: c – cimento; AMN – agregado miúdo natural; AMR – agregado miúdo reciclado; Δx – acréscimo de água na mistura devido à compensação parcial da taxa de absorção dos agregados reciclados; IC – índice de consistência em milímetros, obtido a partir do ensaio da mesa de consistência.

Verifica-se na Tabela 27 que o aumento da relação a/c provoca um aumento da plasticidade das misturas. A presença do AMR nas misturas gera um aumento na coesão das mesmas, elevando a viscosidade e reduzindo o índice de consistência (IC). O processo de compensação de água das misturas contendo AMR permite misturas em condições de moldabilidade, porém com índices de consistência inferiores ao da mistura de referência. Para as misturas contendo AMR sem compensação houve uma tendência a ter uma redução ainda maior no índice de consistência, ao ponto da mistura com relação $a/c = 0,4$ necessitar do uso de aditivo.

O método da mesa de consistência é de simples utilização, tem a facilidade de poder ser realizado em campo, fornece de forma rápida resultados diretos, além de ser um teste dinâmico, que também considera a viscosidade do sistema e não só a tensão de escoamento. Porém, os resultados obtidos não dissociam a contribuição de cada um dos parâmetros reológicos (viscosidade e tensão de escoamento), pois são apresentados de forma qualitativa em índice de consistência e não em termos de unidades reológicas fundamentais (Koehler e Fowler, 2003; Cardoso, 2009).

Assim, de forma geral, verifica-se que quando se acrescenta areia reciclada à mistura, ocorre aumento na consistência, pois os grãos do agregado reciclado proporcionam uma argamassa com maior dificuldade de escoamento, ou seja, maior viscosidade. Isto ocorre, provavelmente, devido à maior tensão cisalhante entre os grãos, apesar de muitas vezes apresentarem moldabilidade.

Para uma avaliação real da influência do agregado reciclado na tensão de escoamento e viscosidade das argamassas utilizou-se o viscosímetro Brookfield (reômetro rotativo). Foram feitas quinze misturas com traços diferentes, todas com volume igual a 600 ml, numa argamassadeira de bancada para posterior avaliação no reômetro. Foi separado um becker para depositar a amostra a ser ensaiada e foi escolhido um *spindle* adequado para as misturas, sendo utilizada a mesma palheta para todas, que neste caso foi o *spindle* HA3.

A Figura 57 apresenta os gráficos com os valores de viscosidade obtidos do ensaio com o viscosímetro em função da velocidade, para as curvas das argamassas de referência, com 25% de AMR com compensação e 25% de AMR sem compensação para $a/c = 0,4$, $a/c = 0,5$ e $a/c = 0,6$, respectivamente.

A Figura 58 (a), (b) e (c) apresenta o gráfico com os valores de viscosidade obtidos do ensaio com o viscosímetro em função da velocidade, para as curvas das argamassas de referência, com 50% de AMR com compensação e 50% de AMR sem compensação para $a/c = 0,4$, $a/c = 0,5$ e $a/c = 0,6$, respectivamente.

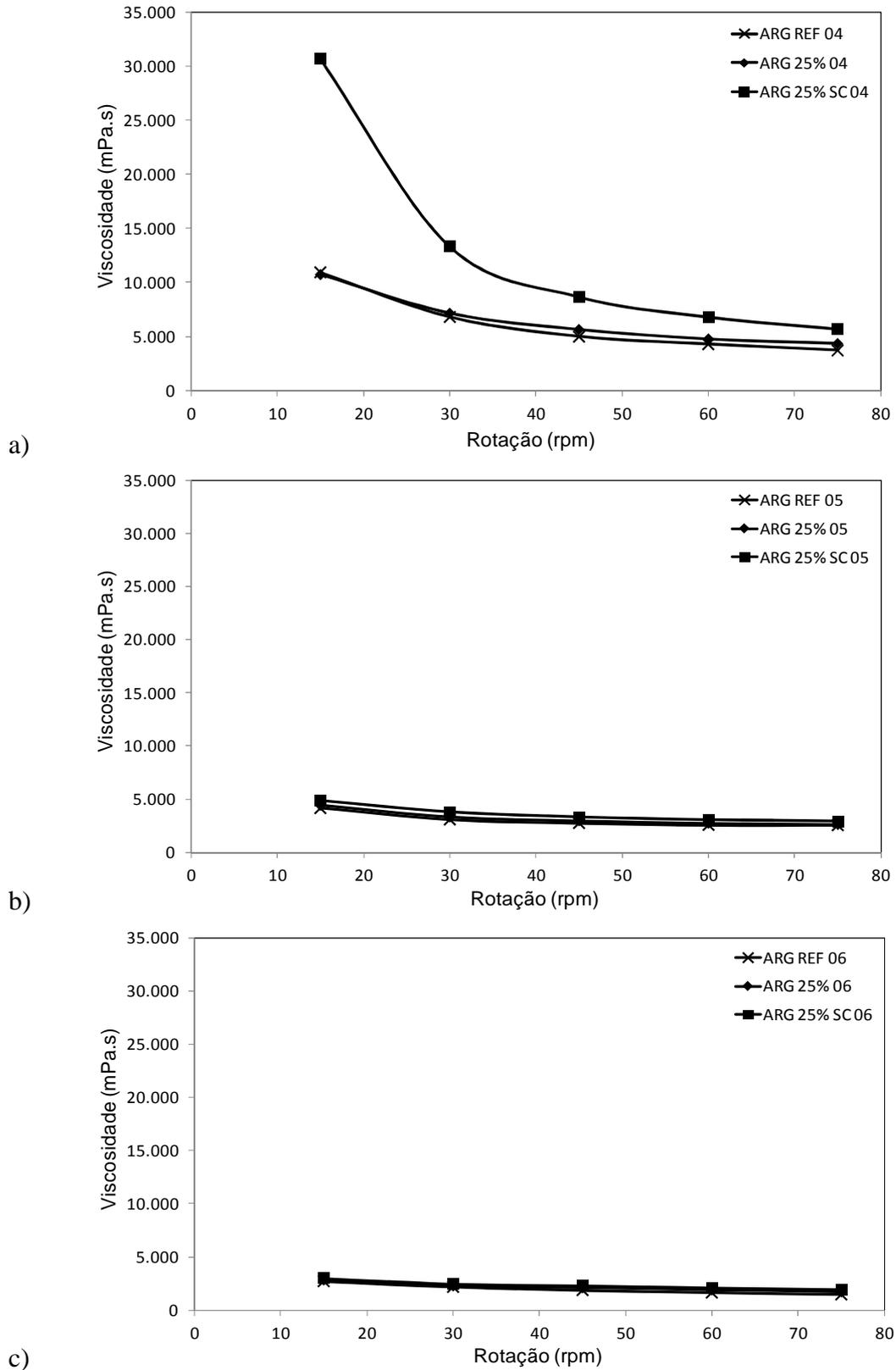


Figura 57- Viscosidade Brookfield *versus* rotação. Curvas da argamassa de referência, com 25% AMR com compensação e 25% AMR sem compensação. a) $a/c = 0,4$; b) $a/c = 0,5$; c) $a/c = 0,6$.

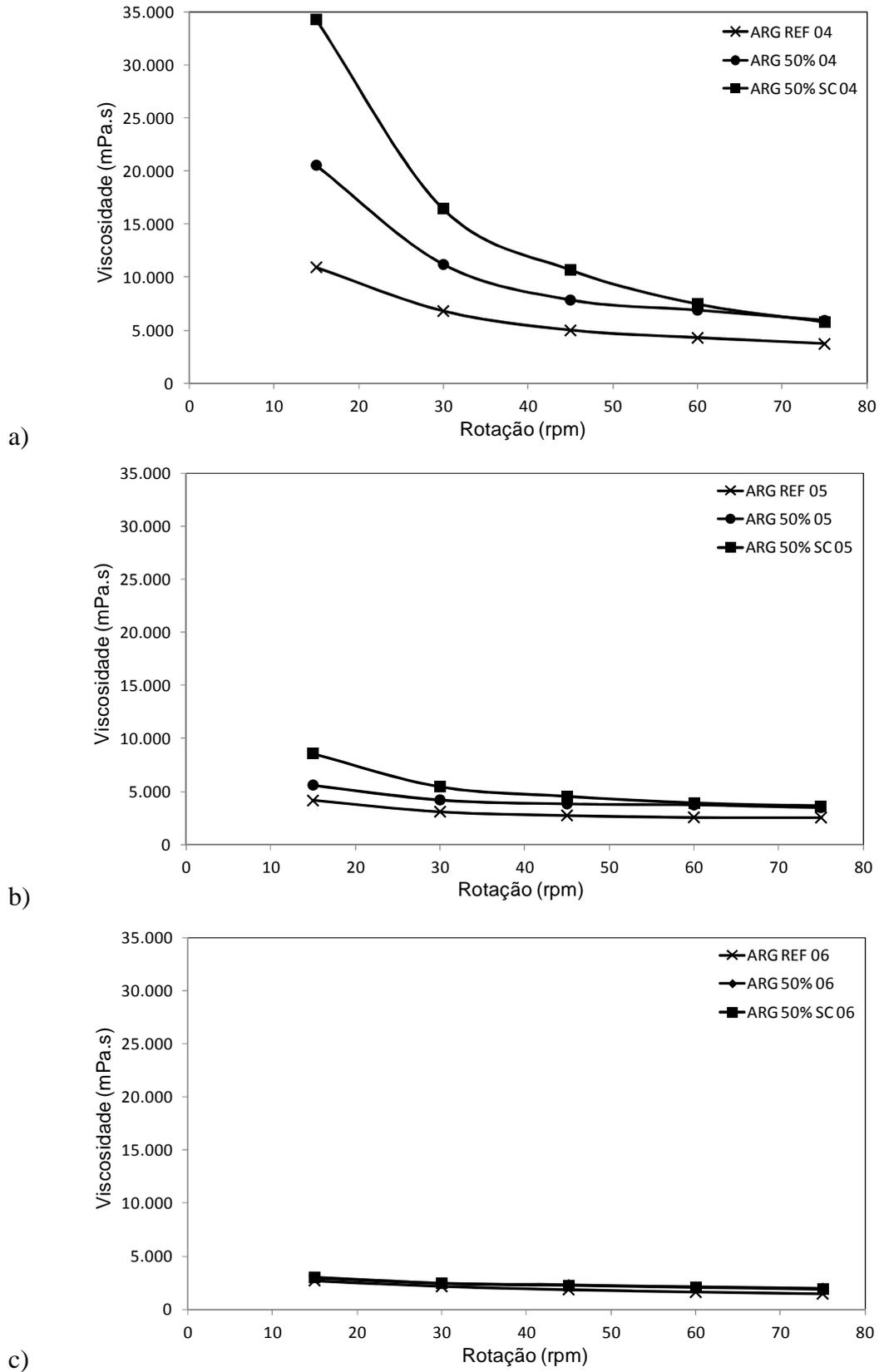


Figura 58 – Viscosidade Brookfield *versus* rotação. Curvas da argamassa de referência, com 50% AMR com compensação e 50% AMR sem compensação. a) $a/c = 0,4$; b) $a/c = 0,5$; c) $a/c = 0,6$.

Verifica-se que os valores de viscosidade para as argamassas com resíduo foram superiores aos das argamassas de referência para todos os fatores a/c , em geral. Este fato pode estar atribuído à inserção do agregado reciclado que apresenta forma lamelar e textura mais áspera, o que aumenta a tensão de cisalhamento entre os grãos, dificultando o escoamento entre os mesmos.

Entretanto, observando as curvas dos gráficos de reologia, nota-se um afastamento maior entre elas para fatores a/c baixos, como é o caso de $a/c = 0,4$. Para o teor de 25% com $a/c = 0,5$ e $a/c = 0,6$, as diferenças de viscosidade foram irrisórias. Já para o teor de 50% com $a/c = 0,5$ essa diferença tendeu a aumentar, ocorrendo um discreto afastamento entre as curvas. Afastamento este que quando se utilizou a relação $a/c = 0,6$, para o mesmo teor, ficou diminuído novamente tornando-se também irrisório.

Nota-se também que o processo de compensação influenciou mais significativamente na viscosidade das argamassas para $a/c = 0,4$, de tal forma que para uma rotação de 15 rpm, o valor da viscosidade da mistura 25% SC foi três vezes maior que o valor da mistura de 25% com compensação. Para o teor de 50% de substituição, a mistura sem compensação teve sua viscosidade aumentada em 60%. Esse fato indica que a água de compensação influencia nas propriedades reológicas das misturas, principalmente quando se trabalha com relações de água/cimento baixas. Para relações a/c altas, como $a/c = 0,6$, independente do teor de substituição, as alterações na viscosidade não foram significativas. Isso pode ser explicado porque quando se tem relações a/c maiores, existe um aumento da quantidade de água entre os grãos, ocorrendo um afastamento entre os mesmos, o que diminui consideravelmente a fricção. Isso explica a menor influência da incorporação do AMR na consistência dessas misturas em relação às argamassas com fatores a/c mais baixos.

Nota-se que as maiores diferenças nos valores de viscosidade ocorrem para as menores rotações. Na medida em que a rotação vai aumentando, os pontos das curvas tendem a se aproximar. Verifica-se, também, que para a menor rotação imposta (rotação inicial), ocorre o maior valor de viscosidade para todas as misturas, com maiores evidências para os fatores a/c mais baixos. Isso ocorre, provavelmente, devido a grande força inicial necessária para vencer a resistência ao giro do *spindle* nas misturas de argamassa. Estas se apresentam inicialmente em repouso e, quando a palheta começa a girar, detecta um alto valor de viscosidade inicial, que depois tende a diminuir, quando a tendência de escoamento do fluido é criada, reduzindo a tensão cisalhante entre os grãos. Como as misturas de argamassas são diferentes, os sistemas analisados apresentaram resultados também distintos em relação aos valores de viscosidade.

6.1.2 Estado Endurecido

6.1.2.1 Análise Termogravimétrica

Da Figura 59 à Figura 64 são apresentadas as curvas das análises termogravimétricas realizadas para as misturas de argamassa, todas com relação água/cimento igual a 0,5. A partir destas curvas foram calculados os parâmetros água livre, TH, RCH e OH que estão apresentados na Tabela 28.

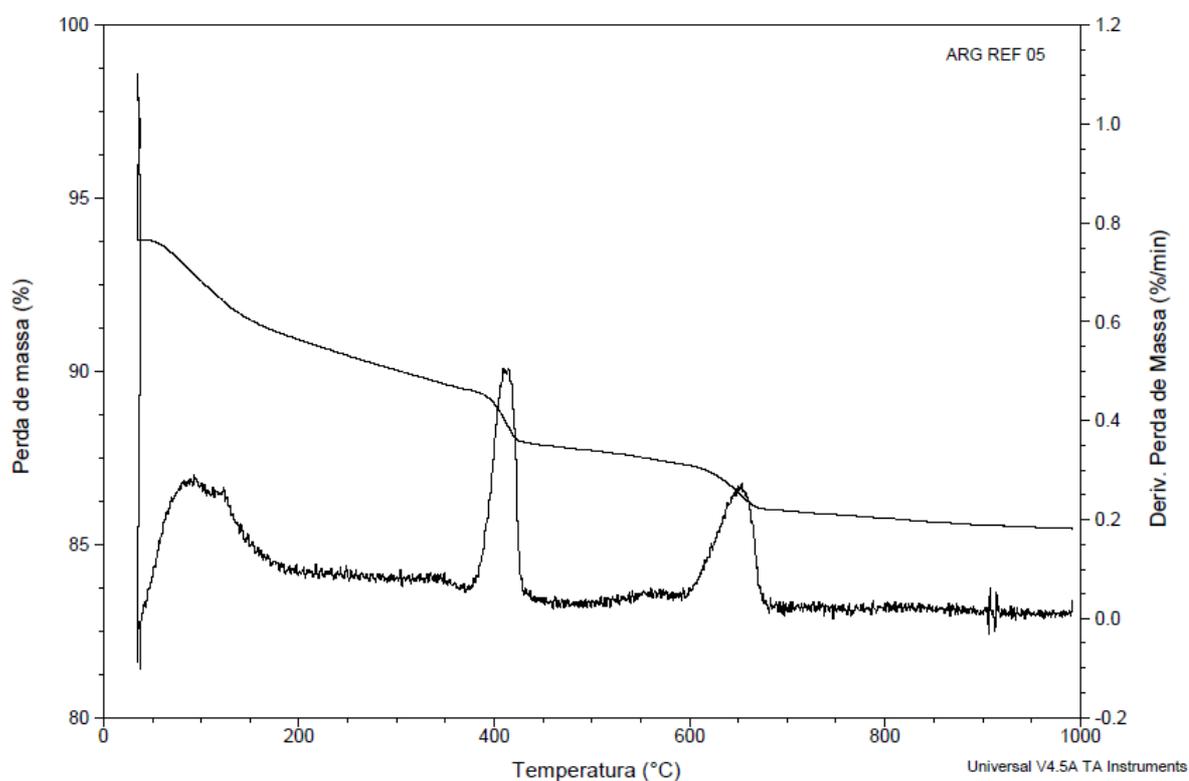


Figura 59 – Curva termogravimétrica das argamassas de referência.

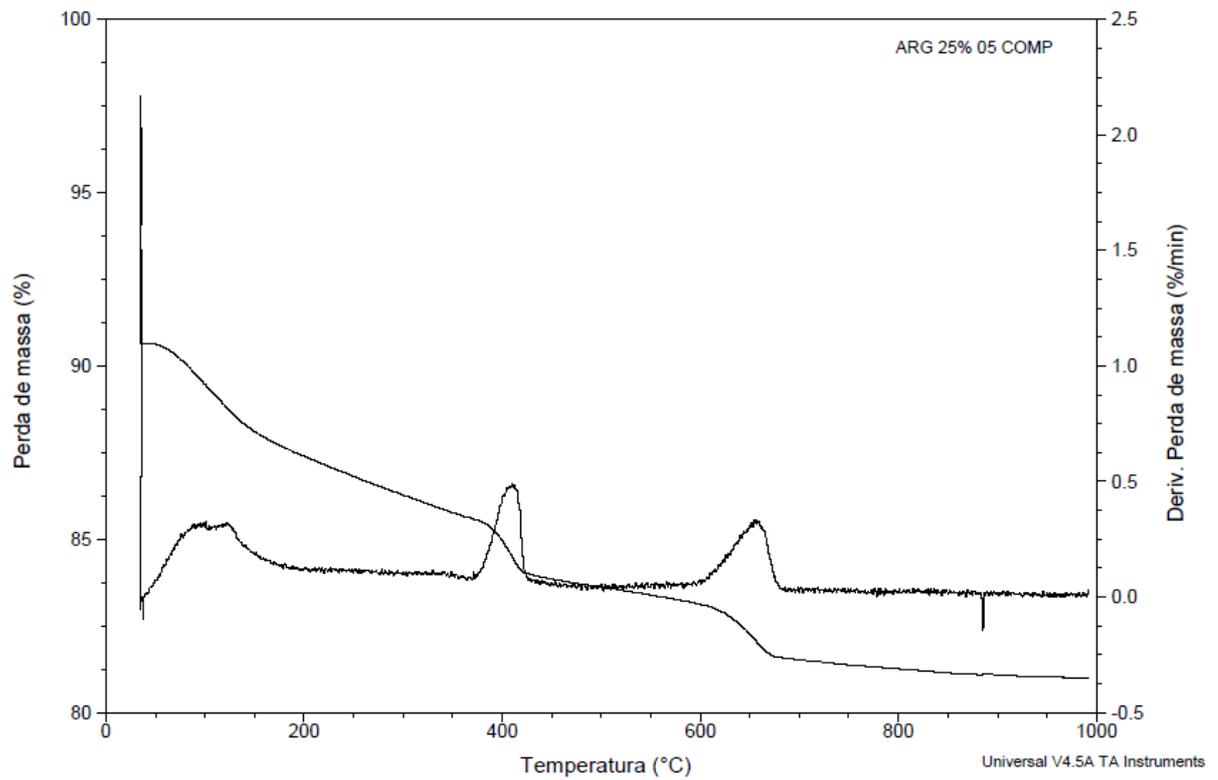


Figura 60 – Curva termogravimétrica das argamassas com 25% de AMR com compensação.

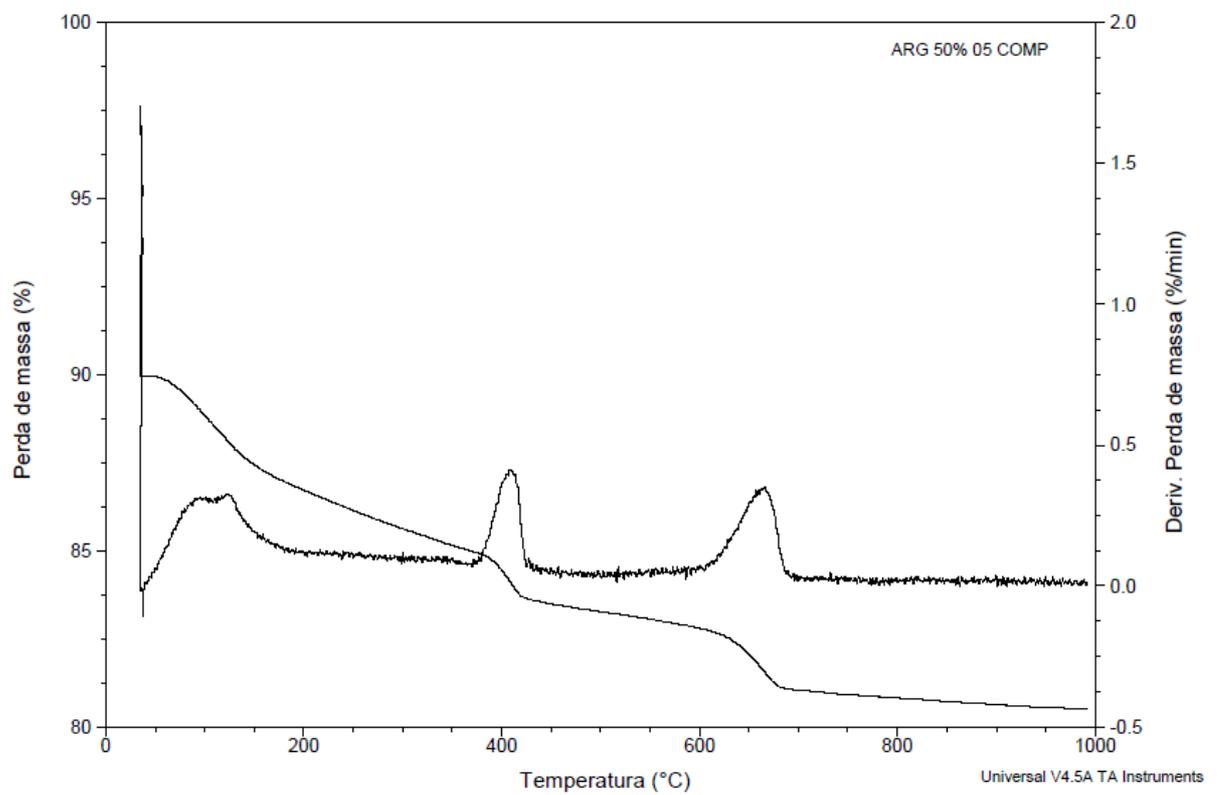


Figura 61 – Curva termogravimétrica das argamassas com 50% de AMR com compensação.

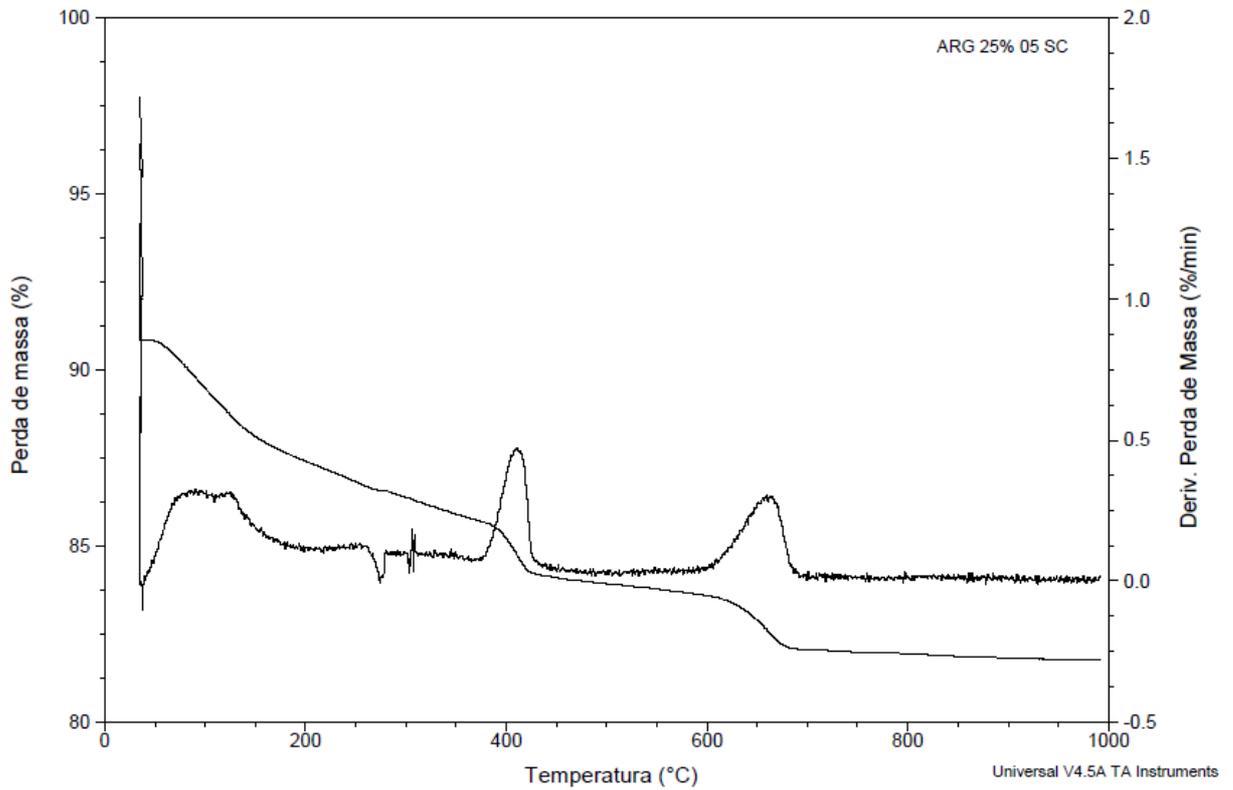


Figura 62 – Curva termogravimétrica das argamassas com 25% de AMR sem compensação.

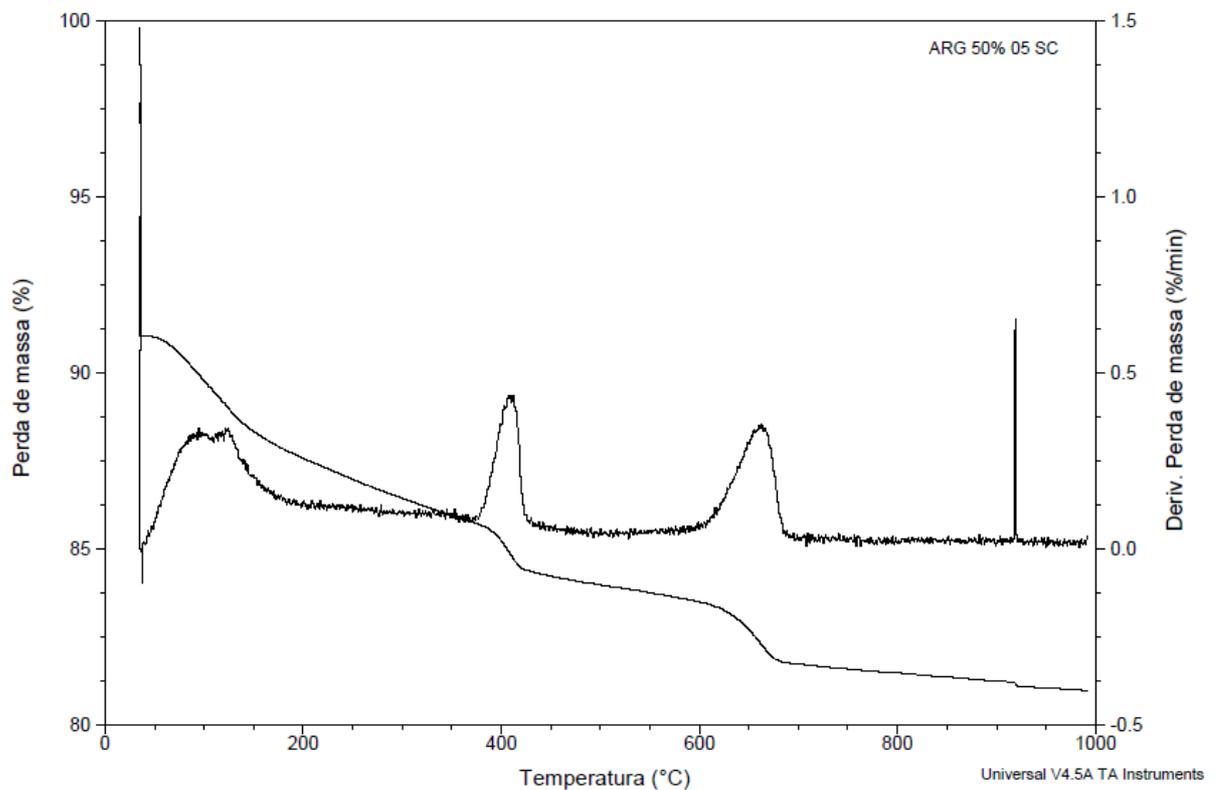


Figura 63 – Curva termogravimétrica das argamassas com 50% de AMR sem compensação.

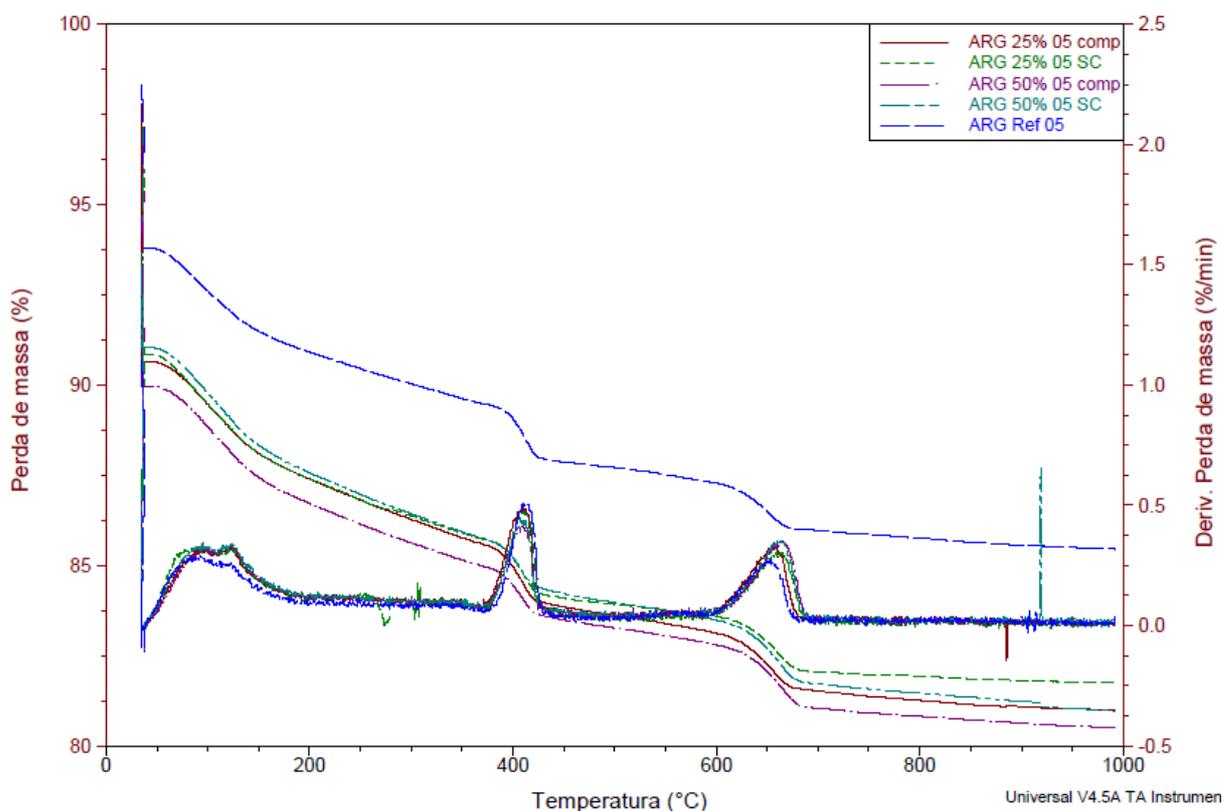


Figura 64 – Junção das curvas termogravimétricas das argamassas com $a/c = 0,5$.

Tabela 28 – Parâmetros analisados para as argamassas com $a/c = 0,5$.

AMR %	Água livre (%)	TH (%)	RCH (%)	OH (%)
REF 05	2,10	11,38	1,81	9,56
25% 05	3,30	15,55	1,99	13,56
50% 05	3,39	16,03	1,73	14,30
50% 05 SC	2,97	15,48	1,87	13,61
25% 05 SC	3,11	15,36	1,81	13,54

Como mostrado nas micrografias do AMR, este agregado é muito poroso e possui uma superfície rugosa. Quando a pasta de cimento entra em contato com essa superfície, ela impregna os poros, aumentando a fricção entre os grãos, o que aumenta a tensão cisalhante e a dificuldade de escoamento da mistura. Quando o grão absorve água, esta pode retornar para a matriz, gerando pontos de hidratações posteriores, semelhantes a núcleos de hidratos. Esses pontos de nucleação geram hidratos desconectados. Esta geração de hidratos adicionais não

foi suficiente para o aumento na resistência à compressão axial, pois existem mais hidratos, porém, maior volume de poros e hidratos desconectados.

De acordo com as análises termogravimétricas, as misturas contendo AMR possuem mais água livre, sendo que as argamassas que sofreram compensação possuem ainda mais em relação às misturas recicladas que não sofreram esse procedimento. A presença do RCD promoveu a geração de mais água quimicamente combinada, havendo um aumento do número de hidratos, sendo que para os teores de 50% com compensação houve maior quantidade de água combinada do que para 25%, também com compensação. Para as misturas sem compensação, houve uma pequena diferença da quantidade de água combinada em relação aos teores de substituição.

Verifica-se, independente da compensação, que o resíduo não reagiu, pois a quantidade de hidróxido praticamente não variou. Isso indica que não há atividade pozolânica da fração fina do RCD utilizado nesta pesquisa, o contrário do que foi encontrado por outros pesquisadores como Levy (1997), Leite (2001), Vieira (2003).

6.1.2.2 Resistência à Compressão Axial

Neste tópico serão discutidos os resultados de resistência à compressão axial, obtidos para as argamassas desta pesquisa.

As Tabelas de 29 a 31 apresentam a resistência à compressão axial para as argamassas estudadas em todas as idades, para todas as relações água/cimento, bem como seus respectivos valores de coeficiente de variação (CV).

Tabela 29 – Resistência à Compressão axial – Argamassa a/c = 0,4.

Idade (dias)	Resistência à Compressão Axial (MPa) - Argamassa a/c = 0,4									
	REF	CV(%)	25% AMR	CV(%)	50% AMR	CV(%)	25% AMR SC	CV(%)	50% AMR SC	CV(%)
3	34,7	8,5	20,4	10,0	26,5	4,3	31,5	4,5	30,8	2,6
7	36,2	4,4	28,7	2,5	32,1	4,8	32,8	5,3	36,2	2,6
28	47,5	4,5	37,3	5,7	35,1	4,0	39,6	7,1	44,2	0,6

Tabela 30 – Resistência à Compressão axial – Argamassa a/c = 0,5.

Idade (dias)	Resistência à Compressão Axial (MPa) - Argamassa a/c = 0,5									
	REF	CV(%)	25% AMR	CV(%)	50% AMR	CV(%)	25% AMR SC	CV(%)	50% AMR SC	CV(%)
3	25,3	10,0	16,1	4,4	18,0	2,1	21,2	10,0	20,7	4,9
7	28,4	7,8	20,4	3,2	20,8	6,8	25,7	10,0	26,4	3,1
28	37,4	6,9	28,7	7,8	24,9	3,4	30,4	2,6	35,3	10,0

Tabela 31 – Resistência à Compressão axial – Argamassa a/c = 0,6.

Idade (dias)	Resistência à Compressão Axial (MPa) - Argamassa a/c = 0,6									
	REF	CV(%)	25% AMR	CV(%)	50% AMR	CV(%)	25% AMR SC	CV(%)	50% AMR SC	CV(%)
3	16,1	10,0	9,4	10,0	12,3	2,8	16,0	10,00	14,4	4,70
7	23,3	2,8	17,9	2,5	14,9	9,4	20,3	7,60	19,5	6,00
28	30,6	7,4	22,7	7,8	19,7	4,6	25,3	3,30	29,0	9,50

A Figura 65 (a), (b) e (c) apresenta a relação entre a resistência à compressão axial das argamassas em função da idade para o teor de 25%, enquanto que a Figura 66 (a), (b) e (c) apresenta a relação entre a resistência à compressão axial das argamassas em função da idade, para o teor de 50% de substituição de areia natural por AMR.

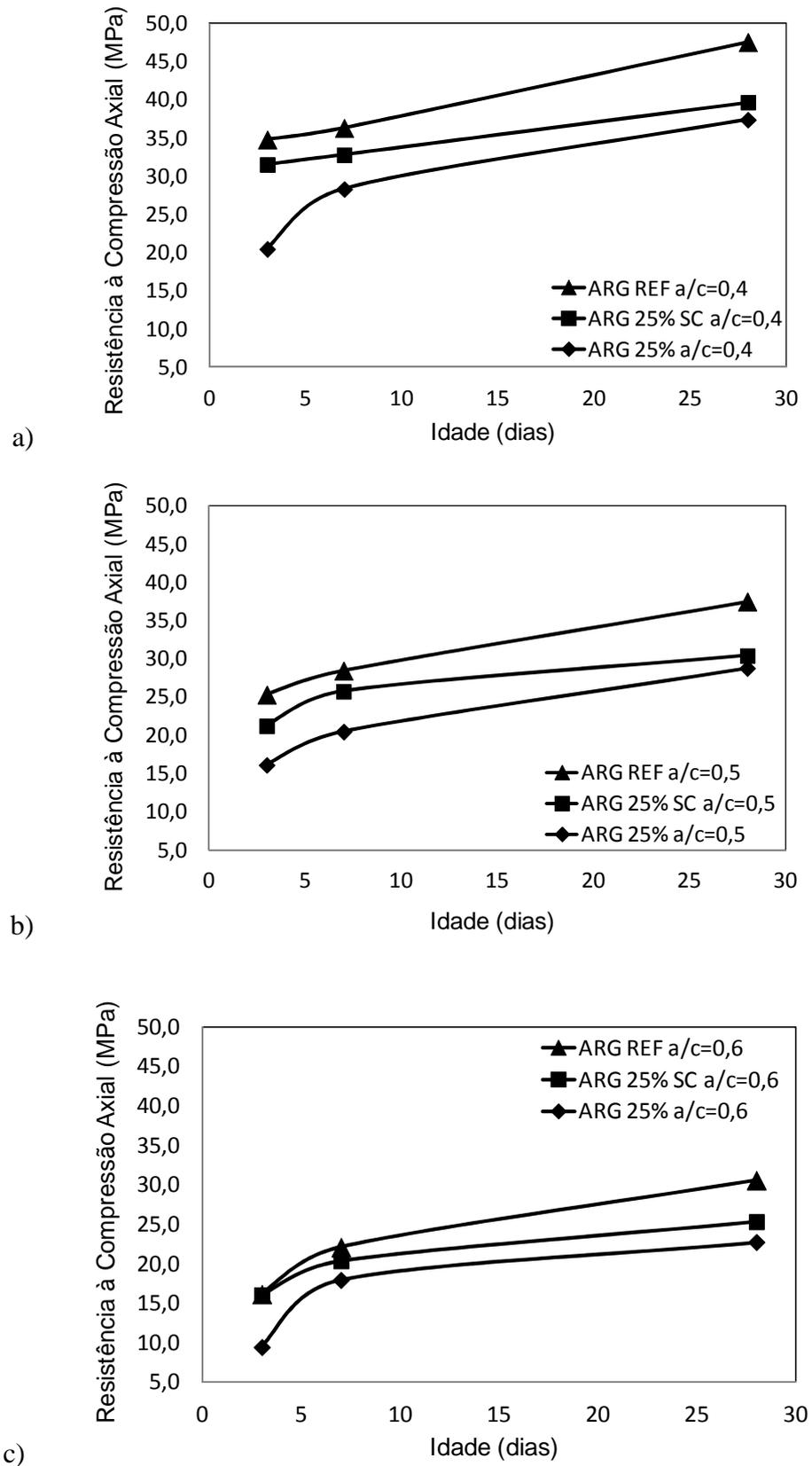


Figura 65- Resistência à Compressão axial *versus* Idade, para o teor de 25%. a) $a/c = 0,4$; b) $a/c = 0,5$ e c) $a/c = 0,6$.

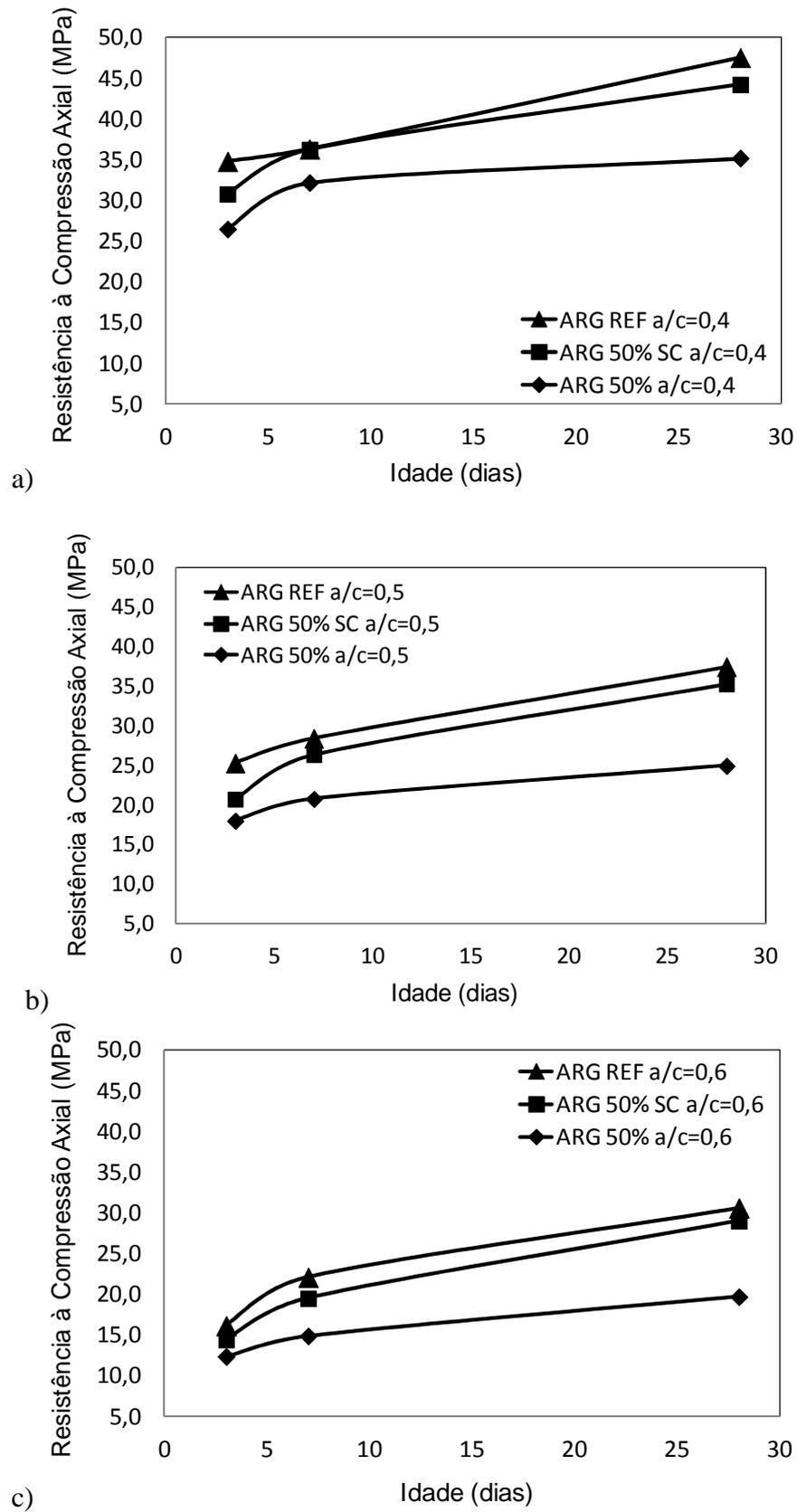


Figura 66 - Resistência à Compressão axial *versus* Idade, para o teor de 50%. a) a/c = 0,4; b) a/c = 0,5 e c) a/c = 0,6.

Verifica-se para a argamassa com relação $a/c = 0,4$ que ocorre um aumento da resistência à compressão axial em função do tempo, para ambos os teores de substituição. Este mesmo comportamento ocorre para as argamassas com relação $a/c = 0,5$ e $a/c = 0,6$. A presença do agregado miúdo reciclado promoveu uma redução na resistência à compressão das argamassas em todas as idades e independente do tratamento dado ao agregado reciclado (compensação ou não), para ambos os teores de substituição. Verifica-se que o procedimento de compensação de água promove uma redução mais significativa na resistência à compressão das misturas, independente do teor e em todas as idades.

Percebe-se também que existe uma proximidade notória entre os valores de resistência das argamassas de referência e os valores das argamassas com 50% de substituição sem compensação, para todos os fatores a/c . Isso coloca em evidência a influência existente em se adotar o procedimento de compensação de parte da água de absorção dos agregados reciclados.

Teoricamente, quando se compensa parte da água de absorção dos agregados reciclados, considera-se que esta água irá ser absorvida pelos mesmos. Porém, como foi percebida uma diferença dos valores de resistência entre as argamassas em relação à prática de compensação, para um mesmo teor de substituição, pode-se dizer que a água de compensação adicionada aos agregados reciclados, foi passada para a pasta, elevando o fator água/cimento da mesma e, portanto, diminuindo a resistência.

Para evidenciar o efeito do procedimento de compensação nas misturas contendo AMR definiu-se o I_{ic} e o I_{isc} calculado pelas equações a seguir.

$$I_{ic} = \left(1 - \frac{f_{c_{comp}}}{f_{c_{ref}}} \right) \cdot 100 \quad \text{Equação 27}$$

$$I_{isc} = \left(1 - \frac{f_{c_{sc}}}{f_{c_{ref}}} \right) \cdot 100 \quad \text{Equação 28}$$

Onde: I_{ic} = índice de influência da compensação; I_{isc} = índice de influência sem compensação; $f_{c_{comp}}$ = resistência à compressão axial com compensação (MPa); $f_{c_{sc}}$ = resistência à compressão axial sem compensação (MPa); $f_{c_{ref}}$ = resistência à compressão axial de referência (MPa).

A Figura 67 (a) a (f) apresenta os índices de influência da compensação nas misturas avaliadas.

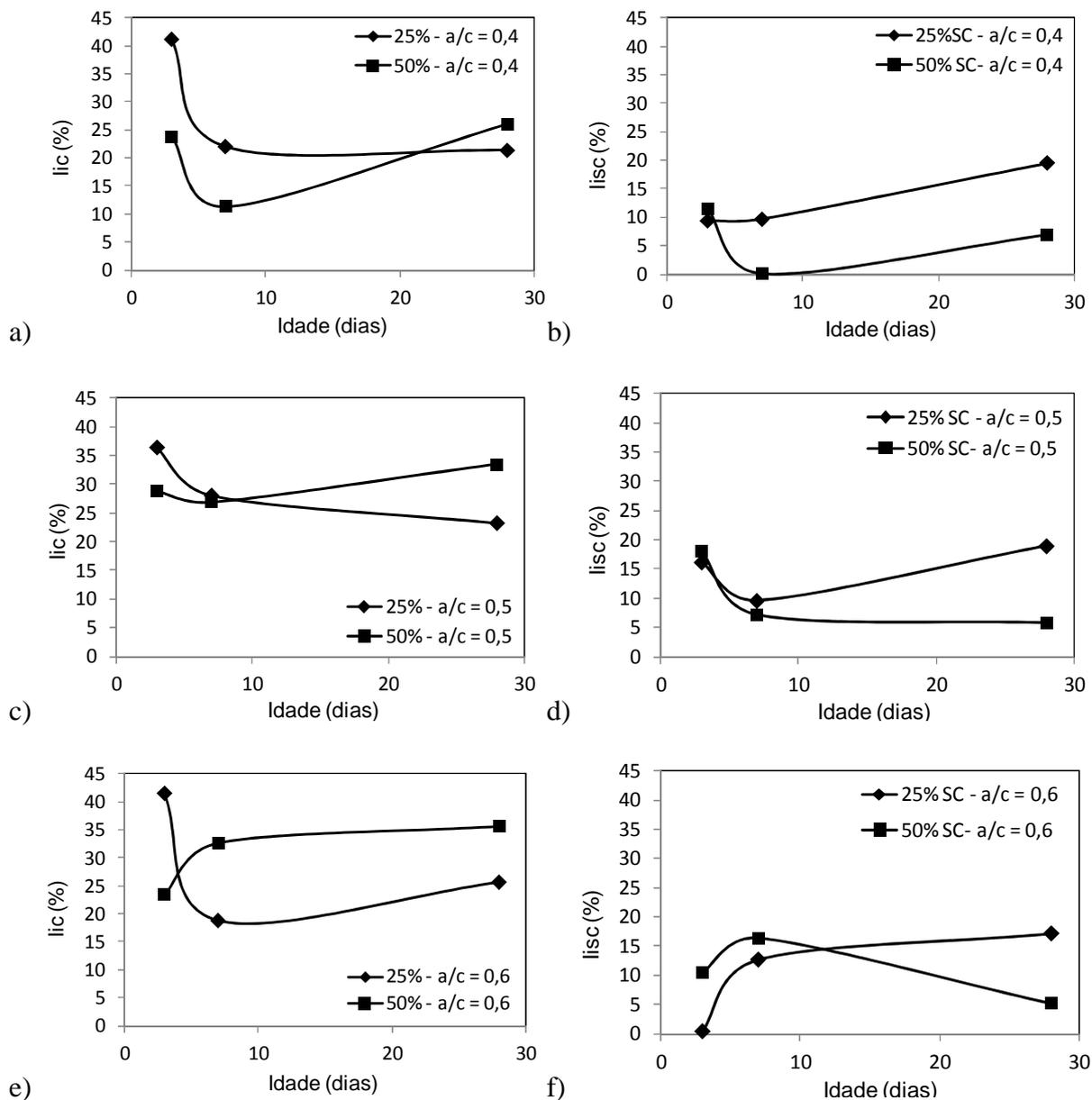


Figura 67 – Índices de influência I_{ic} e I_{isc} das misturas para os teores de 25% e 50%: a) Com compensação para $a/c = 0,4$; b) Sem compensação para $a/c = 0,4$; c) Com compensação para $a/c = 0,5$; d) Sem compensação para $a/c = 0,5$; e) Com compensação para $a/c = 0,6$; f) Sem compensação para $a/c = 0,6$.

Verifica-se para as misturas com relação $a/c = 0,4$ que o I_{isc} é menor que o I_{ic} tanto para o teor de 25% de AMR quanto para o teor de 50% de AMR. Isto indica que o processo de compensação gera um maior impacto na redução da resistência à compressão axial devido à maior presença de água e, conseqüentemente, contribui para a formação de poros maiores, deixando a mistura menos estruturada. Este comportamento ocorre também nas misturas com relações $a/c = 0,5$ e $0,6$.

Nota-se que o processo de compensação influenciou de forma mais significativa as misturas com o teor de 25% nas idades iniciais, em geral, quando comparado com misturas de teor de 50%. Porém, verifica-se que para a idade de 28 dias, o impacto causado pela compensação nas misturas com 50% de AMR é maior em todos os casos.

Para as misturas sem compensação, nota-se que o impacto nas misturas com teor de 25% para a idade de 28 dias foi significativo, apresentando pouca diferença em relação ao processo de compensação nesta mesma idade, porém mostrou-se ainda menor em relação ao impacto negativo causado do processo compensatório. Ocorreu o contrário para as misturas com teor de 50%, em que o processo de compensação gerou grande impacto na idade de 28 dias, diminuindo bastante este impacto quando não se pratica a compensação para esta mesma idade.

Como a presença de AMR influencia na relação água/cimento efetiva da mistura, buscou-se avaliar a relação a/c obtida através da equação da linha de tendência da curva a/c *versus* resistência à compressão das argamassas de referência. A equação da Figura 68 surgiu a partir do ajuste da curva exponencial para os dados das argamassas de referência na idade de 28 dias e obteve boa relação com $R^2 = 0,998$. Os valores da resistência axial das argamassas contendo AMR foram substituídos na Equação 29 obtendo o que definimos como relação a/c real do material endurecido.

$$f_c = 113,83 \cdot e^{-2,2 \cdot \left(\frac{a}{c}\right)} \quad \text{Equação 29}$$

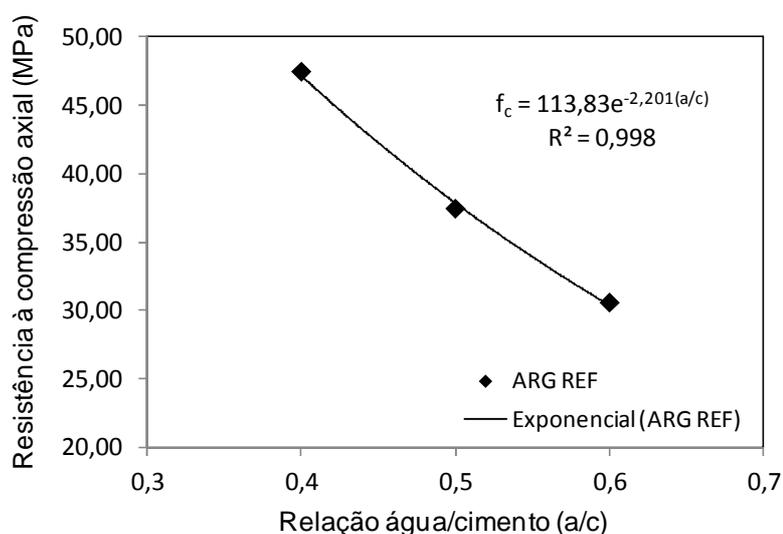


Figura 68 – Ajuste da curva exponencial das argamassas de referência aos 28 dias.

A Figura 69 (a) a (f) correlaciona a relação a/c real em função da idade das argamassas.

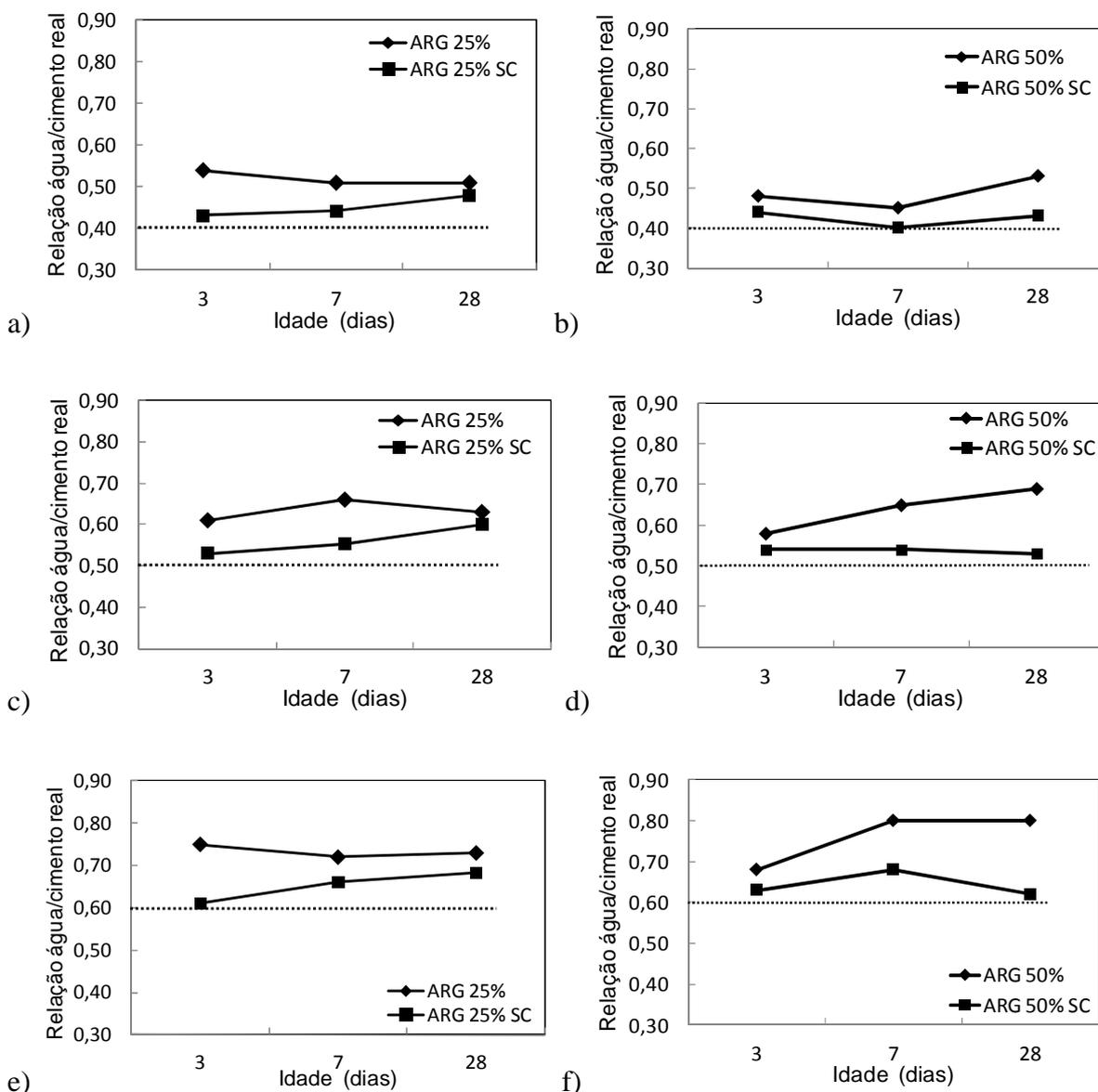


Figura 69 – Relação entre o fator a/c real *versus* Idade: a) Teor de 25% para $a/c_{ref} = 0,4$; b) Teor de 50% para $a/c_{ref} = 0,4$; c) Teor de 25% para $a/c_{ref} = 0,5$; d) Teor de 50% para $a/c_{ref} = 0,5$; e) Teor de 25% para $a/c_{ref} = 0,6$; f) Teor de 50% para $a/c_{ref} = 0,6$.

Nota-se que para todas as misturas, para ambos os teores de substituição 25% e 50%, as relações a/c reais para as argamassas que não tiveram compensação são mais próximas da relação a/c de referência (linha pontilhada). Portanto, verifica-se em todos os gráficos, que a curva das misturas sem compensação é mais próxima da linha da relação a/c referência, enquanto que a curva das misturas com compensação dista significativamente. Isto ocorre porque a água compensada pode não estar ficando retida no agregado reciclado, sendo transferida para a pasta, aumentando a relação a/c real.

Como a análise da relação a/c real foi feita em relação à queda de resistência das misturas quando comparadas às de referência, e como não houve variação do teor de água acrescentado à mistura, a queda de resistência das misturas sem compensação pode ter sido ocasionada pela porosidade do resíduo.

É importante salientar que o fator a/c real é função da resistência apresentada pelas misturas, como as argamassas com e sem compensação apresentaram resistências menores que as de referência, elas apresentaram relações a/c reais maiores. Porém, a mistura sem compensação apresentou quedas na resistência pouco significativas.

Quando se compara o fator a/c real em relação ao teor de substituição do AMR, nota-se que para o teor de 50% a linha das misturas sem compensação ficou mais próxima da linha de referência, quando comparadas à linha sem compensação das misturas de 25% de substituição. Isto indica que a resistência das misturas de 50% sem compensação foram maiores que a resistência das misturas de 25% de AMR sem compensação. Esse aumento de resistência para as misturas de 50% SC pode ter sido devido a um melhor empacotamento da mistura, diminuindo o volume de poros maiores nas argamassas.

A Figura 70 (a), (b) e (c) apresenta a relação entre a resistência à compressão axial das argamassas de referência, com 25% de AMR e 25% AMR sem compensação e o fator água/cimento para três, sete e 28 dias, respectivamente.

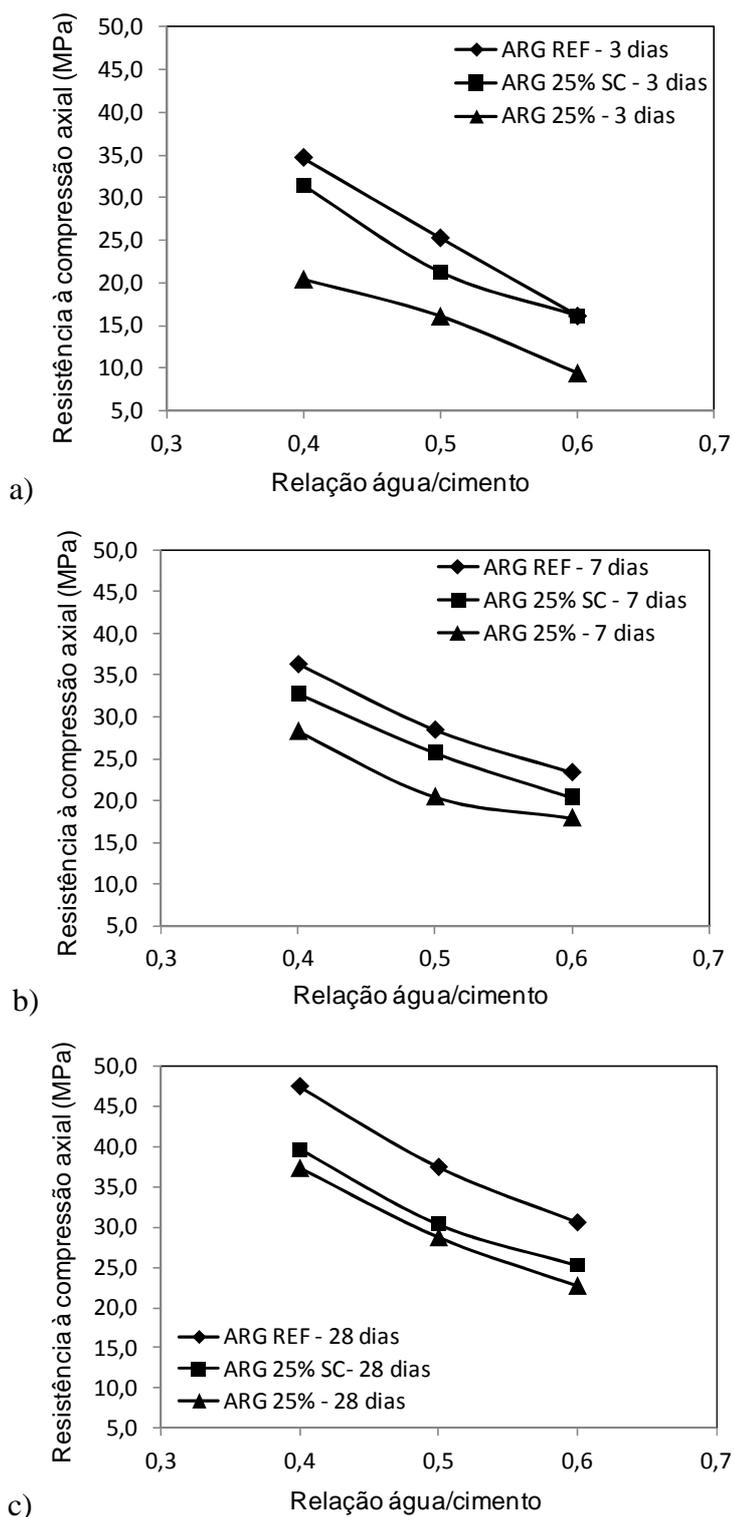


Figura 70 – Resistência à compressão axial para argamassas de referência, com 25% AMR com compensação e 25% AMR sem compensação *versus* relação a/c: a) 3 dias; b) 7 dias e c) 28 dias.

A Figura 71 (a), (b) e (c) apresenta a relação entre a resistência à compressão axial das argamassas com 50% de AMR e o fator água/cimento para três, sete e 28 dias, respectivamente.

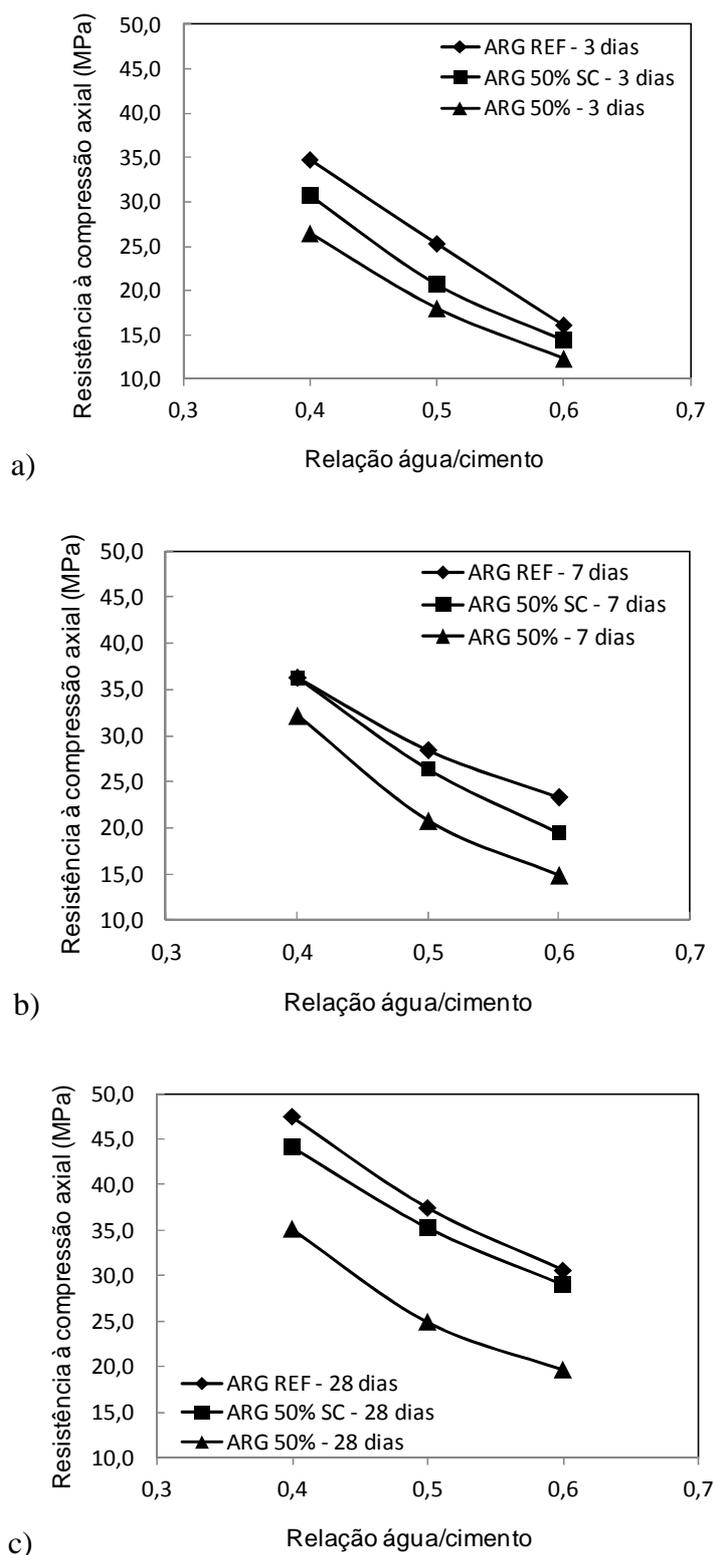


Figura 71 – Resistência à compressão axial para ARG 50% *versus* relação a/c: a) 3 dias; b) 7 dias e c) 28 dias.

Verifica-se que para as três idades estudadas, três, sete e 28 dias, como também para os três fatores a/c estudados, os valores de resistência das argamassas de referência sempre foram superiores aos valores de resistência das argamassas com resíduo, independente do processo de tratamento do agregado reciclado.

Pode-se perceber que para os três fatores a/c estudados, que todas as curvas obedecem a Curva de Abrams, ou seja, quanto maior a relação a/c , menor a resistência.

Nota-se que não compensando parte da água de absorção dos agregados reciclados diminui a discrepância desses valores em relação aos de referência. O processo de compensação, portanto, favoreceu a queda da resistência à compressão axial das argamassas. Isso pode ter ocorrido porque quando se faz a compensação de água do AMR não tem como garantir que ele vai absorvê-la totalmente, além disso, essa absorção não ocorre de maneira uniforme. A água de compensação pode ter contribuído para elevar o fator a/c da pasta, reduzindo a resistência da argamassa.

Verificou-se também que as argamassas com um teor de 50% de AMR apresentaram resistências maiores, em geral, que as misturas com 25% de resíduo.

6.1.2.3 Absorção por Imersão

A Figura 72 (a) e (b) apresenta a relação entre a absorção das argamassas e o fator água cimento.

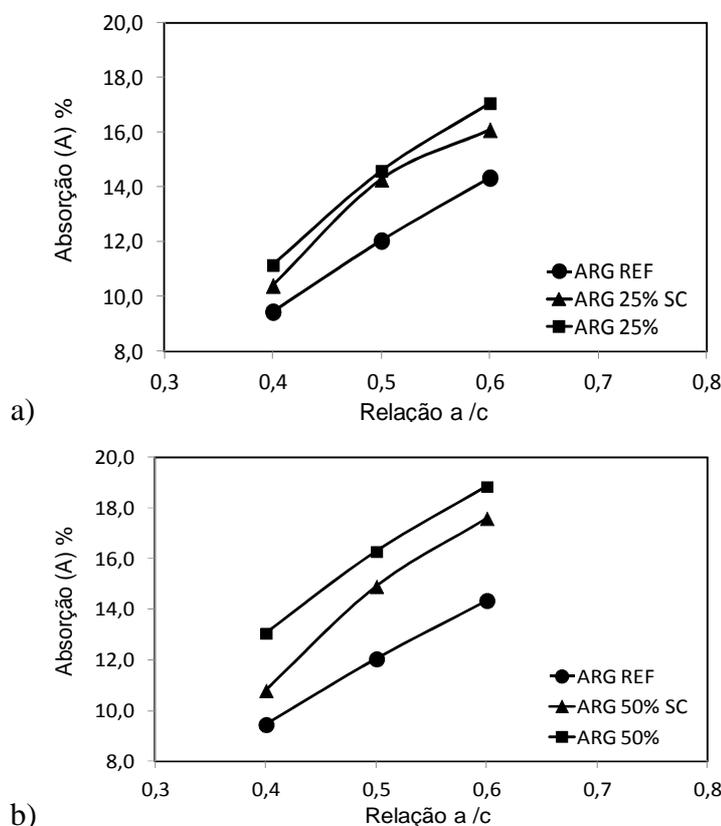


Figura 72 – Absorção por imersão das argamassas *versus* relação a/c : a) Curvas da argamassa de referência, argamassa com 25% de AMR sem compensação (SC) e argamassa com 25% de AMR com compensação; b) Curvas da argamassa de referência, argamassa com 50% de AMR sem compensação (SC) e argamassa com 50% de AMR com compensação.

Pode-se notar para os valores de absorção apresentados que existe uma coerência entre os mesmos e os valores de resistência. Quanto maior a relação a/c, mais fraca será a pasta de cimento, tornando a argamassa mais porosa e, portanto com maior absorção. Como visto em ambos os gráficos, as argamassas que tiveram compensação apresentaram uma maior absorção. Isto reforça ainda mais o fato de que a água de compensação pode ter migrado para a pasta, elevando o fator a/c da mesma, tornando-a mais porosa e, portanto mais absorvente.

Analisando a absorção em função dos teores de substituição 25% e 50%, nota-se que os valores de absorção foram maiores para as misturas com teor de 50% de AMR, apesar destas serem mais resistentes que as misturas com 25% de AMR. Este fato pode ser explicado a partir de uma análise da microestrutura dos poros dessas argamassas.

Como a porosidade total das misturas com teor de 50% é maior, sugere-se, portanto, que elas possuem um volume de microporos maior, não impactando negativamente na resistência. Já as misturas com 25% de substituição possuem porosidade total menor, mas pode ser sugerido que elas possuem maior volume de macroporos, impactando significativamente a resistência.

6.2 Etapa 2: Concretos

Os resultados que serão apresentados a seguir foram divididos em estado fresco e estado endurecido.

6.2.1 Estado Fresco

Os concretos no estado fresco foram avaliados a partir do ensaio de abatimento do tronco de cone. Verificou-se que os concretos de referência apresentaram valores de abatimento dentro da faixa estipulada de 70 ± 10 mm, sem a necessidade do uso de aditivo superplastificante. Porém, a adição do agregado miúdo reciclado deixou a mistura mais áspera, além de ter provocado um aumento na tensão de cisalhamento entre os grãos, tornando o escoamento mais dificultoso.

Notou-se, portanto, que o teste de abatimento não conseguia caracterizar as misturas recicladas com precisão, já que estas não se apresentavam trabalháveis, apesar de possuírem moldabilidade. Verificou-se o que estava na literatura, que é importante avaliar o estado fresco de concretos reciclados inserindo um componente dinâmico, pois assim haverá uma

tendência a diminuição do atrito interno entre os grãos, facilitando o escoamento, dando uma maior sensibilidade das características das misturas no estado fresco.

As misturas com agregados reciclados apresentaram valores de abatimento muito variáveis e fora do intervalo estipulado. Porém, as misturas apresentaram-se coesas, homogêneas e moldáveis, mesmo que com abatimentos reduzidos, mostrando que o ensaio de abatimento de tronco de cone não é apropriado para misturas ásperas com grande tensão de cisalhamento entre os grãos, como já sabido da literatura.

Segundo Leite (2001), este fato denota uma certa ineficiência deste método tanto na avaliação da trabalhabilidade de concretos com agregados reciclados, quanto na determinação da trabalhabilidade de concretos convencionais com pequenas quantidades de cimento. Todavia, as misturas pobres ou ásperas tendem ao abatimento por cisalhamento, ou ao desmoronamento, podendo se obter resultados muito variáveis para diferentes amostras da mesma mistura.

A Figura 73 (a) e (b) ilustra o ensaio de abatimento do tronco de cone para as misturas de referência dosadas pelos métodos (a) IPT/EPUSP e (b) Mehta/Aitcin.

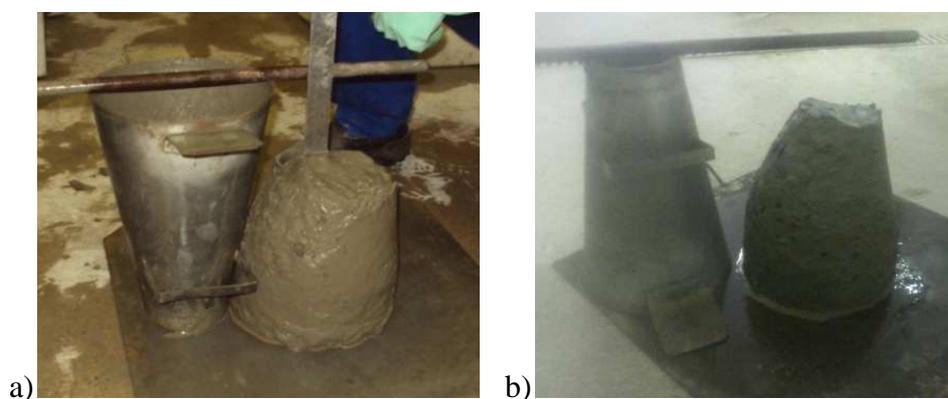


Figura 73 – *Slump test*. a) Método IPT/EPUSP; b) Método Mehta/Aitcin.

Após se fazer a medida do abatimento de tronco de cone, eram dados suaves golpes na base inferior dos troncos de cone de concreto com o soquete do ensaio de *slump*, a fim de verificar a coesão das misturas. A forma como os troncos desabavam, homogêneos ou não, com ou sem o desprendimento de agregado graúdo foi analisada, relatando um teor adequado ou não de argamassa na mistura. A Figura 74 (a), (b) e (c) apresenta as fotos de concretos dos métodos do IPT/EPUSP, Mehta/Aitcin e ACI/ABCP, respectivamente, representando a verificação do caimento do tronco descrita acima.



Figura 74 – Verificação da coesão da mistura. a) Método IPT/EPUSP; b) Método Mehta/Aitcin e c) Método ACI/ABCP.

Pode-se perceber pela análise das figuras que ilustram o caimento do tronco de cone, que as misturas com os teores de argamassa mais elevados, IPT/EPUSP e Mehta/Aitcin, apresentaram um caimento mais homogêneo, sem desprendimento de agregado graúdo, o que demonstra que as misturas apresentam um bom teor de argamassa. Para o método do ACI/ABCP, que possui o menor teor de argamassa (α), nota-se um caimento menos homogêneo e coeso quando comparado aos métodos anteriores. Apesar de estar com um teor de argamassa adequado para este trabalho, a mistura dosada pelo método ACI/ABCP foi desenvolvida de maneira a fornecer, para misturas plásticas, o mais baixo teor de areia.

Da Figura 75 à Figura 78 são apresentadas as imagens do ensaio de abatimento do tronco de cone para algumas misturas de concreto com agregado miúdo reciclado, conforme legenda especificada.

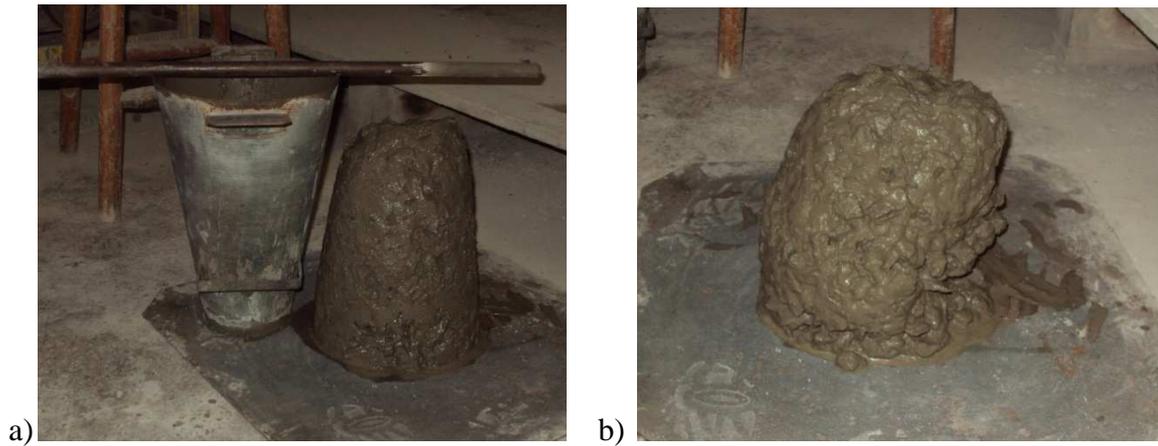


Figura 75 – a) *Slump Test* para o concreto dosado pelo método do ACI, com 25% de AMR, sem compensação; b) Verificação da coesão dessa mistura.

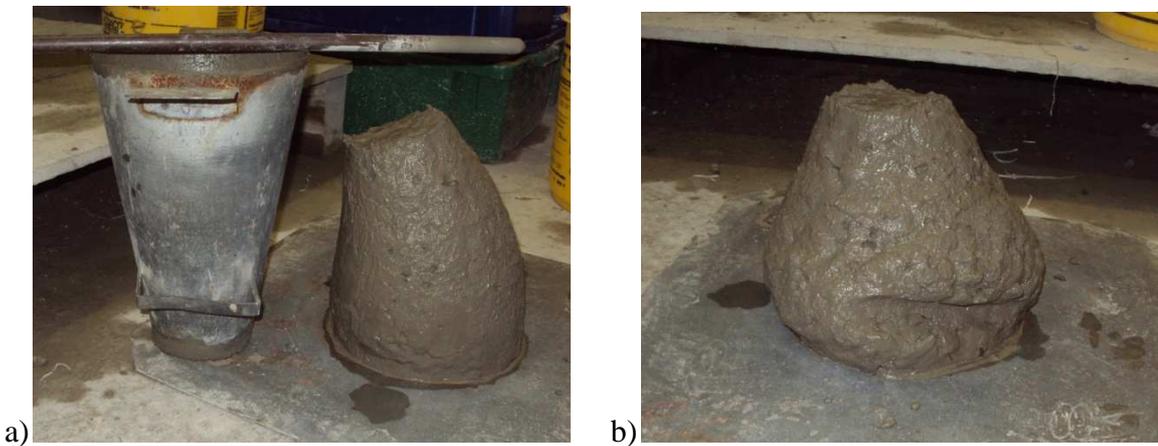


Figura 76 – a) *Slump Test* para o concreto dosado pelo método Mehta/Aitcin, com 25% de AMR, sem compensação; b) Verificação da coesão dessa mistura.

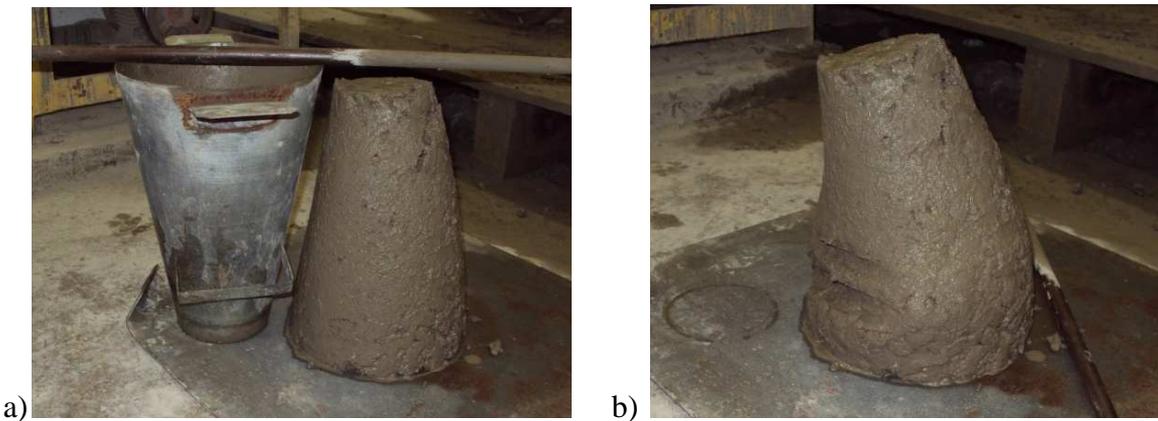


Figura 77 – a) *Slump Test* para o concreto dosado pelo método Mehta/Aitcin, com 50% de AMR, com compensação; b) Verificação da coesão dessa mistura.

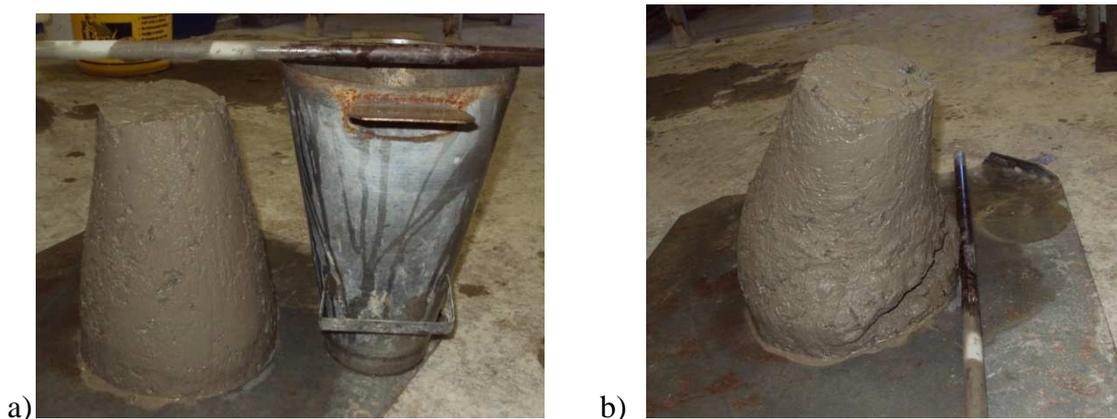


Figura 78 – a) *Slump Test* para o concreto dosado pelo método de Aitcin, com 50% de AMR, sem compensação; b) Verificação da coesão dessa mistura.

Nota-se que quanto maior o teor de agregado reciclado, mais aditivo era necessário, principalmente para relações a/c mais baixas.

Verifica-se que os métodos de dosagem estudados possuem parâmetros diferentes e por isso suas misturas apresentam características diferentes no estado fresco. Mesmo utilizando as mesmas quantidades de resíduo e iguais procedimentos de mistura, as quantidades necessárias de aditivos foram diferentes, e os valores de abatimento para os diferentes métodos foram variáveis. Por isso, não foi possível padronizar a quantidade de aditivo a ser usada nas misturas com AMR, pois a depender de suas características, era necessário aumentar ou diminuir para que atingisse a moldabilidade requerida.

6.2.2 Estado Endurecido

6.2.2.1 Resistência à Compressão Axial

As Tabelas de 32 a 36 apresentam a resistência à compressão axial para os métodos de dosagem estudados em todas as idades, bem como seus respectivos valores de coeficiente de variação (CV).

Tabela 32 – Resistência à Compressão axial – concretos de referência.

Idade (dias)	Resistência à Compressão Axial (MPa) - Referência							
	MEHTA/AITCIN	CV(%)	ACI/ABCP	CV(%)	AITCIN	CV(%)	IPT/EPUSP	CV(%)
3	24,3	5,0	23,5	4,5	25,6	1,4	22,0	5,0
7	32,6	1,3	27,7	9,2	31,2	1,1	26,2	2,6
28	38,2	4,2	33,4	2,8	38,1	9,3	35,8	5,0
63	42,4	4,0	35,0	0,8	43,2	8,0	42,5	9,4

Tabela 33 – Resistência à Compressão axial – concretos 25% AMR com compensação.

Idade (dias)	Resistência à Compressão Axial (MPa) - 25% com compensação							
	MEHTA/AITCIN	CV(%)	ACI/ABCP	CV(%)	AITCIN	CV(%)	IPT/EPUSP	CV(%)
3	18,1	5,7	15,3	6,9	20,9	10,0	25,4	1,1
7	26,6	2,8	21,6	3,2	28,3	5,5	32,7	3,0
28	33,2	4,2	26,2	4,3	35,9	2,3	40,5	5,1
63	33,4	3,2	29,3	6,5	40,7	2,0	45,9	2,9

Tabela 34 – Resistência à Compressão axial – concretos 50% AMR com compensação.

Idade (dias)	Resistência à Compressão Axial (MPa) - 50% com compensação							
	MEHTA/AITCIN	CV(%)	ACI/ABCP	CV(%)	AITCIN	CV(%)	IPT/EPUSP	CV(%)
3	24,2	7,8	27,0	2,8	24,8	4,5	22,1	2,50
7	31,8	5,5	32,4	2,0	29,4	3,6	32,2	1,00
28	40,6	6,6	37,3	0,9	40,6	1,7	35,6	1,70
63	45,9	4,5	44,9	5,0	43,6	3,7	46,1	4,60

Tabela 35 – Resistência à Compressão axial – concretos 25% AMR sem compensação.

Idade (dias)	Resistência à Compressão Axial (MPa) - 25% sem compensação							
	MEHTA/AITCIN	CV(%)	ACI/ABCP	CV(%)	AITCIN	CV(%)	IPT/EPUSP	CV(%)
3	21,1	1,5	19,4	10,0	23,1	4,7	26,5	7,90
7	29,6	0,9	28,5	1,6	33,8	2,2	33,4	1,40
28	39,2	3,8	36,2	4,2	42,4	4,1	43,2	3,30
63	44,7	1,4	42,3	2,0	48,1	10,0	46,9	8,10

Tabela 36 – Resistência à Compressão axial – concretos 50% AMR sem compensação.

Idade (dias)	Resistência à Compressão Axial (MPa) - 50% sem compensação							
	MEHTA/AITCIN	CV(%)	ACI/ABCP	CV(%)	AITCIN	CV(%)	IPT/EPUSP	CV(%)
3	36,6	2,0	28,0	3,6	31,2	2,2	29,3	7,20
7	44,9	2,1	34,8	1,1	39,4	2,0	36,2	2,50
28	48,8	1,9	43,0	3,2	46,1	1,9	44,0	2,20
63	53,5	3,2	51,7	2,4	47,7	1,8	52,7	3,20

A Figura 79 e a Figura 80 correlacionam o método de dosagem versus a idade dos concretos. Cada gráfico apresenta cinco curvas, que correspondem aos traços confeccionados.

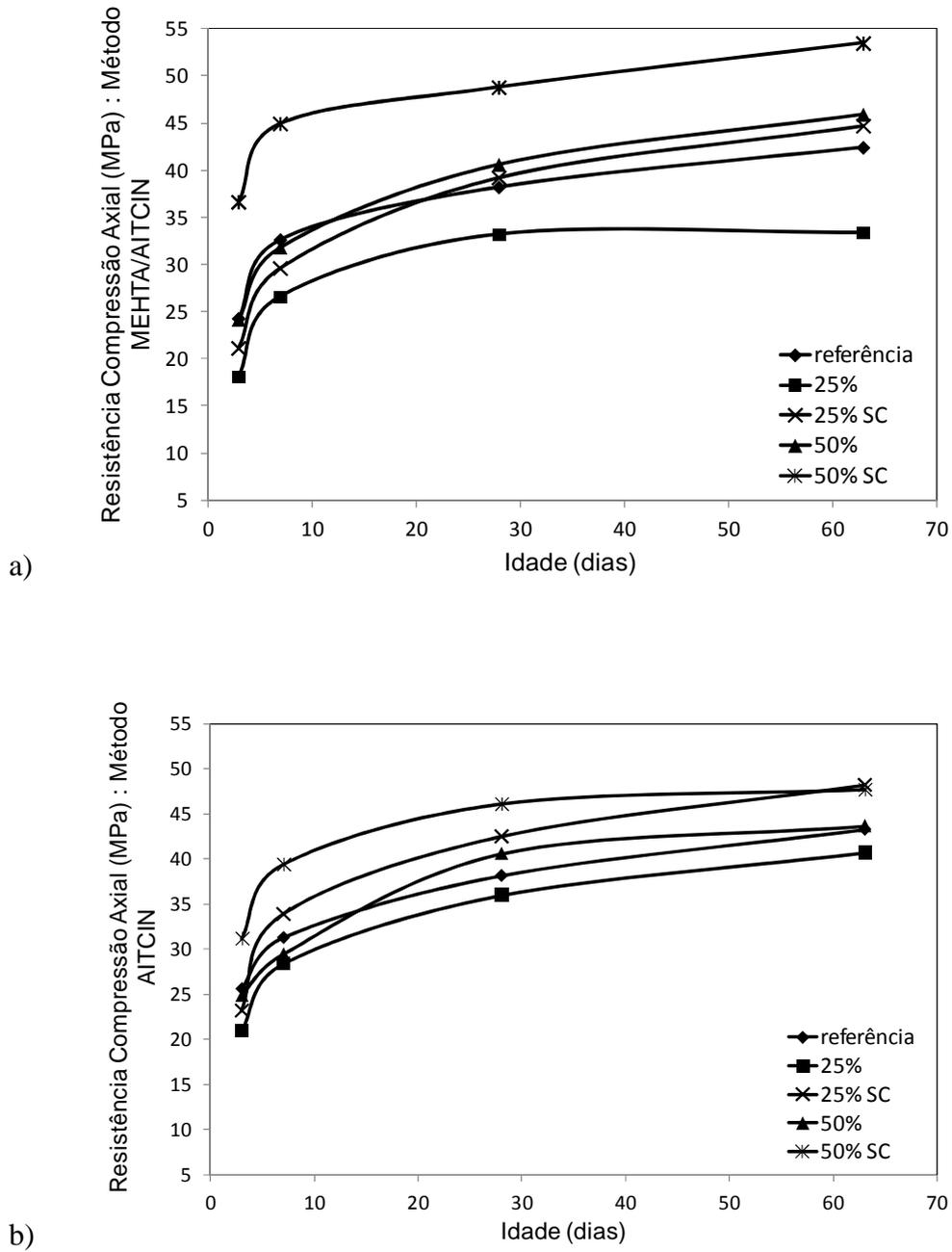


Figura 79 – Resistência à compressão axial *versus* idade. a) Método de dosagem Mehta/Aitcin; b) Método de dosagem Aitcin.

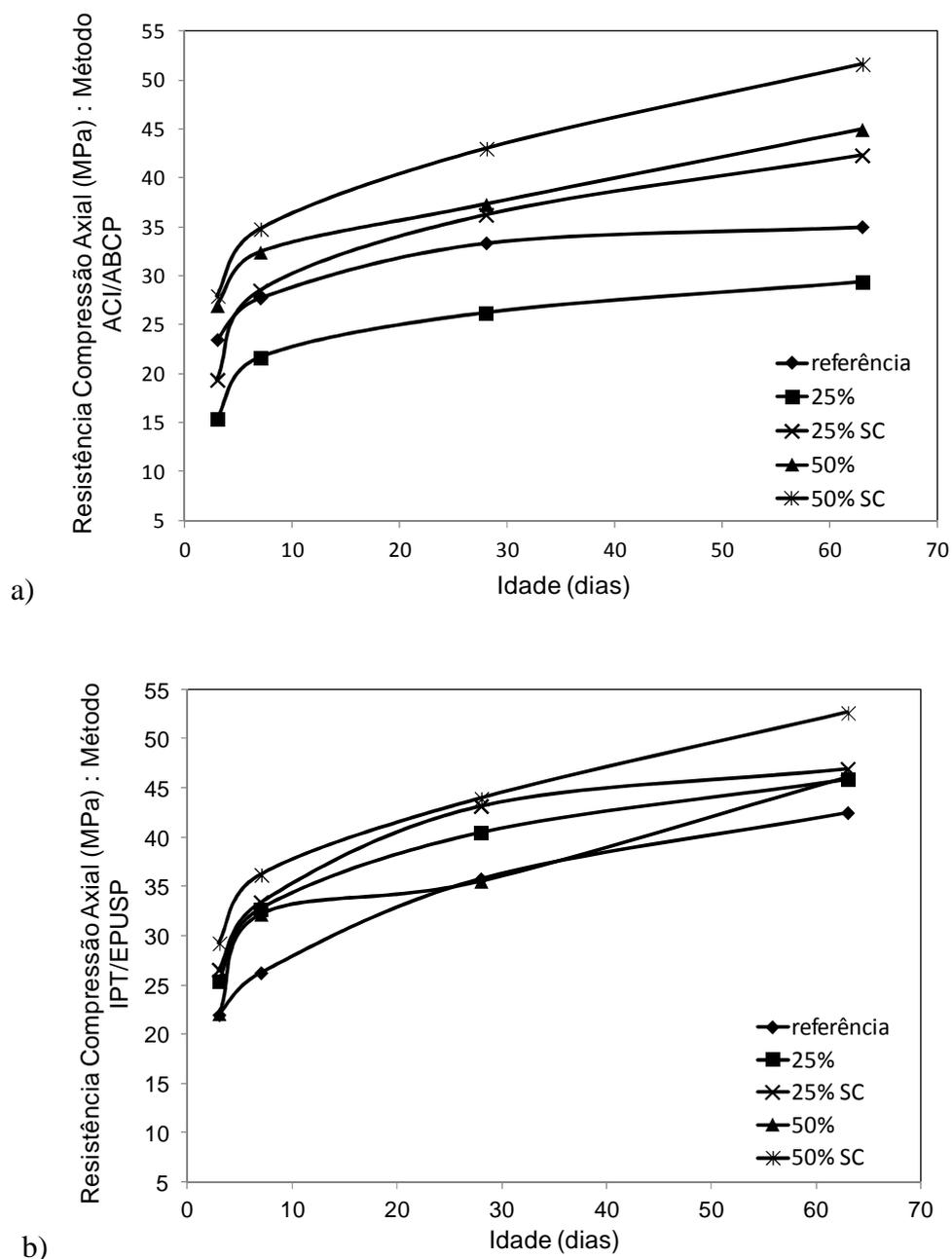


Figura 80 – Resistência à compressão axial *versus* idade. a) Método de dosagem ACI/ABCP; b) Método de dosagem IPT.

Nota-se, em geral, que para todos os métodos as resistências dos concretos reciclados são iguais ou superiores às resistências dos concretos de referência, a exceção dos concretos reciclados com 25% de substituição que sofreram compensação.

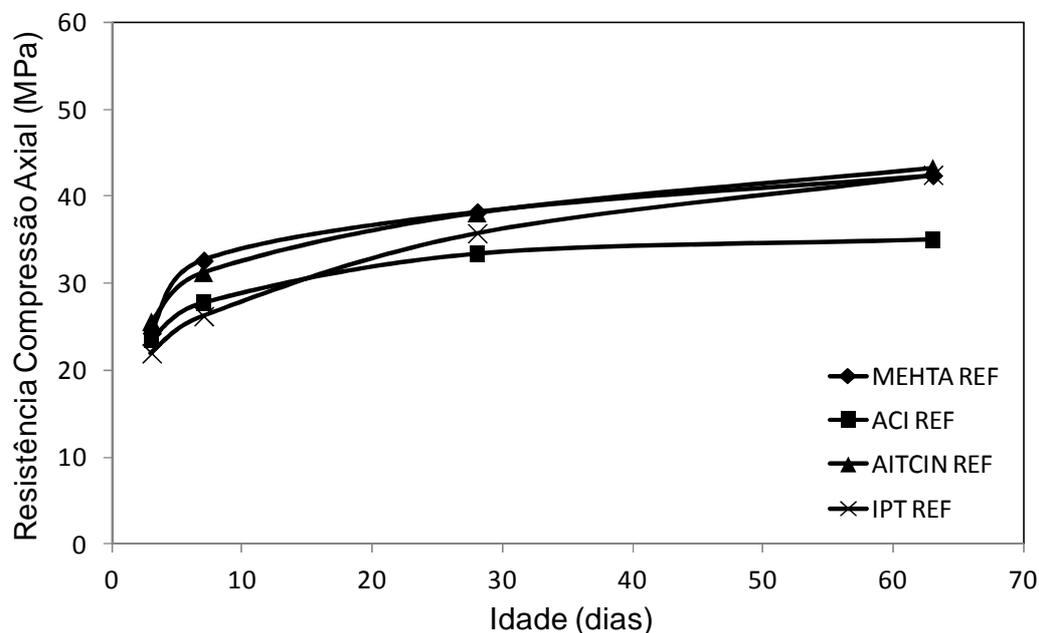
Os concretos que apresentaram maiores resistências foram com 50% de substituição de AMR sem compensação, chegando aproximadamente a 50 MPa, para os métodos de

dosagem de concreto de alto desempenho (CAD). Os concretos que apresentaram resistências menores foram com 25% de substituição com compensação.

Verificou-se que a substituição de AMN por AMR melhorou as resistências dos concretos, para teores de substituição maiores. Isso pode estar atrelado ao fato da areia reciclada possuir uma granulometria mais contínua favorecendo o empacotamento da mistura, além disso, ela é mais rugosa e favorece a aderência na zona de transição pasta/agregado; efeito físico da presença do AMR; possível geração de hidratos adicionais devido a pontos de nucleação gerados pelo AMR.

Pode-se notar, também, que as misturas com compensação apresentaram resistências inferiores em relação às misturas que não sofreram compensação. Isso pode ter acontecido, devido ao aumento da relação água/cimento nas misturas que tiveram a água de compensação adicionada. Isso induz ao fato de que a água de compensação não foi totalmente absorvida pelo agregado reciclado, podendo ter migrado para a pasta, deixando-a menos resistente.

As Figuras 81, 82 e 83 correlacionam resistência à compressão axial *versus* idade. Cada gráfico apresenta quatro curvas, que correspondem aos métodos de dosagem utilizados.



a)

Figura 81 – Resistência à compressão axial versus idade - Concretos de referência.

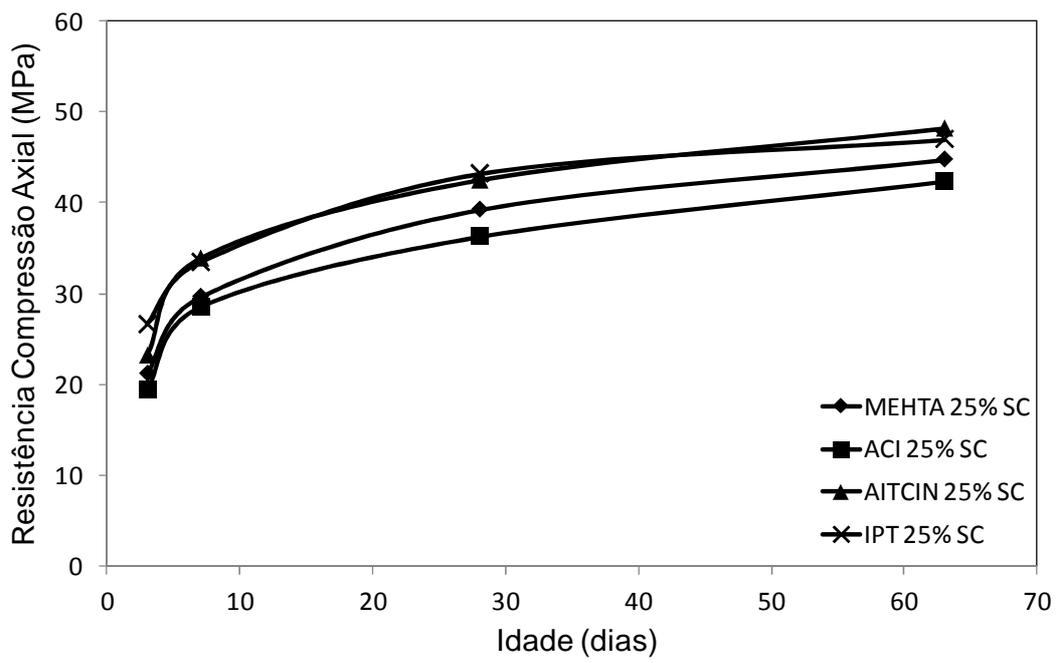
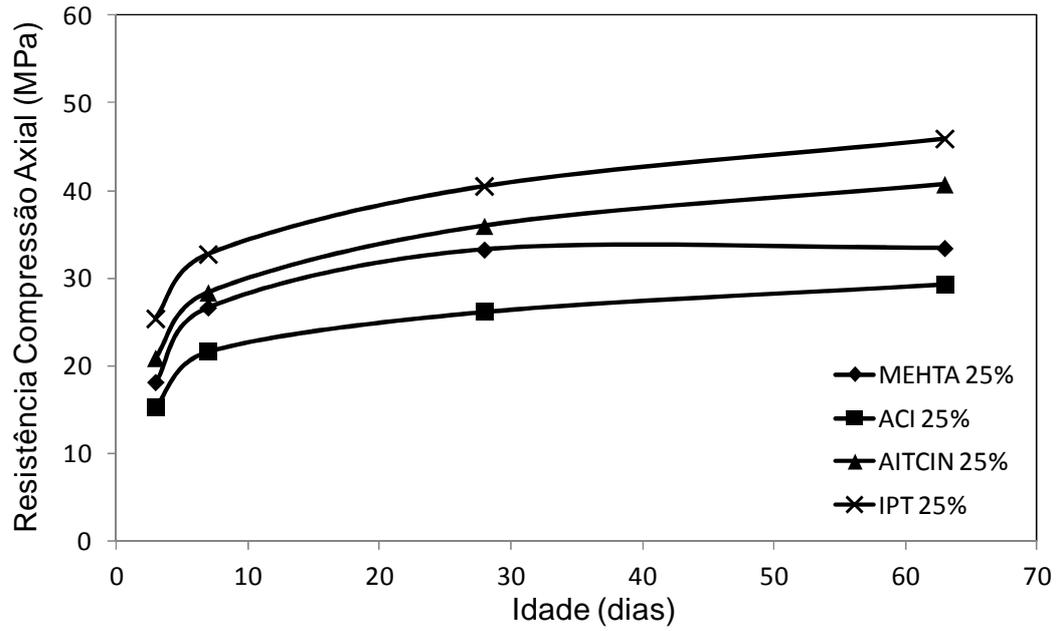


Figura 82 – Resistência à compressão axial versus idade. a) Concretos com 25% de AMR com compensação; b) Concretos com 25% de AMR sem compensação.

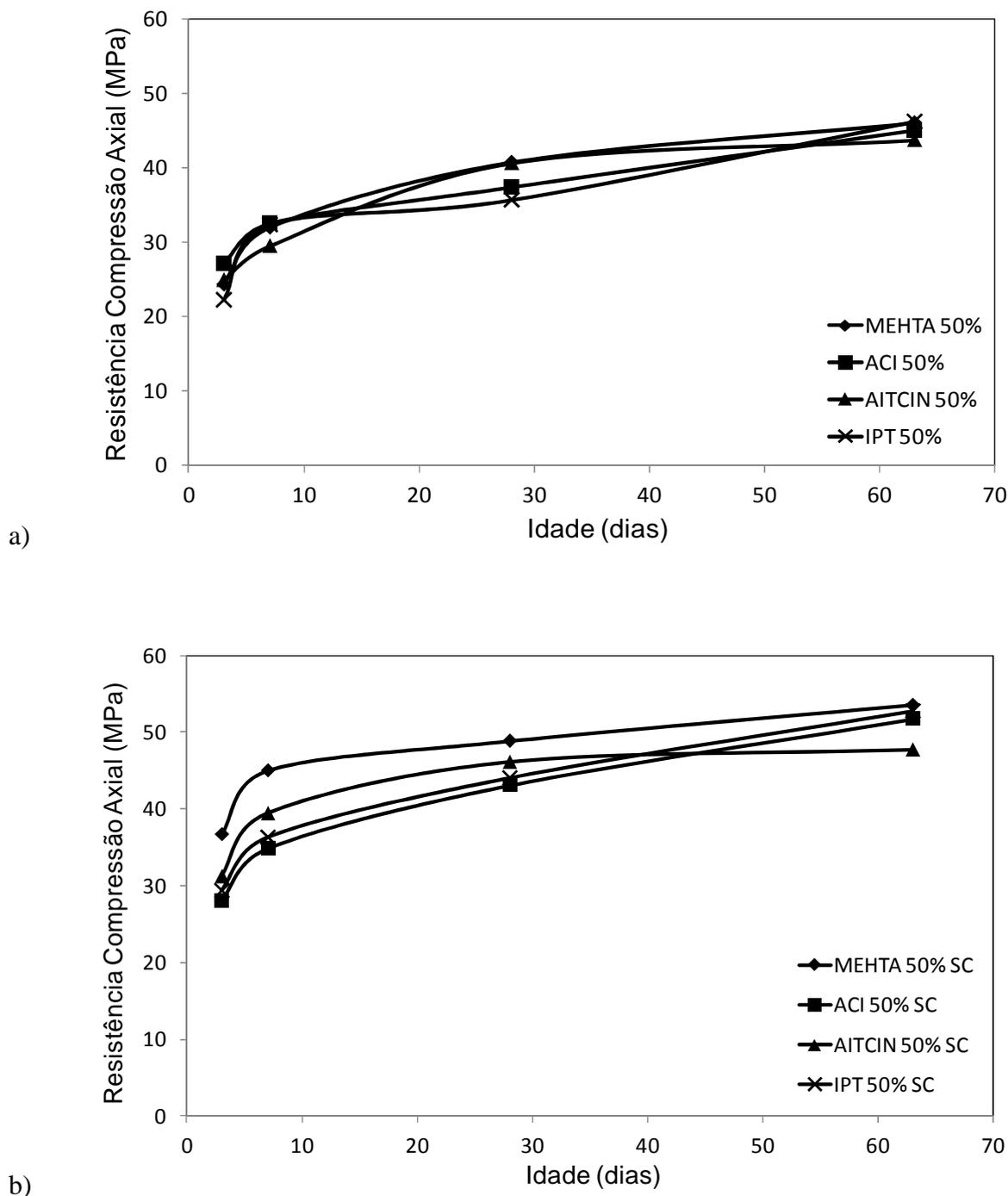


Figura 83 – Resistência à compressão axial versus idade. a) Concretos com 50% de AMR com compensação; b) Concretos com 50% de AMR sem compensação.

Nota-se, em geral, que os métodos de CAD apresentaram resistências superiores aos métodos convencionais, principalmente para os concretos que apresentaram maiores resistências (CONC REF e CONC 50%SC).

Como já era esperado, as resistências dos concretos confeccionados com os métodos de alto desempenho, Mehta/Aitcin e Aitcin, obtiveram um melhor resultado em geral, apesar

da diferença ter sido pequena em relação aos demais métodos. Isso pode ser explicado pelo fato de que os métodos para dosar CAD são mais sofisticados, apresentando um consumo de cimento mais elevado e um teor de argamassa maior do que os demais. O Método do IPT, considerado um método para dosar concretos convencionais, mas que também pode ser utilizado para dosar CAD apresentou resistências inferiores aos métodos de CAD, porém a resistência tendeu a se igualar na idade de 63 dias. Pode-se notar, também, que nas misturas com compensação, existe um impacto negativo maior para os métodos de CAD. Isto pode ser explicado devido ao maior volume de argamassa desses métodos, que contêm mais agregado miúdo reciclado. Como a compensação é proporcional à massa de AMR, é acrescentado mais água à mistura, que pode estar influenciando na estrutura de poros e no empacotamento granular otimizado inicial dos métodos de CAD.

Em relação aos métodos convencionais, verificou-se que os concretos reciclados confeccionados pelo método do IPT/EPUSP apresentaram resistências maiores, em geral, do que os dosados pelo método do ACI/ABCP. Em relação ao método ACI/ABCP, pode-se notar que, em idades mais avançadas, suas resistências foram inferiores às dos demais métodos. Isto pode estar atribuído ao maior volume de agregado graúdo e menor volume de argamassa que este método possui em relação aos demais.

6.2.2.2 Resistência à Tração por compressão diametral

A Tabela 37 apresenta a relação entre a Resistência à tração por compressão diametral para os métodos de dosagem, levando em consideração os teores de substituição e os procedimentos de mistura.

Tabela 37 – Relação entre a Resistência à tração por compressão diametral, métodos de dosagem e teores de substituição de AMR.

% AMR	Mehta/Aitcin		ACI/ABCP		Aitcin		IPT/EPUSP	
	RTCD (%)	CV(%)	RTCD (%)	CV(%)	RTCD (%)	CV(%)	RTCD (%)	CV(%)
Referência	4,89	3,95	4,37	2,10	4,67	3,40	4,42	4,43
25%	3,75	4,92	4,01	5,65	4,31	6,87	4,52	3,23
25% SC	4,53	4,29	4,41	1,10	4,92	2,61	4,54	1,46
50%	4,08	4,61	4,47	3,21	4,23	2,25	4,23	4,82
50%SC	5,01	2,35	4,53	2,84	4,87	5,82	4,46	4,08

A Figura 84 (a) correlaciona a resistência à tração por compressão diametral para cada método de dosagem. Cada método possui cinco barras, que correspondem aos traços confeccionados para cada um deles. A Figura 84 (b) apresenta no eixo das ordenadas a relação entre a resistência a tração por compressão diametral e a resistência a compressão axial e, no eixo das abscissas, os métodos de dosagem. Da mesma forma que a figura anterior, cada método possui cinco barras, representando os traços confeccionados.

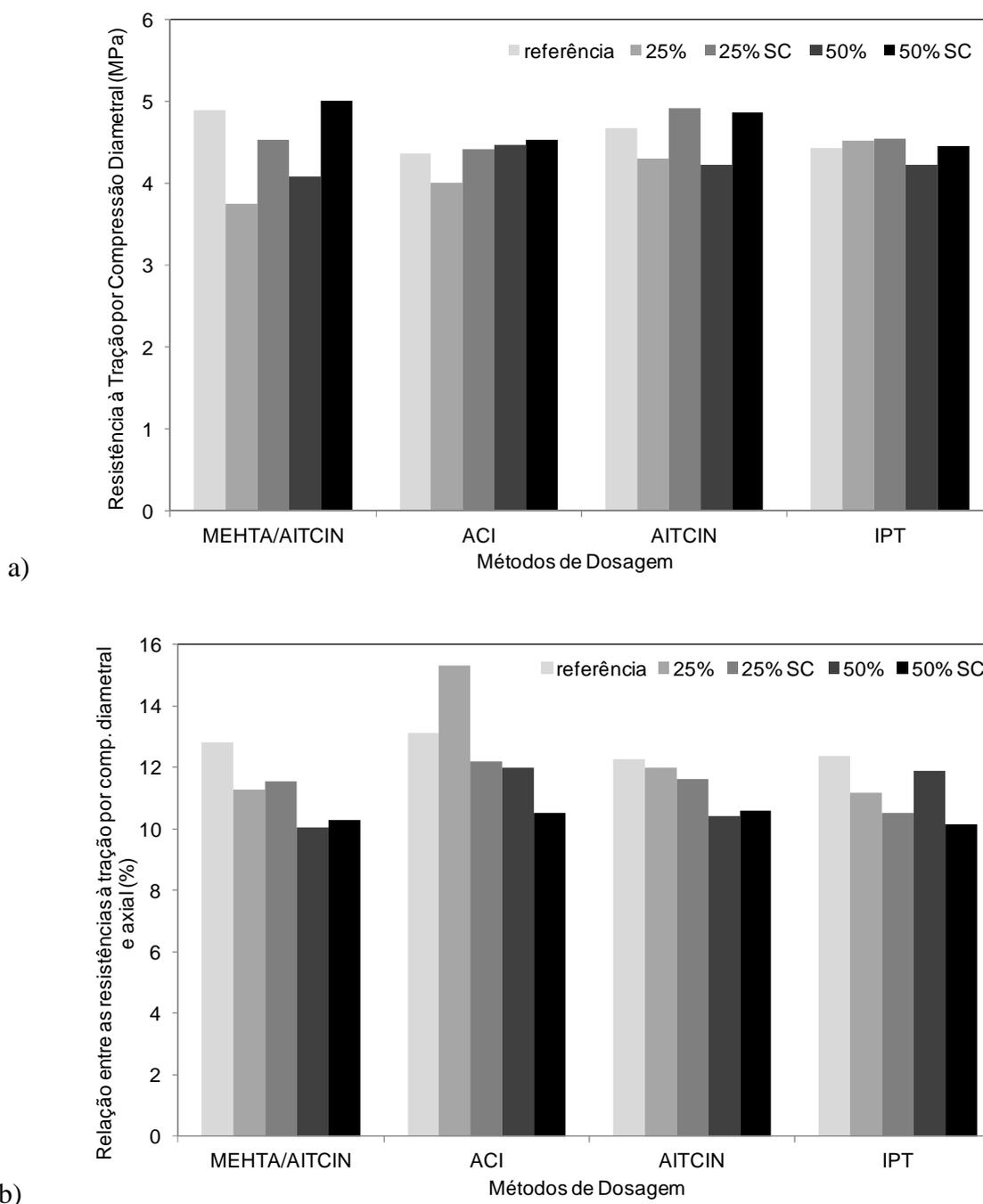


Figura 84 – a) Resistência à tração por compressão diametral *versus* métodos de dosagem. b) Relação entre a resistência a tração por compressão diametral e a resistência a compressão axial *versus* métodos de dosagem.

Pode-se notar que não houve diferença significativa entre as resistências à tração dos concretos de referência para os diferentes métodos de dosagem. Os concretos que apresentaram maiores resistências continuaram sendo os de alto desempenho.

Pode-se notar em relação à resistência a tração por compressão diametral, que ela também é maior para os métodos de dosagem de CAD. E que também para estes métodos, o impacto negativo do efeito da compensação fica mais notório, em relação aos métodos de dosagem para concretos convencionais.

Verificou-se, também, que o aumento da porcentagem de substituição do AMN pelo AMR não provocou aumento na resistência à tração, diferentemente do observado para a resistência à compressão axial.

A melhor aderência na zona de transição pasta/AMR; efeito físico da presença do AMR e a possível geração de hidratos adicionais devido a pontos de nucleação gerados pelo AMR não foram suficientes para promover um incremento na resistência a tração por compressão diametral das misturas, como observado na resistência à compressão.

Verifica-se que a relação entre as resistências a tração por compressão diametral/compressão axial apresentam valores menores para misturas contendo agregados reciclados em relação às misturas de referência.

6.2.2.3 Absorção por Imersão

A Tabela 38 apresenta a relação entre a absorção por imersão para os métodos de dosagem, levando em consideração os teores de substituição e os procedimentos de mistura.

Tabela 38 – Relação entre a absorção por imersão, métodos de dosagem e teores de substituição de AMR.

% AMR	Mehta/Aitcin		ACI/ABCP		Aitcin		IPT/EPUSP	
	ABS (%)	CV(%)	ABS (%)	CV(%)	ABS (%)	CV(%)	ABS (%)	CV(%)
Referência	5,78	5,43	5,31	3,39	6,29	1,49	5,38	0,29
25%	7,55	0,68	6,13	6,55	6,79	2,19	6,40	1,13
25% SC	5,62	3,46	5,09	5,14	5,62	2,05	6,31	2,61
50%	7,64	2,60	6,55	2,23	8,10	2,98	7,08	3,52
50%SC	6,42	2,33	5,41	6,42	7,22	0,63	6,58	3,80

A Figura 85 ilustra o gráfico de absorção por imersão em função dos métodos de dosagem. Cada método possui cinco barras, que correspondem aos traços confeccionados para cada um deles.

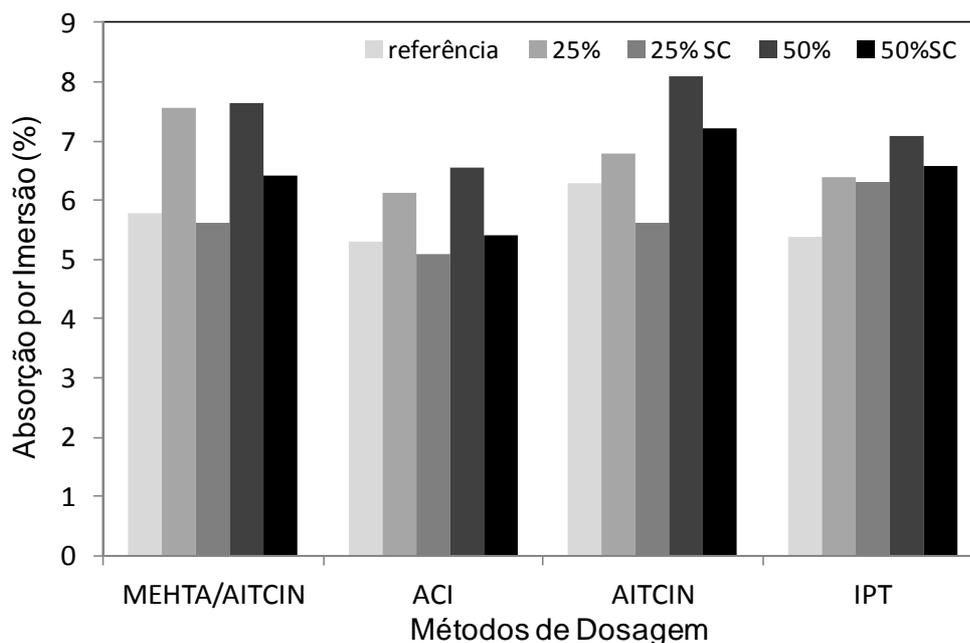


Figura 85 – Absorção por imersão versus métodos de dosagem.

De acordo com o gráfico acima, nota-se que, para todos os métodos, a absorção dos concretos que sofreram compensação é maior em relação aos que não sofreram o procedimento, sendo os impactos maiores para os métodos de dosagem de CAD.

O fato das misturas com compensação possuírem maior absorção total pode estar relacionado à hipótese da migração da água de compensação para a pasta, tornando-a mais porosa, ou seja, a água de compensação provavelmente contribuiu para a elevação da relação a/c.

Pode-se notar, no entanto, que os concretos 50% SC apresentaram maiores valores de absorção em relação aos concretos 25% SC para todos os métodos, apesar do primeiro concreto ter apresentado valores de resistência superiores que o segundo. Como esses dois concretos não tiveram compensação, eles possuíam teoricamente a mesma quantidade de água, o que leva a entender que apesar do concreto de 50% SC ser mais permeável, ele deve possuir um volume maior de microporos, que apesar de conferir uma absorção total maior, não influencia negativamente na resistência.

Verifica-se que os métodos de alto desempenho apresentaram absorções e porosidades maiores em relação aos métodos de dosagem convencionais. Porém, existe uma diferença entre porosidade total de um material e a estrutura interna de poros do mesmo. Pode ser que mesmo tendo uma porosidade maior do que os outros dois métodos convencionais, os métodos de alto desempenho apresentem uma ligação entre esses poros que não afete a resistência do concreto em geral. O contrário pode estar acontecendo também com os métodos

convencionais, mesmo eles possuindo uma absorção e porosidade totais menores, a arrumação entre esses poros pode estar influenciando negativamente a estrutura interna do concreto, implicando numa menor resistência.

Os procedimentos e métodos de dosagem influenciam na absorção dos concretos contendo AMR de forma que isso pode influenciar na durabilidade de estruturas contendo este material.

6.2.2.4 Determinação da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas

A Tabela 39 apresenta a relação entre os valores médios da velocidade do pulso ultrassônico dos concretos para os métodos de dosagem estudados e os diferentes teores de substituição de AMR, na idade de 63 dias.

Tabela 39 – Relação entre a velocidade do pulso, métodos de dosagem e teores de substituição de AMR.

% AMR	Mehta/Aitcin	CV (%)	ACI	CV (%)	AITCIN	CV (%)	IPT	CV (%)
Referência	4,55	1,57	4,57	1,22	4,37	2,12	4,53	0,49
25%	4,47	0,64	4,65	1,83	4,60	1,38	4,46	2,15
25% SC	4,62	1,41	4,67	4,71	4,75	0,87	4,78	0,39
50%	4,06	0,75	4,33	0,42	4,27	1,94	4,44	0,93
50%SC	4,47	0,89	4,48	1,99	4,33	1,51	4,61	0,72

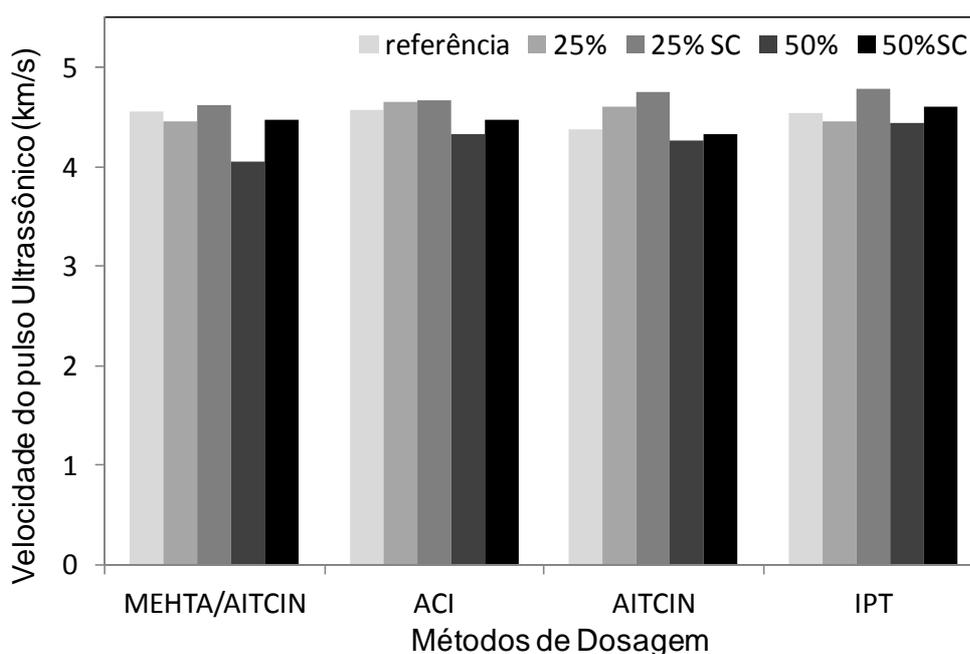


Figura 86 – Velocidade do pulso ultrassônico em relação aos métodos de dosagem.

Pode-se perceber que não existe diferença significativa entre as velocidades do pulso ultrassônico para os diferentes métodos. Nota-se, também, que as velocidades estão coerentes com os valores de porosidade acessível à água (absorção por imersão), ou seja, quanto maior o número de vazios, menor tende a ser a velocidade, o que aconteceu para os métodos de alto desempenho. Porém, a diferença da velocidade entre os métodos é praticamente irrelevante, como também a diferença de porosidade, haja vista os coeficientes de variação. Isto implica em dizer que a qualidade (uniformidade, homogeneização) dos concretos é a mesma para os diferentes métodos e, que, de acordo com a classificação do IAEA (2002) citada por Lorenzi (2009), os concretos com $3,5 < V \text{ (km/s)} < 4,5$ são considerados de qualidade ótima ou boa e os que apresentam $V > 4,5 \text{ km/s}$, são considerados excelentes.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A indústria da Construção civil é responsável por grande geração de resíduos sólidos, por isso têm-se surgido vários estudos acerca da reciclagem e beneficiamento do RCD. Existe viabilidade em se reutilizar os agregados reciclados, porém a alta variabilidade dos mesmos requer estudos específicos e constantes. Sabe-se que os agregados reciclados apresentam características específicas, como alta porosidade e absorção, menor massa específica, forma irregular e textura áspera e que todas elas influenciam nos parâmetros de dosagem.

As conclusões apresentadas neste estudo referem-se aos resultados obtidos com as misturas de concretos e argamassas produzidas com os materiais, dosagens e técnicas de execução específicas. Sua representatividade deve ser confirmada através de novos estudos, que devem ser realizados levando em consideração aspectos que confirmarão e complementarão o comportamento do agregado miúdo reciclado de RCD em materiais cimentícios.

7.1 Conclusões

A partir dos resultados apresentados nesta pesquisa, pôde-se chegar às conclusões, que serão apresentadas a seguir.

7.1.1 Características do RCD

De acordo com os ensaios de caracterização realizados para o agregado miúdo reciclado de RCD, pode-se constatar que ele apresenta elevada absorção total, em torno de 16,50% e apresentou uma redução de cerca de 6% na massa específica em relação ao agregado miúdo natural. Nas micrografias, os grãos apresentaram forma irregular e superfície porosa, características que já eram esperadas e que foram confirmadas. Sabe-se que a elevada absorção, a textura áspera, superfície rugosa, forma irregular, são características que influenciam nos parâmetros de dosagem. Isso justifica a dificuldade de escoamento apresentada pelas misturas recicladas, devido ao aumento da fricção entre os grãos.

Além disso, a areia reciclada apresentou uma granulometria contínua, com tamanhos de grãos bem distribuídos, favorecendo o empacotamento das misturas.

7.1.2 Etapa 1: Argamassas

Serão explanadas, a seguir, as conclusões acerca do estudo feito com as argamassas desta pesquisa, separadas em conclusões no estado fresco e estado endurecido.

7.1.2.1 Estado fresco

As análises para os diferentes procedimentos de dosagem, diferentes relações a/c e teores de substituição do AMN pelo AMR, mostraram comportamentos diferentes. O aumento da relação a/c provocou um aumento da plasticidade das misturas. Os valores de viscosidade para as argamassas com areia reciclada foram superiores aos das argamassas de referência para todos os fatores a/c, porém quando se utilizou o percentual de 50% de AMR e o procedimento de compensação, houve um acréscimo da viscosidade em relação às misturas com apenas 25% de AMR, que também sofreram compensação. Para as misturas com relações a/c mais baixas, houve um impacto maior nos valores de viscosidade, tendendo a aumentar para o teor de 50% sem compensação. Quando se aumenta a relação a/c, oferecendo mais água à mistura, as diferenças entre os valores de viscosidade entre os teores tende a diminuir. Quando se compensa parte da água de absorção do AMR nas misturas, há uma diminuição nos valores de viscosidade para ambos os teores e para todas as relações a/c, com destaque para a relação a/c = 0,4, onde o impacto é maior.

Concluiu-se, também, a limitação do ensaio da mesa de consistência, que apenas fornece qualitativamente uma ideia acerca da viscosidade, que é medida pelo IC (mm), não sendo suficiente para quantificar o real impacto da incorporação do AMR na reologia das misturas.

7.1.2.2 Estado endurecido

De acordo com as análises termogravimétricas, as misturas contendo AMR possuem mais água livre, sendo que as argamassas que sofreram compensação possuem ainda mais em relação às misturas recicladas que não sofreram esse procedimento. A presença do RCD promoveu a geração de mais água quimicamente combinada, havendo um aumento do número de hidratos, sendo que para os teores de 50% com compensação houve maior quantidade de água combinada do que para 25%, também com compensação. Para as misturas sem

compensação, houve uma pequena diferença da quantidade de água combinada em relação aos teores de substituição. Os hidratos gerados não conferiram aumento na resistência, podendo estar desconectados, atuando como pontos de nucleação. Não houve variação do teor do hidróxido de cálcio independente da compensação, indicando que não houve consumo e, portanto que não há atividade pozolânica da fração fina do RCD.

Ocorreu um aumento da resistência à compressão axial em função do tempo, para ambos os teores de substituição e para todas as relações a/c. A presença do agregado miúdo reciclado promoveu uma redução na resistência à compressão das argamassas em todas as idades e independente do tratamento dado ao agregado reciclado (compensação ou não), para ambos os teores de substituição. Verifica-se que o procedimento de compensação de água promove uma redução mais significativa na resistência à compressão das misturas, independente do teor, em todas as idades e para todas as relações a/c. Para todos os fatores a/c estudados, todas as curvas das argamassas obedeceram a curva de Abrams.

Para todas as misturas e teores de substituição 25% e 50%, as relações a/c reais para as argamassas que não tiveram compensação são mais próximas da relação a/c de referência. Portanto, não compensando parte da água de absorção dos agregados reciclados diminui a discrepância desses valores em relação aos de referência.

As argamassas que sofreram compensação apresentaram maiores valores de absorção por imersão. A absorção por imersão foi maior para as argamassas com teor de 50% de AMR, apesar destas serem mais resistentes que as misturas com 25% de AMR. Isto ocorre, provavelmente, porque as misturas com 50% de substituição possuem um volume de microporos maior, não impactando negativamente na resistência. Já as misturas com 25% de substituição possuem porosidade total menor, mas possuem maior volume de macroporos, impactando significativamente a resistência.

7.1.3 Etapa 2: Concretos

Serão explanadas, a seguir, as conclusões acerca do estudo feito com os concretos desta pesquisa, elas foram separadas em conclusões no estado fresco e estado endurecido.

7.1.3.1 Estado fresco

Os métodos de dosagem e procedimentos de mistura dos concretos contendo AMR possuem parâmetros específicos e, por isso, suas misturas apresentam características

reológicas diferentes. Para manter a mesma plasticidade, as misturas com mesma relação a/c e iguais procedimentos necessitaram de maiores teores de aditivo quanto maior o teor de AMR incorporado.

7.1.3.2 Estado endurecido

A substituição do AMN pelo AMR aumentou a resistência à compressão axial dos concretos, para teores de substituições maiores, o que pode estar atribuído à melhoria do empacotamento das misturas, favorecidas por uma granulometria contínua do agregado reciclado; melhor aderência na zona de transição pasta/agregado, devido à rugosidade superficial do grão; efeito físico da presença do AMR e possível geração de hidratos adicionais devido a pontos de nucleação gerados. As misturas de concreto que sofreram compensação apresentaram resistências à compressão axial inferiores em relação às misturas que não sofreram compensação. A água de compensação adicionada pode não ter sido absorvida em sua totalidade pelo AMR, contribuindo para o aumento da relação a/c da pasta, deixando-a menos resistente.

A resistência à compressão axial dos concretos produzidos pelo método do IPT/EPUSP tendeu a se igualar com os métodos de CAD na idade de 63 dias. Em relação ao método ACI/ABCP, em idades mais avançadas, suas resistências foram inferiores às dos demais métodos. Nas misturas com compensação existiu uma maior redução na resistência à compressão axial para os métodos de CAD em relação aos métodos convencionais.

A resistência à tração por compressão diametral foi maior para os métodos de dosagem de CAD. Para estes métodos, o impacto negativo do efeito da compensação fica mais notório, em relação aos métodos de dosagem para concretos convencionais. O aumento da porcentagem de substituição do AMN pelo AMR não provocou aumento na resistência à tração, diferentemente do observado para a resistência à compressão axial.

A influência do agregado reciclado no estado endurecido é diferente em relação ao tamanho do grão, ou seja, se são empregados agregados miúdos ou graúdos reciclados. Nota-se, em geral, que a utilização de agregados graúdos reciclados (AGR) em misturas de concreto reduz a resistência à compressão em relação às misturas de referência, conforme estudos desenvolvidos por outros pesquisadores. A substituição do agregado graúdo natural por AGR reduz as propriedades mecânicas dos concretos e sua fratura ocorre muitas vezes através dos grãos pois, o AGR possui menor massa específica, maior porosidade e menor resistência (ver capítulo 3). Este comportamento não ocorre em concretos contendo AMR.

7.2 Contribuições à dosagem de concretos contendo AMR

Os diferentes métodos de dosagem produzem misturas diferentes, pois cada um apresenta especificidades que acabam influenciando desde a mistura granular seca (proporção dos materiais) como também nas propriedades das misturas nos estados fresco e endurecido. Existe a necessidade de fazer um estudo para o desenvolvimento de um método racional de dosagem de concretos com agregados reciclados, considerando: a) os diferentes procedimentos adotados na mistura, como compensar parcial ou total; b) definição do percentual de compensação ideal em função da água equivalente à taxa de absorção dos agregados reciclados; c) se a compensação será feita diretamente no misturador ou se os agregados reciclados serão pré-saturados e d) desenvolvimento de método para avaliação da real absorção dos agregados na mistura. Isso terá influência importante na mistura final, afetando diretamente as propriedades mecânicas e também de durabilidade.

A incorporação de agregado reciclado (AR) influencia as propriedades reológicas das misturas de argamassas e concretos. Existe uma dificuldade em atingir a mesma consistência estabelecida para misturas de referência nas misturas recicladas. Isso ocorre devido às características do grão do agregado reciclado, que possui uma textura mais rugosa, forma irregular, elevada porosidade, o que contribui para que quando eles entrem em contato com a pasta, esta penetre em seus poros, aumentando a fricção entre os grãos. Esse aumento é responsável pela dificuldade de escoamento inerente às misturas recicladas. O grau de influência dos AR no estado fresco das misturas vai depender do tipo de resíduo empregado, do beneficiamento realizado, da granulometria do AR e da porosidade do mesmo. Devido a isso, diferentes métodos de dosagem e procedimentos de mistura influenciam significativamente na reologia das misturas com AR no estado fresco. Além disso, há a necessidade de métodos dinâmicos (reometria) para avaliação da real influência do AR nas misturas.

Baseado nos resultados deste trabalho, o procedimento de mistura sem compensação com a utilização de aditivos para corrigir a trabalhabilidade, seria o mais adequado para utilizar na produção de materiais cimentícios com agregados miúdos reciclados de RCD.

O AMR pode gerar um efeito benéfico na matriz devido à melhoria de aderência na zona de transição agregado/pasta e maior empacotamento da mistura granular seca. Entretanto, verifica-se que a presença do AMR gera matrizes mais porosas e com maior teor de água livre, que pode colaborar com os fenômenos relacionados à perda de água e o

ingresso de agentes agressivos e, conseqüentemente, promover a redução da durabilidade de estruturas.

7.3 Sugestões para trabalhos futuros

Devido à heterogeneidade do RCD, sempre serão necessários estudos prévios para uma utilização dos mesmos na produção de materiais cimentícios. Portanto, deve-se buscar um aprimoramento das técnicas utilizadas para coletar, segregar e beneficiar o resíduo, bem como técnicas de caracterização do agregado reciclado produzido, além de uma busca pela padronização das formas de mistura.

Seguem abaixo algumas sugestões para trabalhos futuros.

- Desenvolver um método de dosagem racional para concretos contendo AMR. Associado a isto determinar o valor da relação a/c efetiva das misturas;
- Realizar o ensaio de absorção para agregados reciclados por um maior período de tempo;
- Fazer estudos acerca da perda de trabalhabilidade dos concretos com agregados miúdos reciclados em substituições parcial e total;
- Estudos sobre a estrutura porosa e permeabilidade do AMR em soluções cimentícias e correlacionar com a estrutura porosa e permeabilidade de concretos reciclados contendo AMR;
- Verificar a influência dos agregados miúdos reciclados de RCD na retração por secagem, reação álcalis/agregado e na durabilidade dos concretos.

8 REFERÊNCIAS

AGRELA, F.; SÁNCHEZ DE JUAN, M.; AYUSO, J.; GERALDES, V. L.; JIMÉNEZ, J. R. Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete. **Construction and Building Materials**. v. 25, p. 3950-3955, 2011.

AITCIN, Pierre-Claude (1998). **Concreto de Alto Desempenho**. Tradução de Geraldo G. Serra. São Paulo: Pini, 1º ed., 2000.

ÂNGULO, S. C. Produção de concretos de agregados reciclados. Londrina, 1998. 84p. **Trabalho de Conclusão de Curso**. Universidade Estadual de Londrina.

ÂNGULO, S. C. Caracterização de agregado de resíduos de construção e demolição reciclados e a influencia de suas características no comportamento de concretos. São Paulo, 2005. 167 p. **Tese (Doutorado)** – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. In: Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil, 4., 2001, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON, CT 206. p. 43-56, 2001.

ÂNGULO, S. C.; ULSEN, C.; KAHN, H.; JOHN, V. M. Desenvolvimento de novos mercados para a reciclagem massiva de RCD. In: Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil, 5., 2002, São Paulo. **Anais eletrônicos...** São Paulo: IBRACON, CT 206. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br>>

BARRA, M. Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón armado. Barcelona, 1996. 223 p. **Tese (doutorado)**. Escola técnica Superior d'Enginyers de Camin, Canal i Ports. Universitat Politècnica de la Catalunya.

BARRA, M. *et al.* Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural. Grupo de Trabajo – Hormigón Reciclado, 2006. 166 p. **Estado da Arte sobre Concreto Reciclado**. Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE).

BRASIL, Ministério das Cidades. Panorama dos resíduos de construção e demolição (RCD) no Brasil. Brasília, DF. 2005. Disponível em: <<http://www.cidades.gov.br/secretarias-nacionais/saneamento-ambiental/biblioteca/residuos-de-construcao-e-demolicao/panorama-residuos-da-construcao/>>. Acesso em 15 nov. 2010.

CARDOSO, F.A Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico. São Paulo, 2009. 138 p. **Tese (Doutorado)** – Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

CARNEIRO, A.P. *et al.* Diagnóstico dos Setores produtores de Resíduos na Região Metropolitana de Salvador – BA. In: **Reciclagem de Entulho para a produção de Materiais de Construção. Projeto Entulho Bom.** CARNEIRO, A. P., BRUM, I. A. S., CASSA, J. C. S. (Org.). Salvador, Bahia: EDUFBA e CEF, 2001. p.48 a 75.

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. 129p. **Dissertação (Mestrado)** – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002: Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html>>. Brasília, DF. Acesso em 10 nov. 2010.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 431, de 24 de maio de 2011: Altera o art. 3º da Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, CONAMA, estabelecendo nova classificação para o gesso. Publicação DOU nº 99, de 25/05/2011, pág. 123. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=649> Brasília, DF. Acesso em 18 nov. 2011.

DALTRO FILHO, J. *et al.* **Resíduos sólidos da construção civil em Aracaju – Diagnóstico.** Aracaju, Sergipe: 2005.

DJERBI TEGGUER, A. Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach. **Construction and Building Materials.** v. 27, p. 112-116, 2012.

ETXEBERRIA, M., VÁZQUEZ, E., MARÍ, A., BARRA, M. Influence of amount of recycled Coarse aggregates and production processo n properties of recycled aggregate concrete. **Cement and concrete research.** v.37, p.735-742, 2007.

EVANGELISTA, L.; BRITO, J. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement & Concrete Composites.** v. 29, p. 397- 401, 2007.

EVANGELISTA, L.; BRITO, J. Durability perfomance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement & Concrete Composites.** v. 32, p. 9-14, 2010.

EVANGELISTA, P. P. A. Alternativa sustentável para destinação de resíduos Calsse A: diretrizes para reciclagem em canteiros de obras. 2010. 152p. **Dissertação (Mestrado)** – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2010.

FERREIRA, L.; DE BRITO, J.; BARRA, M. Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties. **Magazine of Concrete Research.** v. 63, ed. 8, p. 617-627, 2011.

FORMAGINI, S. Dosagem científica e caracterização mecânica de concretos de altíssimo desempenho. Rio de Janeiro, 2005. 259 p. **Tese (Doutorado)** – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia – COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

GÓMEZ-SOBERÓN, J. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate - an experimental study. **Cement and concrete research**. v.32, p.1301-1311, 2002.

GONÇALVES, J.P.; TOLEDO FILHO, R.D.; FAIRBAIRN, E.M.R. Estudo da hidratação de pastas de cimento Portland contendo resíduo cerâmico por meio de análise térmica. **Ambiente Construído**. v. 6, N°4, p. 83-94, 2006.

GONÇALVES, R. D. C. Agregados reciclados de resíduos de concretos – um novo material para dosagens estruturais. 2001. 148p. **Dissertação (Mestrado)** – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

GONZALEZ-FONTEBOA, B.; MARTINEZ-ABELLA, F.; CARRO LÓPEZ, D.; SEARA-PAZ, S. Stress-strain relationship in axial compression for concrete using recycled saturated coarse aggregate. **Construction and Building Materials**. v. 25, p. 2335-2342, 2011.

GONZALEZ-FONTEBOA, B.; MARTINEZ-ABELLA, F.; HERRADOR, M. F.; SEARA-PAZ, S. Structural recycled concrete: Behaviour under low loading rate. **Construction and Building Materials**. v. 28, p. 111-116, 2012.

HELENE; P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 1992. 349 p.

JADOVSKI, I. Diretrizes Técnicas e Econômicas para Usinas de Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição. Porto Alegre, 2005. 182 p. Trabalho de Conclusão (Mestrado) – Curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia. Escola de Engenharia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. Reciclagem de resíduos da construção. In: SEMINÁRIO DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 1., 2000. São Paulo. **Anais...** São Paulo: CETESB, 2000. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br>>.

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

JOHN, V. M. Aproveitamento de resíduos sólidos como materiais de construção. In: **Reciclagem de Entulho para a produção de Materiais de Construção. Projeto Entulho Bom**. CARNEIRO, A. P., BRUM, I. A. S., CASSA, J. C. S. (Org.). Salvador, Bahia: EDUFBA e CEF, 2001. p.28 a 45.

KOEHLER, E.P.; FOWLER, D.W. Summary of Concrete Workability Test Methods.

Research Report ICAR. 105 -1, 92 p., International Center for Aggregates Research - The University of Texas at Austin, 2003.

KWAN, W. H.; RAMLI, M.; KAM, K. J.; SULIEMAN, M.Z. Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. **Construction and Building Materials.** v.26, p. 565-573, 2012.

LEITE, M.B. Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. Porto Alegre, 2001. 270 p. **Tese (Doutorado)** – Escola de Engenharia, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LEVY, S.M. Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos . São Paulo, 1997. 147 p. **Dissertação (Mestrado)** – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo.

LEVY, S.M. Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria. São Paulo, 2001. 199 p. **Tese (Doutorado)** – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo.

LIMA, J. A. R. Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos. São Carlos, 1999. 246p. **Dissertação (mestrado).** Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

LIMPURB – Empresa de Limpeza Urbana do Salvador. **Relatório de Gestão.** Salvador, 2011.

LÔRDELO, P. M., EVANGELISTA, P. P. A., FERRAZ, T. G. A. Programa de gestão de resíduos em canteiros de obras: método, implantação e resultados. 2007. **Artigo científico.** SENAI-BA, Salvador. 2007, 10 p.

LORENZI, A. Aplicação de redes neurais artificiais para estimativa da resistência à compressão do concreto a partir da velocidade de propagação de pulso ultra-sônico. Porto Alegre, 2009. 215 p. **Tese (Doutorado)** – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LOVATO, P. S. Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto. Porto Alegre, 2007. 182 p. **Dissertação (Mestrado)** - Escola de Engenharia, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MACHADO Jr., E. F.; AGNESINI, M. V. C., BALLISTA, L. P. Dosagem de microconcretos estruturais leves com agregados reciclados de construção e demolição: Estudo de Caso. In: VIII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2000, Salvador-BA. Anais... São Paulo: ENTAC, 2000.8p.

MAS, B.; CLADERA, A.; DEL OLMO, T.; MAS, F. Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use. **Construction and Building Materials**. v. 27, p. 612-622, 2012.

MEHTA, P. K. and AITCIN, P. C. Principles Underlying Production of High-Performance Concrete. **Cement, Concrete, and Aggregates Journal**. v. 12, No. 2, p. 70-78, 1990.

MELO, A.V.S. Diretrizes para a produção de agregado reciclado em usinas de reciclagem de resíduos da construção civil. Salvador, 2011. 232 p. **Dissertação (Mestrado)** – Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994. 573 p.

MIRANDA, L. F. R., ÂNGULO, S. C., CARELI, E. D. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 57-71, jan./mar. 2009.

MOREIRA, L. H. H. Avaliação da influência da origem e do tratamento dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto estrutural. São Paulo, 2010. 92 p. **Dissertação (Mestrado)** – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

NBR NM 30: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

NBR NM 45: Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

NBR NM 46: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

NBR NM 49: Agregado fino – Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

NBR NM 67: Concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone: Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

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

NBR 5733: Cimento Portland de Alta Resistência Inicial. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão em corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

NBR 6118: Projeto de Estruturas de concreto - Procedimento: Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação: Rio de Janeiro: ABNT, 2005, Emenda 1:2009.

NBR 7215: Cimento Portland – determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1996. Versão corrigida em 1997.

NBR 7222: Argamassa e concreto – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos: Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

NBR 8802: Concreto Endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. Versão corrigida 2: 2009.

NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 71 p.

PEDROZO, R. F. E. Influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino em propriedades de argamassas e concretos. Florianópolis, 2008. 178 p. **Dissertação (Mestrado)** – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

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

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

REIS, C.N.S. Influência da utilização de agregado miúdo de RCD na aderência aço-concreto reciclado. Feira de Santana, 2009. 171 p. **Dissertação (Mestrado)** – Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual de Feira de Santana.

RODRIGUES, P.P.F. **Parâmetros de dosagem do Concreto**. ET-67. 2º ed. São Paulo: ABCP, 1995.

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. 707-712, 2001.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL NO ESTADO DE MINAS GERAIS (SINDUSCON-MG). Alternativas Para a Destinação de Resíduos da Construção Civil. Belo Horizonte: SINDUSCON-MG, 2008. 2 ed. 87 p.

TABSH, S. W.; ABDELFAHAH, A. S. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. **Construction and Building Materials**. v. 23, p. 1163-1167, 2009.

TAM, V. W. Y., GAO, X. F., TAM, C.M. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. **Cement and Concrete Research**. v. 35, p. 1195-1203, 2005.

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**. v. 22, p. 364-369, 2008.

VIEIRA, G.L. Estudo do processo de Corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de Resíduos de Construção e Demolição. Porto Alegre, 2003. 150 p. **Dissertação (Mestrado)** - Escola de Engenharia, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ZAHARIEVA, R.; BUYLE-BODIN, F.; SKOCZYLAS, F. WIRQUIN, E. Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete. **Cement & Concrete Composites**. v. 25, p. 223-232, 2003.

ZORDAN, S.E. A utilização do entulho como agregado na confecção do concreto. Campinas, 1997. 140 p. **Dissertação (Mestrado)** – Faculdade de Engenharia Civil – FEC. Universidade Estadual de Campinas.