

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGEC**  
**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: CONSTRUÇÃO CIVIL**

**INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO NATURAL  
POR AGREGADO RECICLADO FINO EM PROPRIEDADES DE  
ARGAMASSAS E CONCRETOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de MESTRE em Engenharia Civil.

**RUBEN FRANCISCO ESTECHE PEDROZO**  
**ORIENTADORA: JANAÍDE CAVALCANTE ROCHA, Dra.**  
**FLORIANÓPOLIS, ABRIL 2008.**

**INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO NATURAL POR AGREGADO  
RECICLADO FINO EM PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS E CONCRETOS**

**RUBEN FRANCISCO ESTECHE PEDROZO**

Dissertação julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

---

Prof. Dr. Glicério Trichês – ECV/UFSC  
(Coordenador do PPGEC)

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ing. Janaíde Cavalcante Rocha – ECV/UFSC  
(Orientadora)

**Comissão examinadora:**

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Sílvia Maria de Souza Selmo - USP

---

Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Júnior – ECV/UFSC.

---

Prof. Ivo José Padaratz, PhD – ECV/UFSC

As pessoas persistentes iniciam o seu sucesso no ponto onde as outras terminam seu fracasso".  
(Edward Eggleston).

## AGRADECIMENTOS

Aproveito a oportunidade de expressar meus sinceros agradecimentos a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho.

Aos meus pais e irmãos, grandes incentivadores ao longo da minha vida.

A professora Janaíde Cavalcante Rocha, pela orientação e motivação durante a realização da pesquisa, e ao professor Malik Cheriaf, pelos contínuos ensinamentos ao longo da pesquisa.

Aos colegas do laboratório ValoRes da UFSC: Cecília, Giovanna, Ligia, Eliz, Gustavo, Jefferson, Caroline, Paulo, pela amizade e companheirismo.

A minha namorada Letícia, pelo amor, incentivo e apoio constante.

Aos funcionários do LMCC: Luiz Henrique, Renato Lapa, Roque Medeiros pelo apoio brindado.

Aos professores, Márcio Fredel e Edson Basto, do laboratório CERMAT da Engenharia Mecânica da UFSC, pela ajuda recebida nos ensaios realizados no laboratório.

Ao professor Carlos, do Laboratório de Síntese e Caracterização de Materiais, do departamento da Física da UFSC, pela disponibilidade da utilização do equipamento para ensaio.

Ao CNPq, pela bolsa de pesquisa e à FINEP Programa Habitare pelo apoio financeiro para a pesquisa.

A Deus, pelas bênçãos recebidas e por estar sempre presente na minha vida.

## SUMÁRIO

SUMÁRIO .....	IV
LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABELAS.....	XI
LISTA DE ABREVIATURAS, NOTAÇÕES E SIGLAS .....	XIII
RESUMO.....	XV
ABSTRACT.....	XVI
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 OBJETIVOS .....	5
1.1.1 Objetivo Geral.....	5
1.1.2 Objetivos específicos .....	5
1.2 HIPÓTESES .....	5
1.3 ESTRUTURA DA APRESENTAÇÃO DO TRABALHO .....	6
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	7
2.1 BREVE HISTÓRICO .....	7
2.2 COMPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS DE RCD .....	8
2.3 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS RECICLADOS FINOS .....	10
2.3.1 Distribuição granulométrica .....	10
2.3.2 Teor de finos .....	11
2.3.3 Especificações dos agregados reciclados segundo as normas internacionais.....	11
2.3.4 Composição química dos agregados reciclados.....	13
2.3.5 Absorção dos agregados reciclados .....	16
2.3.6 Resistência Mecânica e resistência à abrasão .....	17
2.3.7 Massa Específica.....	18
2.3.8 Textura superficial e forma dos grãos.....	18
2.4 CINÉTICA DA HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND .....	19
2.5 INFLUÊNCIA DA PRESENÇA DE METAIS PESADOS NOS AGREGADOS RECICLADOS .....	21
2.6 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS COM AGREGADO MIÚDO RECICLADO NO ESTADO FRESCO.....	23
2.6.1 Trabalhabilidade .....	23
2.6.2 Massa Específica.....	25
2.6.3 Retração Plástica.....	25
2.6.4 Calorimetria .....	27
2.7 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS com AGREGADO MIÚDO RECICLADO NO	

ESTADO FRESCO.....	28
2.8 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS COM AGREGADO MIÚDO RECICLADO NO ESTADO ENDURECIDO.....	29
2.8.1 Resistência à Compressão.....	29
2.8.2 Módulo de Deformação.....	31
2.9 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS COM AGREGADO MIÚDO RECICLADO NO ESTADO ENDURECIDO.....	32
2.9.1 Resistência à Compressão.....	32
2.9.2 Absorção Capilar.....	33
2.10 ATIVIDADE POZOLÂNICA DO MATERIAL CERÂMICO PRESENTE NOS RESÍDUOS DE RCD.....	34
2.10.1 Estudos da avaliação da atividade pozolânica dos finos de RCD.....	34
2.10.2 Avaliação da atividade pozolânica através da Análise Térmica Diferencial (ATD).....	37
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	40
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS.....	41
3.1.1 Agregado miúdo e graúdo reciclado.....	41
3.1.2 Cimento.....	41
3.1.3 Agregado miúdo natural.....	42
3.1.4 Agregado graúdo natural.....	42
3.1.5 Água.....	43
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	43
3.2.1 Espectrometria de Dispersão de Raios X.....	44
3.2.2 Difração de Raios-X.....	44
3.2.3 Reconstituição de Traço.....	44
3.2.4 Absorção de materiais granulares.....	45
3.2.5 Lixiviação e Solubilização.....	48
3.3 ANÁLISE DA POZOLANICIDADE DO MATERIAL FINO RECICLADO.....	48
3.3.1 Processo de calcinação do material fino.....	48
3.3.2 Preparação das pastas com Hidróxido de Cálcio.....	49
3.4 AVALIAÇÃO DA POZOLANICIDADE PELO MÉTODO DA NBR 5752.....	52
3.5 ESTUDO DAS COMPOSIÇÕES EM CONCRETO E ARGAMASSA.....	52
3.5.1 Correção granulométrica.....	54
3.5.2 Ensaio das misturas no estado fresco para os concretos.....	54
3.5.3 Ensaio das misturas no estado endurecido dos concretos.....	58

3.5.4	Ensaio das misturas no estado fresco das argamassas.....	60
3.5.5	Ensaio das misturas no estado endurecido das argamassas.....	62
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	67
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	67
4.1.1	Composição química.....	67
4.1.2	Identificação dos metais pesados presentes nos agregados reciclados .....	69
4.1.3	Composição granulométrica .....	70
4.1.4	Parâmetros físicos dos agregados .....	72
4.1.5	Absorção capilar granular .....	74
4.1.6	Reconstituição de Traço do agregado miúdo reciclado .....	78
4.2	ANÁLISE DAS COMPOSIÇÕES INICIAIS .....	79
4.2.1	Verificação da atividade pozolânica dos agregados reciclados finos .....	79
4.2.2	Índice de Atividade Pozolânica (IAP) .....	85
4.3	COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS – TRAÇOS UTILIZADOS .....	86
4.4	AVALIAÇÃO DAS MISTURAS NO ESTADO FRESCO.....	88
4.4.1	Consistência na mesa de espalhamento .....	88
4.4.2	Retração plástica dos concretos .....	93
4.4.3	Calorimetria .....	95
4.5	AVALIAÇÃO DAS MISTURAS NO ESTADO ENDURECIDO.....	102
4.5.1	Resistência à tração na flexão das argamassas .....	102
4.5.2	Resistência à compressão das argamassas .....	104
4.5.3	Absorção capilar das argamassas.....	106
4.5.4	Resistência à compressão dos concretos.....	115
4.5.5	Módulo de Deformação dos concretos .....	122
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	132
6	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	137
	ANEXOS - TABELAS .....	144
	ANEXO - FIGURAS .....	156

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Análise do DRX para as amostras de RCD (Limbachiya <i>et al</i> , 2007) .....	15
Figura 2 – Análise mineralógica das frações (0,6-0,125mm) dos agregados reciclados (Bianchini <i>et al</i> , 2005) .....	15
Figura 3 – Evolução do calor de hidratação do cimento com 25000 ppm de metais pesados (Stephan <i>et al</i> , 1999) .....	22
Figura 4 – Evolução da resistência à compressão do cimento com metais pesados (Stephan <i>et al</i> , 1999) .....	22
Figura 5 – Efeito dos agregados reciclados no abatimento do concreto (Khatib, 2005) .....	24
Figura 6 – Aparato de ensaio de retração plástica (Baghabra <i>et al</i> , 2004) .....	26
Figura 7 – Taxa de evolução de calor para cimento Portland comum (Taylor, 1969) .....	27
Figura 8 – Evolução da resistência à compressão para agregados de tijolo e telha (Khatib, 2005) .....	30
Figura 9 – Resistência à compressão em função da a/c (Miranda & Selmo, 2006) .....	32
Figura 10 – Termograma da pasta com 40% de resíduo cerâmico (a) e evolução do teor de água quimicamente combinada do Ca(OH) <sub>2</sub> (Toledo <i>et al</i> , 2006) .....	38
Figura 11 – Termograma de agregados reciclados de concreto para amostra 3 (Dollimore <i>et al</i> , 2001) .....	39
Figura 12 – Fluxograma do delineamento da pesquisa.....	40
Figura 13 – Aparelho de Difração de Raios-X .....	44
Figura 14 – Esquema do equipamento de absorção capilar de materiais granulares (Andrade <i>et al</i> , 2007) .....	45
Figura 15 – Esquema de calcinação dos agregados reciclados finos.....	49
Figura 16 – Mufla utilizada para a calcinação dos finos de RCD .....	49
Figura 17 – Equipamentos utilizados para determinação da resistência à compressão das pastas.....	50
Figura 18 – Esquema para determinação da área do pico.....	51
Figura 19 – Esquema do ensaio de retração plástica em concretos (Andrade, 2004).....	55
Figura 20 – Equipamento utilizado no ensaio de retração plástica em concretos .....	55
Figura 21 – Equipamento utilizado para resistência à compressão dos concretos .....	59
Figura 22 – Equipamento utilizado para resistência à compressão e aquisição de dados da deformação dos concretos.....	60
Figura 23 – Medidores de deformação longitudinal dos concretos .....	60
Figura 24 – Mesa de espalhamento e equipamento de mistura .....	61
Figura 25 – Equipamento de compactação e moldes dos corpos-de-prova prismáticos.....	62
Figura 26 – Aparato de ensaio de absorção de água por capilaridade – vista superior (Andrade, 2004) .....	63
Figura 27 – Aparato de ensaio de absorção de água por capilaridade – vista lateral (Andrade, 2004) .....	63



Figura 28 – Aparato de ensaio de absorção de álcool por capilaridade (Santos,2006) .....	64
Figura 29 – Equipamentos utilizados para o ensaio de resistência à tração na flexão e resistência à compressão .....	66
Figura 30 – Difratoograma para o agregado reciclado de RCD bruto e calcinado .....	68
Figura 31 – Termograma obtido do ensaio da ATD para os agregados reciclados finos .....	69
Figura 32 – Curva granulométrica do agregado miúdo reciclado e natural.....	70
Figura 33 – Curva granulométrica do agregado graúdo natural e reciclado.....	71
Figura 34 – Índice de absorção de água por capilaridade em materiais granulares.....	75
Figura 35 – Evolução da cinética de absorção de água por capilaridade - 4,8/fundo.....	77
Figura 36 – Evolução da cinética de absorção de água por capilaridade - 4,8/0,075 .....	77
Figura 37 – Evolução da cinética de absorção de água por capilaridade - 4,8/0,15 .....	77
Figura 38 – Resistência à compressão das pastas aos 3 dias .....	79
Figura 39 – Resistência à compressão das pastas aos 7 dias .....	80
Figura 40 – Resistência à compressão das pastas aos 28 dias .....	80
Figura 41 – Resistência à compressão das pastas aos 90 dias .....	80
Figura 42 – Termogramas típicos das misturas com agregado reciclado fino bruto .....	81
Figura 43 – Evolução do consumo de $\text{Ca(OH)}_2$ das pastas aos 3 dias.....	82
Figura 44 – Evolução do consumo de $\text{Ca(OH)}_2$ das pastas aos 7 dias.....	82
Figura 45 – Evolução do consumo de $\text{Ca(OH)}_2$ das pastas aos 28 dias.....	82
Figura 46 – Evolução do consumo de $\text{Ca(OH)}_2$ das pastas aos 90 dias.....	83
Figura 47 – Correlação entre a resistência à compressão e o consumo $\text{Ca(OH)}_2$ aos 28 dias .....	84
Figura 48 – Correlação entre a resistência à compressão e o consumo $\text{Ca(OH)}_2$ aos 90 dias .....	84
Figura 49 – Avaliação da consistência das argamassas – M1 .....	89
Figura 50 – Avaliação da consistência das argamassas – M2 .....	89
Figura 51 – Avaliação da consistência das argamassas – M3 .....	89
Figura 52 – Resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone para os concretos .....	90
Figura 53 – Influência dos agregados reciclados na massa específica das argamassas no estado fresco.....	91
Figura 54 – Influência dos agregados reciclados na massa específica dos concretos no estado fresco.....	91
Figura 55 – Evolução da retração plástica do concreto M1 .....	94
Figura 56 – Evolução da retração plástica do concreto M3.....	94
Figura 57 – Evolução da temperatura para o concreto M1 .....	96
Figura 58 – Evolução da temperatura para o concreto M3 .....	96
Figura 59 – Evolução do calor de hidratação do concreto M1 .....	97
Figura 60 – Evolução do calor de hidratação do concreto M3 .....	98
Figura 61 – Tempo de pico de calor e variação máxima de temperatura dos concretos .....	98
Figura 62 – Evolução do pico de calor dos concretos (Q).....	100
Figura 63 – Evolução da taxa de calor para os concretos ( $\Delta Q$ ).....	100

Figura 64 – Evolução do calor máximo para 20 horas dos concretos ( $Q_{max}$ ).....	100
Figura 65 – Evolução do pico de calor em relação ao consumo de cimento por $m^3$ .....	101
Figura 66 – Evolução do calor máximo em relação ao consumo de cimento por $m^3$ .....	102
Figura 67 – Evolução da resistência à tração na flexão das argamassas aos 28 dias.....	103
Figura 68 – Evolução da resistência à tração na flexão das argamassas aos 90 dias.....	103
Figura 69 – Resistência à compressão das argamassas aos 28 dias.....	104
Figura 70 – Resistência à compressão das argamassas aos 90 dias.....	105
Figura 71 – Absorção de água por capilaridade em função da raiz do tempo aos 28 dias - M1	106
Figura 72 – Absorção de água por capilaridade em função da raiz do tempo aos 28 dias – M2	107
Figura 73 – Absorção de água por capilaridade em função da raiz do tempo aos 28 dias - M3	107
Figura 74 – Absorção de água por capilaridade em função da raiz do tempo aos 90 dias - M1	108
Figura 75 – Absorção de água por capilaridade em função da raiz do tempo aos 90 dias – M2	108
Figura 76 – Absorção de água por capilaridade em função do tempo aos 90 dias - M3 .....	109
Figura 77 – Coeficiente de Sorptividade em relação ao teor de agregado miúdo de RCD aos 28 dias .....	110
Figura 78 – Coeficiente de Sorptividade em relação ao teor de agregado miúdo de RCD aos 90 dias .....	111
Figura 79 – Absorção de álcool por capilaridade em função da raiz do tempo aos 90 dias - M1 .....	112
Figura 80 – Absorção de álcool por capilaridade em função da raiz do tempo aos 90 dias – M2 .....	112
Figura 81 – Absorção de álcool por capilaridade em função da raiz do tempo aos 90 dias - M3 .....	113
Figura 82 – Relação entre a sorptividade da argamassa e consumo de $Ca(OH)_2$ aos 28 dias ....	114
Figura 83 – Relação entre a sorptividade da argamassa e consumo de $Ca(OH)_2$ aos 90 dias ....	114
Figura 84 – Resistência à compressão dos concretos com agregado miúdo reciclado aos 7 dias .....	116
Figura 85 – Resistência à compressão dos concretos com agregado miúdo reciclado aos 28 dias .....	117
Figura 86 – Resistência à compressão dos concretos com agregado miúdo reciclado aos 90 dias .....	117
Figura 87 – Resistência à compressão dos concretos com agregado graúdo reciclado aos 7 dias .....	120
Figura 88 – Resistência à compressão dos concretos com agregado graúdo reciclado aos 28 dias .....	120
Figura 89 – Resistência à compressão dos concretos com agregado graúdo reciclado aos 90 dias .....	120
Figura 90 – Curvas Tensão <i>versus</i> Deformação dos concretos aos 28 dias - M1.....	122
Figura 91 – Curvas Tensão <i>versus</i> Deformação dos concretos aos 28 dias – M2.....	123

Figura 92 – Curvas Tensão <i>versus</i> Deformação dos concretos aos 28 dias - M3.....	123
Figura 93 – Curvas Tensão <i>versus</i> Deformação dos concretos aos 90 dias – M1 .....	124
Figura 94 – Curvas Tensão <i>versus</i> Deformação dos concretos aos 90 dias – M2 .....	124
Figura 95 – Curvas Tensão <i>versus</i> Deformação dos concretos aos 90 dias - M3.....	125
Figura 96 – Curvas Tensão <i>versus</i> Deformação dos concretos aos 28 dias - M4.....	126
Figura 97 – Curvas Tensão <i>versus</i> Deformação dos concretos aos 28 dias - M5.....	126
Figura 98 – Curvas Tensão <i>versus</i> Deformação dos concretos aos 90 dias - M4.....	127
Figura 99 – Curvas Tensão <i>versus</i> Deformação dos concretos aos 90 dias - M5.....	127

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição do Resíduo da construção civil em Hong Kong.....	8
Tabela 2 – Composição de resíduo de Ribeirão Preto/SP .....	9
Tabela 3 – Composição do Resíduo da construção civil em Florianópolis - SC.....	9
Tabela 4 – Composição dos resíduos dos membros da EC .....	10
Tabela 5 – Recomendações para agregados graúdos reciclados (RILEM, 1994) .....	12
Tabela 6 – Recomendações para concretos com agregados reciclados (RILEM, 1994).....	12
Tabela 7 – Recomendações para agregados reciclados (DIN 4226-100, 2002) .....	13
Tabela 8 – Recomendações para concretos com agregados reciclados (DIN 4226-100, 2002) ...	13
Tabela 9 – Composição química dos constituintes identificados pelo XRF.....	14
Tabela 10 – Resultados do consumo de CaO no ensaio de Chapelle modificado .....	35
Tabela 11 – Resultados do consumo de CaO pelos agregados reciclados.....	36
Tabela 12 – Propriedades do cimento CP I-S .....	41
Tabela 13 – Propriedades do cimento CP II-F.....	42
Tabela 14 – Ensaio de caracterização executados.....	43
Tabela 15 – Descrição das misturas para ensaio de absorção capilar granular .....	47
Tabela 16 – Traço utilizado utilizados no ensaio da determinação da reatividade pozolânica ....	50
Tabela 17 – Descrição das misturas estudadas .....	52
Tabela 18 – Porcentagens de substituição dos agregados reciclados finos .....	53
Tabela 19 – Calores específicos considerados para os materiais utilizados .....	56
Tabela 20 – Parâmetros característicos dos líquidos utilizados na absorção capilar (T = 20°C) .	64
Tabela 21 – Composição química do agregado miúdo reciclado bruto (%).....	67
Tabela 22 – Composição química do agregado miúdo reciclado calcinado a 800°C (%).....	67
Tabela 23 – Composição química do agregado miúdo reciclado calcinado a 600°C (%).....	67
Tabela 24 – Características químicas do cimento CP II – F (%).....	67
Tabela 25 – Análise química dos ensaios de lixiviação e solubilização dos agregados reciclados .....	69
Tabela 26 – Principais parâmetros obtidos da granulometria dos agregados .....	72
Tabela 27 – Ensaio de caracterização dos agregados reciclados e naturais .....	73
Tabela 28 – Perda de massa ao fogo no processo de calcinação .....	74
Tabela 29 – Resultados da absorção capilar granular dos agregados miúdos .....	75
Tabela 30 – Resultados de reconstituição de traço do agregado reciclado.....	78
Tabela 31 – Traço utilizado utilizados no ensaio da determinação da reatividade pozolânica ....	79
Tabela 32 – Perda de massa ao fogo determinados no ensaio de ATD .....	85
Tabela 33 – Quantidade de material para o índice de atividade pozolânica .....	85
Tabela 34 – Índice de atividade pozolânica dos agregados reciclados finos.....	85
Tabela 35 – Traços finais utilizados nas misturas de concreto .....	86
Tabela 36 – Traços finais das misturas de argamassas .....	87

Tabela 37 – Consumo real de cimento por m <sup>3</sup> dos concretos .....	87
Tabela 38 – Consumo real de cimento das argamassas .....	88
Tabela 39 – Teor de ar incorporado nos concretos .....	92
Tabela 40 – Teor de ar incorporado nas argamassas .....	93
Tabela 41 – Resultado final da retração plástica para os concretos.....	93
Tabela 42 – Percentual de variação da retração plástica em função do teor de agregado miúdo reciclado .....	95
Tabela 43 – Resultados do ensaio de calorimetria dos concretos.....	97
Tabela 44 – Acréscimo da resistência à flexão para as argamassas .....	104
Tabela 45 – Acréscimo da resistência à compressão das argamassas .....	106
Tabela 46 – Coeficiente de sorptividade das argamassas com agregado miúdo reciclado aos 28 dias .....	110
Tabela 47 – Coeficiente de sorptividade das argamassas com agregado miúdo reciclado aos 90 dias .....	110
Tabela 48 – Coeficiente de sorptividade com álcool das argamassas com agregado miúdo reciclado aos 90 dias .....	113
Tabela 49 – Ângulo de molhamento aparente para as argamassas com agregado miúdo reciclado aos 90 dias.....	113
Tabela 50 – Resistência à compressão média dos concretos M1 .....	115
Tabela 51 – Resistência à compressão média dos concretos M2 .....	115
Tabela 52 – Resistência à compressão média dos concretos M3 .....	116
Tabela 53 – Comparação das resistências entre os concretos M1 e M3 .....	118
Tabela 54 – Resistência à compressão média dos concretos M4 .....	119
Tabela 55 – Resistência à compressão média dos concretos M5 .....	119
Tabela 56 – Acréscimo da resistência dos concretos com agregados reciclados de RCD em função da idade .....	121
Tabela 57 – Resultados do Módulo de Deformação dos concretos M1 com agregado miúdo reciclado .....	128
Tabela 58 – Resultados do Módulo de Deformação dos concretos M2 com agregado miúdo reciclado .....	128
Tabela 59 – Resultados do Módulo de Deformação dos concretos M3 com agregado miúdo reciclado .....	129
Tabela 60 – Resultados do Módulo de Deformação dos concretos M4 com agregado graúdo reciclado .....	129
Tabela 61 – Resultados do Módulo de Deformação dos concretos M5 com agregado graúdo reciclado .....	130
Tabela 62 – Acréscimo no módulo de deformação dos concretos.....	131

## LISTA DE ABREVIATURAS, NOTAÇÕES E SIGLAS

a/c	Relação água/cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
BS	British Standard
ATD	Análise Térmica Diferencial
BET	Modelo desenvolvido por Brunauer, Emmetr e Teller em 1938
BH – AGR FINO	Agregado Reciclado Fino proveniente da central de reciclagem de Belo Horizonte/MG.
DIN	Deutsches Institut fur Normung
DRX	Difratometria de Raios-X
EC	European Comission
EDX	Espectometria de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva
EPA	National Source Redution Characterization Report for Municipal Solid Waste in the United States
fck	Resistência Característica à compressão aos 28 dias
NBR	Norma Brasileira de Referência
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
RILEM	Réunion International des Laboratories D’ Essais et Matériuix
SC	Santa Catarina
T	Temperatura
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UR	Umidade Relativa
ValoRes	Laboratório Valorização e Reciclagem de Resíduos Industriais na Construção Civil da Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina
LVDT	linear variable differential transducer
NBR NM	Normalização brasileira e Mercosul
$\alpha_e$	ângulo de contato aparente
A	área da seção transversal
AFm	monossulfoaluminato de cálcio ou monossulfato
AFt	etringita
$c_i$	calor específico do constituinte do concreto
C <sub>2</sub> S	belita, silicato dicálcico

$C_3A$	aluminato tricálcico
$C_3S$	alita, silicato tricálcico
$C_4AF$	ferro-aluminato tetracálcico
CPI-S	cimento Portland comum com adição
CP II-F	cimento Portland com adição de filler calcáreo
$C_s$	capacidade térmica da amostra
C-S-H	silicato de cálcio hidratado
$\delta_{ap}$	massa específica aparente
$\delta_u$	massa unitária no estado solto
$\Delta Q_i$	taxa de calor gerado no tempo i
$\varepsilon$	deformação por retração plástica do concreto
$\varepsilon_{max}$	deformação máxima por retração plástica do concreto
$g_i$	proporção relativa do constituinte na massa da amostra de concreto
$I_{abs\_H_2O}$	índice de absorção de água
$M_{H_2O}$	massa de água
$M_S$	massa da amostra seca em estufa
$Q_i$	quantidade de calor gerado no tempo i
$Q_{max}$	quantidade do calor total gerado durante o ensaio
$Q(t)$	calor de hidratação do cimento desenvolvido no tempo
$\rho_{ar}$	densidade do ar
$\rho_w$	densidade da água
$\sigma_{alc}$	tensão superficial álcool/ar
$\sigma_{H_2O}$	tensão superficial água/ar
S	coeficiente de sorptividade

## RESUMO

A reciclagem de resíduos de construção e demolição (RCD) tem-se mostrado uma boa alternativa na redução do impacto causado pelo consumo e elevada demanda de matéria-prima pela construção civil. Neste sentido, tem-se tentado incorporar esses resíduos na produção de concretos e argamassas de baixa resistência, o que aumentaria seu potencial de utilização.

Este trabalho foi desenvolvido com objetivo de avaliar a influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino nas propriedades de concretos e argamassas. O estudo apresenta resultados das características físicas dos agregados miúdos e graúdos obtidos a partir do beneficiamento de RCD. As partículas inferiores a 0,15mm foram analisadas, quanto à sua reatividade pozolânica, no estado bruto e calcinado a uma temperatura de 600°C e 800°C. Foram então produzidos concretos e argamassas com diferentes teores de substituição do agregado miúdo natural (0%, 25%, 50%, 75%, 100%) pelo agregado miúdo reciclado, assim como para os agregados graúdos reciclados, considerando uma relação a/c constante de 0,60 para concretos e 0,66 para as argamassas.

A influência do agregado reciclado foi avaliada sobre propriedades do concreto no estado fresco (massa específica, trabalhabilidade, retração plástica e calor de hidratação) e no estado endurecido (resistência à compressão e módulo de deformação). Para o caso de argamassas foram avaliadas no estado fresco (trabalhabilidade e massa específica) e no estado endurecido (resistência à tração na flexão, resistência à compressão e absorção capilar).

Os resultados mostram a influência da fração fina de RCD nos comportamentos no estado fresco dos concretos e argamassas, reduzindo sua trabalhabilidade, alterando a cinética de hidratação dos concretos e melhorando no controle da retração plástica. No estado endurecido, não foi evidenciado uma melhoria importante na resistência dos concretos e argamassas com o processo de calcinação das partículas finas.

Palavras-chave: concreto; agregados reciclados finos; reciclagem.



## ABSTRACT

Construction and demolition waste (CDW) recycling has been a good alternative to reducing the impact caused by the consumption and high demand of raw materials for civil construction. In this sense, it has been tried to incorporate those wastes in the production of concrete and decrease strength mortar, what would increase its potential use.

This study was developed aiming to assess the influence of the replacement of fine recycled aggregates for fine natural aggregates in properties of concretes and mortars. The study presents results of the physical characteristics of fine and coarse aggregates obtained from the manufacturing of CDW. The particles smaller than 0.15mm were analysed, concerning its pozzolanic reactivity, were analyzed in natural state and calcined to the temperature of 600°C and 800°C. Concretes and mortars were then produced with different replacement rates of fine natural aggregate (0%, 25%, 50%, 75%, 100%) for fine recycled aggregate as well as for coarse recycled aggregates, considering a water/cement ratio constant of 0.60 for the concretes and 0.66 for the mortars.

The influence of the recycled aggregates was evaluated on properties of the concrete in fresh state (specific weight, workability, plastic shrinkage and hydration heat) and the hardened state (compressive strength and modulus of elasticity). For the case of mortars, they were evaluated in the fresh state (workability) and the hardened state (flexural strength, compressive strength and capillary absorption).

The results show the influence of the fine fraction of CDW in the behaviors in the fresh state of the concretes and mortars, decreasing its workability, changing the concrete hydration kinetics and improving the plastic shrinkage control. In the hardened state, was not evidenced an important better in the concrete and mortar strength with the process of calcination of the fine particles.

Keywords: concrete; fine recycled aggregate; recycling.

## 1 INTRODUÇÃO

Muitas cidades brasileiras têm sofrido com o grave problema que é o elevado volume de entulho gerado pela construção civil, tanto por obras novas quanto em reformas e demolições. Enchentes, poluição visual, etc. são apenas alguns exemplos dos problemas causados por este desperdício e falta de consciência do setor.

Várias são as fontes de geração de resíduos na construção civil. Dentre elas se encontra a falta de qualidade dos bens e serviços, que pode dar origem às perdas de materiais que saem das obras em forma de entulho e contribuem sobremaneira no volume de resíduos gerados. As conseqüências do grande volume de resíduos gerados seriam a falta de matéria prima e a escassez de aterros para a disposição final desses resíduos.

Com a introdução da legislação de resíduo na forma de regulamentos e diretrizes orientadoras em muitas partes do mundo, um movimento significativo para a gestão sustentável do resíduo de construção e demolição (RCD) está tornando-se exigência legal. Em resposta, os setores da indústria de construção estão empreendendo várias iniciativas para minimizar a geração e melhorar a gestão do resíduo de RCD para maximizar os benefícios econômicos e ambientais, geralmente colocando a ênfase na reciclagem crescente para o reuso desses materiais (LIMBACHIYA, M.C.; MARROCHINO, E.; KOULOURIS, A.; 2007). No Brasil, a resolução CONAMA 307 fornece as diretrizes para classificação dos resíduos de construção e demolição, servindo de estímulo para que se separe os resíduos cuja fração mineral possa ser aproveitada através do beneficiamento sob a forma de agregado.

Segundo JONH (2000), a reciclagem de resíduos é uma das formas de melhorar a oferta de materiais de construção, tornando possível à redução de preço e gerando benefícios sociais através da política habitacional. Estes benefícios podem surgir devido a incentivos dados à produção de habitações de baixa renda, empregando-se produtos reciclados de desempenho comprovado. Além do mais, há uma grande possibilidade de se reaproveitar o agregado reciclado em substituições parciais ou totais do agregado natural. Essa prática de reaproveitamento de materiais é ainda quase insignificante diante do montante gerado, onde a maioria das instalações opera com unidades de beneficiamento fixas. Em regiões com carência de material pétreo, como no norte do país, a tecnologia de reaproveitamento pode ser facilmente absorvida.

Na Europa, tem-se observado um aumento crescente de instalações móveis, capazes de processar no local os resíduos oriundos de demolições. Na Alemanha, um acordo voluntário

foi concluído em 1996 entre o Ministério Federal do Ambiente e a Federação das empresas construtoras, onde a maioria das empresas de construção pertencem, com o objetivo de reduzir o volume de resíduo disposto em aterros até 50% entre 1995 e 2005. Na Holanda foi implantada uma usina nacional de “resíduos locais de construção” para o período 1993-2000 que compreende 50 medidas que visavam proibir o aterramento de resíduos reaproveitáveis. A maioria dos resíduos de construção e demolição foi recuperada e a taxa de recuperação esperava-se alcançar a 90% no ano 2000, conforme divulgação no boletim da Comunidade Européia (2000).

De acordo com POON & CHAN (2006), em 2004 acima de 20 milhões de toneladas de resíduo da construção e demolição foram gerados em Hong Kong. Desde que os aterros locais saturaram em aproximadamente 8 anos, foi importante encontrar uma maneira viável para o reuso destes resíduos de materiais. A fim de solucionar o problema, o governo de Hong Kong tem facilitado a reciclagem para produzir tamanhos diferentes de agregados reciclados para o uso em vários materiais de construção.

No Brasil, algumas prefeituras vêm tentando amenizar o problema partindo para a reciclagem de entulhos em usinas fixas montadas. Um dos exemplos de sucesso é a cidade de Belo Horizonte/MG, que iniciou um programa de reciclagem de entulho incluindo a instalação de 4 usinas de reciclagem. A primeira delas está operando eficientemente desde novembro de 1995. Ribeirão Preto e São José dos Campos, ambas no interior de São Paulo, também dispõem de usinas de reciclagem.

A eficiência no processo de reciclagem dos resíduos provenientes de construção e demolição é importante para eliminar os problemas da grande variabilidade dos produtos resultantes. As características do resíduo dependem diretamente do desenvolvimento da indústria da construção local, bem como da localização geográfica, perfil das atividades econômicas, tipo e fase da obra, técnicas construtivas empregadas, entre outros fatores (ZORDAN, 1997).

Muito tem-se avançado na utilização dos agregados reciclados de RCD para produção de concretos, argamassas e outros produtos destinados à construção civil. As recomendações e normas técnicas referentes a esses agregados, amparam a utilização desses materiais. Estudos recentes comprovam o desempenho dos concretos confeccionados com resíduos cerâmicos em relação aos concretos convencionais com agregados naturais (POON, C.S.; CHAN, D., 2006; SENTHAMARAI & MONOHARAN, 2005; CHEN, H.J.; YEN, T.; CHEN, K.H., 2003; KHATIB, J.M., 2005)

No Brasil, um número importante de pesquisas foi desenvolvido a fim de reutilizar os

agregados provenientes de construção e demolição. Alguns autores avaliaram o desempenho desses materiais em concretos (ZORDAN, 1997; LIMA, 1999, LEITE, 2001; LEVY, 2001; BAZZUCO, 1999) e outros autores como (MIRANDA, 2000; LIMA, 1999) avaliaram o comportamento em argamassas.

De acordo com MEHTA & MONTEIRO (1994), o principal obstáculo no uso do entulho de construção como agregado para concreto é o custo de britagem, graduação, controle do pó e separação dos constituintes indesejáveis. Ou seja, ao se analisar os agregados reciclados é importante que sejam consideradas as particularidades dos resíduos usados na sua produção.

Os agregados reciclados apresentam grande variação em suas propriedades dependendo da composição do resíduo processado, equipamentos usados, teor de impurezas, composição granulométrica, etc. (PINTO, 1999; XAVIER, 2001; SARDA, 2003). Apresentam propriedades específicas diferentes das propriedades dos agregados convencionais, que determinam algumas diferenças nas condições de aplicação, dosagens e nas características de argamassas e concretos em que forem usados (KHATIB, 2005; KATZ, 2003; DEBIEB & KENAI, 2007).

As principais diferenças dos agregados reciclados de RCD que podem ser considerados em relação aos agregados convencionais são (KHATIB, J.M.,2005; POON, C.S. & CHAN, D.,2006):

- Maior absorção de água dos grãos;
- Heterogeneidade na composição;
- Menor resistência mecânica dos grãos.

O uso de agregados miúdos reciclados apresenta certas restrições, devido a suas características físicas, para sua utilização em concretos. De acordo com POON, C.; CHAN, D (2006), a parcela fina inferior a 5mm junto com a parcela do agregado graúdo reciclado, não é recomendada geralmente em composições de misturas de concreto devido à dificuldade de controlar a trabalhabilidade das misturas do concreto, preparadas com agregado graúdo e miúdos reciclados. Outros fatores seriam a elevada absorção de água, assim como, uma perda maior do slump e elevação da exsudação (POON, C.S.; KOU, S.C.; LAM, L., 2006).

Segundo as recomendações da RILEM (1994), o uso da parcela inferior a 4mm não é recomendado para o uso em concretos e estipula um limite de 3% para material passante na peneira 75 $\mu$ m. Para o caso dos agregados graúdos reciclados recomendam o uso para uma resistência característica de até 20MPa.

De acordo com KHATIB (2005), substituindo a areia natural no concreto por agregado fino de tijolo, não causa uma redução substancial na resistência a longo prazo mesmo em níveis elevados de substituição, com relação a/c livre de 0,5 sem a utilização de aditivos plastificantes. Com substituição de até 50%, a resistência é similar àquela da referência, visto que com 100% de substituição ocorre uma redução menor de 10%.

POON, C.S.; CHAN, D. (2007) estudaram o uso do tijolo cerâmico triturado fino na produção de blocos de pavimentação de concretos preparados com agregado reciclado de RCD. Concluíram que o uso do tijolo cerâmico fino diminuiu a densidade, a resistência à compressão e aumentou a absorção de água dos blocos de pavimentação de concreto de cimento Portland. Não obstante, foi possível substituir 10% de RCD fino por uma combinação do agregado fino de tijolo e telha na produção de blocos de pavimentação de concretos, onde mostraram desempenhos satisfatórios.

Mesmo com as restrições impostas e analisando o efeito em concretos e argamassas, os finos de RCD podem apresentar um efeito positivo. Os agregados miúdos reciclados, formado em grande parte por materiais cerâmicos (ZORDAN, 1997; XAVIER, 2001), apresentam características que contribuem para a melhoria das propriedades mecânicas de concretos e argamassas produzidos com agregado miúdo reciclado (LEVY, 1997). O autor afirma que as argilas calcinadas em temperaturas não muito elevadas (os tijolos e blocos cerâmicos de segunda linha por exemplo), representam os materiais cerâmicos com maior grau de pozolanicidade. O efeito desses finos de RCD presentes em misturas cimentícias também será avaliado quanto a sua atividade pozolânica.

Os resultados da pesquisa não serão estendidos para todos os tipos de materiais recicláveis da construção e demolição, ficando restrita para a utilização dos materiais utilizados especificamente nesta pesquisa, donde valerá as discussões necessárias.

Diante do contexto apresentado, a pesquisa tem como enfoque avaliar a influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino nas propriedades de argamassas e concretos.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Este estudo tem por finalidade avaliar a influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino como potencial para a utilização argamassas e concretos.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos da presente pesquisa são:

- avaliar as propriedades físicas e químicas dos agregados reciclados finos produzidos a partir dos resíduos de construção e demolição provenientes da usina de reciclagem de Belo Horizonte/MG;
- avaliar o efeito da substituição do agregado natural por agregado reciclado fino nas propriedades das argamassas e concretos;
- avaliar o efeito da presença de partículas inferiores a 4,8mm na confecção de concretos com agregado graúdo reciclado;
- verificar a influência dos agregados reciclados finos no desenvolvimento da cinética de hidratação e na retração plástica dos concretos;
- identificar a influência da adição de finos inferiores a 150 $\mu$ m calcinados a 600°C e 800°C em argamassas e concretos.

## **1.2 HIPÓTESES**

Tem-se por hipóteses:

- Os agregados reciclados porosos servem como um reservatório na mistura, ajudando na cura interna reduzindo dessa forma a retração plástica dos concretos.
- A calcinação da parcela fina (<150 $\mu$ m) dos agregados reciclados pode fornecer um material com melhor desempenho em relação aos agregados reciclados brutos pelo fato de desenvolver maior atividade pozolânica.

### 1.3 ESTRUTURA DA APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos.

O capítulo 1, **Introdução**, apresenta uma breve introdução, com abordagem de questões relativas à justificativa e importância da pesquisa, bem como seus objetivos e hipóteses.

O segundo capítulo, **Revisão Bibliográfica**, apresenta o estado-da-arte sobre resíduos de construção e demolição em assuntos como as propriedades dos agregados reciclados finos e as propriedades de concretos e argamassas com a adição deste material.

O terceiro capítulo, **Materiais e Métodos**, descreve o programa experimental da pesquisa. Neste capítulo são apresentados os métodos adotados para a realização dos ensaios nos concretos e argamassas, assim como a apresentação dos materiais utilizados.

No quarto capítulo, **Análise dos Resultados**, encontra-se a apresentação, análise e discussão dos resultados dos ensaios das propriedades do concreto e argamassa no estado fresco e endurecido.

No quinto capítulo, **Considerações Finais**, são feitas as conclusões finais sobre o trabalho e apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 BREVE HISTÓRICO

A prática da reciclagem de materiais de construção, apesar de ter-se desenvolvido em grande escala nos últimos anos, apresenta registros já na antigüidade. O reaproveitamento de resíduos para uso em construção é praticado desde o Império Romano e Grécia antiga. De acordo com SANTOS (1975) *apud* LIMA (1999) restos de telhas, tijolos e utensílios de cerâmica eram utilizados como agregado graúdo em concretos rudimentares. Entretanto, só depois de 1928 alguns estudos sistemáticos foram realizados para avaliar o efeito desses agregados no consumo de cimento, consumo de água e granulometria dos agregados de tijolos britados (WEDLER e HUMMEL, *apud* LEVY e HELENE, 2000).

A primeira utilização significativa de resíduos de construção e demolição foi registrada após o fim da Segunda Grande Guerra, onde milhares de escombros ficaram espalhados pelas cidades. A necessidade de matéria prima para reconstrução e a falta de local de destino dos grandes volumes de resíduos fizeram com que estes materiais fossem reaproveitados. (RAO, A.; JHA, K.N.; MISRA, S., 2007). De acordo com DE PAW & LAURITZEN (1994) *apud* LIMA (1999), foram reciclados aproximadamente 115 milhões de m<sup>3</sup> de resíduos de construção e demolição na Alemanha, os quais foram utilizados na construção de aproximadamente 175 mil unidades habitacionais.

Nas últimas décadas, principalmente por razões ambientais e econômicas, vários países vêm adotando a reciclagem, realizada por empresas particulares ou públicas, podendo ser citados: Holanda, Dinamarca, Estados Unidos, Japão, França, Itália. Espanha, Reino Unido, Rússia e mais recentemente o Brasil (HANSEN, 1992; ZORDAN, 1997). As aplicações, no entanto, variam conforme o país, em função de características particulares como oferta de materiais de construção e resíduos, disponibilidade de locais para deposição e o rigor das normas relativas a materiais a serem utilizados na construção.

No Brasil, a reciclagem dos resíduos de construção teve início efetivo em 1991, em Belo Horizonte, e hoje já existem algumas estações de tratamento e reciclagem deste material, espalhadas em alguns estados do Brasil. Alguns estudos têm sido desenvolvidos em universidades nacionais no sentido de obter um melhor entendimento sobre o comportamento deste material (ZORDAN, 1997; LEVY, 1997; BAZUCO, 1999; ANGULO, 2005).



## 2.2 COMPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS DE RCD

O entulho de construção civil talvez seja o mais heterogêneo dentre os resíduos industriais. Ele é constituído de restos de praticamente todos os materiais e componentes utilizados pela indústria da construção civil, como: brita, areia, materiais cerâmicos, argamassas, concretos, madeira, etc., e sua composição química está vinculada à estrutura de cada um desses seus constituintes. Ele se apresenta na forma sólida, com características físicas variáveis, podendo apresentar dimensões e geometria conhecidas dos materiais de construção (como areia e brita), ou como formatos e dimensões irregulares: pedaços de madeira, argamassas, concretos, plástico, metais, etc.

De acordo com ZORDAN (1997), a composição diversificada do entulho deve-se ao fato da grande quantidade de material empregado na construção civil, a composição do entulho varia conforme a região e de acordo com as características da construção.

De acordo com PINTO (1999), uma grande quantidade de resíduos é comumente disposta em aterros inertes, também chamados de “bota-foras”, favorecendo o acelerado esgotamento das áreas designadas para disposição.

No cenário internacional, POON, C.S., YU, Ann T.W., Ng, L.H. (2001), no estudo dos resíduos de construção civil gerado em Hong Kong, apresentaram a composição dos resíduos em massa, descrita na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição do Resíduo da construção civil em Hong Kong

COMPONENTES	RESÍDUOS DE DEMOLIÇÃO (%)	RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO (%)
Asfalto	1,61	0,13
Concreto	19,99	9,27
Concreto armado	33,11	8,25
Solo (terraplanagem)	11,91	30,55
Pedra britada	6,83	9,74
Pedregulho	4,95	14,13
Madeira	7,15	10,53
Bambu	0,31	0,30
Bloco de concreto	1,11	0,90
Tijolo	6,33	5,00
Vidro	0,20	0,56
Matéria orgânica	1,30	3,05
Tube de plástico	0,61	1,13
Areia	1,44	1,70
Instalações	0,04	0,03
Outras sobras	0,07	0,24
Aço	3,41	4,36

Fonte: Poon *et al* (2001)

No panorama nacional, várias pesquisas foram realizadas com o objetivo de identificar a composição dos resíduos de cada região do país. ZORDAN (1997) analisou a composição que foi produzida na recicladora pública de Ribeirão Preto/SP, realizando coletas de amostras no ano de 1996. As coletas foram feitas nas pilhas do resíduo já triturado. A tabela 2 apresenta a composição.

Tabela 2 – Composição de resíduo de Ribeirão Preto/SP

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

Fonte: Zordan (1997)

No município de Florianópolis/SC, XAVIER (2001) apresenta as composições dos resíduos em aterros municipais estudados. A composição está descrita na tabela 3.

Tabela 3 – Composição do Resíduo da construção civil em Florianópolis - SC

COMPONENTES	VOLUME (%)	MASSA (%)
Misto 2 (fragmentos que não foi possível separar manualmente).	21,77	31,56
Argamassa	17,15	17,32
Misto 1 (cerâmica vermelha com argamassa aderida)	13,77	11,86
Concreto e argamassa	11,34	10,26
Cerâmica vermelha	11,01	7,95
Cerâmica branca	9,72	7,13
Concreto	7,80	9,69
Madeira	3,72	1,21
Concreto com areia	1,39	1,68
Telha de cimento amianto	0,47	0,22
Areia	0,45	0,74
Argamassa de assentamento de piso	0,10	0,07
Mármore	0,02	0,02
Ferro	0,02	0,01
Outros	1,28	0,29

Fonte: Xavier (2001)

Um aspecto interessante observado em várias cidades brasileiras e no mundo, é o percentual de materiais inertes com potencial de reaproveitamento para produção de agregados. Estes índices demonstram que o material com alto valor econômico não está sendo aproveitado e causando grande impacto ao meio ambiente. A presença marcante de argamassas está

associada ao emprego em quase todas as fases da construção, como assentamento de alvenaria, revestimento e acabamento.

Conhecendo o potencial de reciclagem desses resíduos, vários países têm procurado incentivar a reciclagem desses resíduos. A tabela 4 ajusta as quantidades de resíduos gerados e a parcela reciclada (exceto resíduo de terra e escavação) que foram adotadas por alguns países membros da *European Comission* (EC).

Tabela 4 – Composição dos resíduos dos membros da EC

<b>Geração e Reciclagem de RCD</b>			
<b>Pais membro</b>	<b>Geração RCD (em 1000 ton.)</b>	<b>% Reuso ou Reciclagem</b>	<b>% Incinerado ou aterado</b>
Alemanha	59	17	83
Reino Unido	30	45	55
França	24	15	85
Itália	20	9	91
Espanha	13	< 5	> 95
Holanda	11	90	10
Bélgica	7	87	13
Portugal	3	< 5	> 95
Dinamarca	3	81	19
Suécia	2	21	79
Finlândia	1	45	55

Fonte: EC, 2000

Conscientes da problemática da geração de resíduos, é indispensável à procura de novas alternativas na produção de novos produtos e na disposição final desses materiais para potencializar seu reaproveitamento.

## **2.3 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS RECICLADOS FINOS**

Como todo agregado natural, os agregados reciclados necessitam também serem avaliados antes da utilização em concretos ou argamassas, em termos da distribuição granulométrica, absorção de água, abrasão, etc. Tais propriedades, avaliadas por diversos pesquisadores, são apresentadas.

### **2.3.1 Distribuição granulométrica**

A composição granulométrica dos agregados reciclados deve atender as mesmas exigências do que os agregados naturais. É uma propriedade muito importante devido a que podem influenciar na trabalhabilidade, resistência mecânica, consumo de aglomerantes, absorção de água, permeabilidade, etc (TOPÇU, 2004).

A composição granulométrica dos agregados reciclados graúdos ou finos, varia conforme o tipo de resíduo processado, os equipamentos utilizados e a dimensão do resíduo antes de ser processado (LIMA, J.A.R., 1999). O autor comenta que a melhor maneira para o uso em concretos e argamassas é o peneiramento do material, buscando obter curvas similares às da areias e britas naturais. Entretanto, este procedimento pode levar a aumento de custo da reciclagem, a dificuldades técnicas e ao desperdício de parcelas do material reciclado.

No estudo de vários pesquisadores (TOLEDO *et al*, 2007; DEBIEB & KENAI, 2007), as distribuições granulométricas apresentaram-se satisfatórias para sua utilização em concretos. No estudo de MIRANDA, L.F.R.; SELMO, S.M.S. (2006), identificaram que os agregados reciclados provenientes de blocos de concreto, apresentam uma composição granulométrica mais contínua, em relação aos agregados de alvenaria, sendo considerado adequada para utilização em argamassas.

### **2.3.2 Teor de finos**

O teor de partículas finas nas misturas de concreto pode influenciar bastante na quantidade de água de amassamento necessária, o que pode provocar diminuição da resistência mecânica do concreto produzido. Além disso, estas partículas podem reduzir a resistência ao desgaste do concreto, principalmente por abrasão (NEVILLE, 1997; MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Foi observado em algumas usinas brasileiras que os agregados miúdos reciclados estão compostos de uma parcela significativa da fração fina inferior a 75 $\mu$ m. Isso pode prejudicar a qualidade dos agregados reciclados, tanto pela presença de argilominerais, assim como, pela demanda maior do consumo de água nos concretos. Em um estudo realizado em uma usina nacional, os teores de finos em agregados miúdos atingiram até 30% da massa total (MIRANDA, L.F.R., 2000).

MIRANDA, L.F.R. & SELMO, S.M.S. (2006) comentam que teores elevados de finos inferiores a 75 $\mu$ m, tanto no agregado quanto na dosagem das argamassas, podem trazer conseqüências no seu desempenho, tais como problemas de fissuração, diminuição da aderência, etc.

### **2.3.3 Especificações dos agregados reciclados segundo as normas internacionais**

Os agregados reciclados de construção e demolição apresentam algumas especificações e classificação de acordo com a sua composição.

O RILEM (1994) propõe a classificação de agregados graúdos reciclados em 3 categorias:

- Tipo I: agregados originados de resíduos de alvenaria;
- Tipo II: agregados originados de resíduos de concreto;
- Tipo III: agregados constituídos de uma mescla de agregados reciclados e naturais.

De acordo com a recomendação alemã DIN 4226-100 (2002), agregados reciclados, os tipos de materiais são classificados de acordo com a composição desses agregados. Os tipos de agregados reciclados são:

- Tipo I: gráudo de concreto/areia de concreto;
- Tipo II: gráudo de construção/areia de construção;
- Tipo III: gráudo de alvenaria/areia de alvenaria;
- Tipo IV: gráudo de mistura/areia de mistura.

Para aplicações em concretos, os agregados reciclados devem seguir algumas recomendações de acordo com as normas. Os limites recomendados pela RILEM (1994) estão apresentados nas tabelas 5 e 6.

Tabela 5 – Recomendações para agregados gráudos reciclados (RILEM, 1994)

<b>Solicitações necessárias</b>	<b>Tipo I</b>	<b>Tipo II</b>	<b>Tipo III</b>
Densidade partícula seca ( $\text{kg/m}^3$ )	$\geq 1500$	$\geq 2000$	$\geq 2400$
Absorção de água (%)	$\leq 20$	$\leq 10$	$\leq 3$
Quantidade de material com massa específica (SSS) $< 2200 \text{kg/m}^3$ (%)	-	$\leq 10$	$\leq 10$
Quantidade de material com massa específica (SSS) $< 1800 \text{kg/m}^3$ (%)	$\leq 10$	$\leq 1$	$\leq 1$
Quantidade de material com massa específica (SSS) $< 1000 \text{kg/m}^3$ (%)	$\leq 1$	$\leq 0,5$	$\leq 0,5$
Quantidade de impurezas (metais, vidro, material mole, material betuminoso) (%)	$\leq 5$	$\leq 1$	$\leq 1$
Quantidade de metais (%)	$\leq 1$	$\leq 1$	$\leq 1$
Quantidade de matéria orgânica (%)	$\leq 1$	$\leq 0,5$	$\leq 0,5$
Quantidade de finos ( $< 0,080 \text{mm}$ ) (%)	$\leq 3$	$\leq 2$	$\leq 2$
Quantidade de areia ( $< 4 \text{mm}$ ) (%)	$\leq 5$	$\leq 5$	$\leq 5$
Quantidade de sulfato (%m/m) BS 812, parte 118	$\leq 1$	$\leq 1$	$\leq 1$

Tabela 6 – Recomendações para concretos com agregados reciclados (RILEM, 1994)

<b>Solicitações necessárias</b>	<b>Tipo I</b>	<b>Tipo II</b>	<b>Tipo III</b>
Quantidade de agregado reciclado $> 4 \text{mm}$ (%)	Até 100%		
Quantidade de areia reciclada $< 4 \text{mm}$	Não recomendado		
Resistência à compressão máxima (MPa)	16/20	50/60	s/ limite
Resistência à tração máxima (MPa)	1	1	1

As tabelas 7 e 8 apresentam as limitações impostas pela DIN 4226-100 (2002) para os agregados reciclados e concretos com agregado reciclado.

Tabela 7 – Recomendações para agregados reciclados (DIN 4226-100, 2002)

Elementos		Composição do material, % em massa			
		Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV
Quantidade de agregados de concreto e naturais de acordo com a DIN 4226-1		≥ 90	≥ 70	≤ 20	≥ 80
Clínquer, tijolo sem poros		≤ 10	≤ 30	≥ 80	
Areia proveniente de rocha calcária				≤ 5	
Outras quantidades de minerais <sup>a</sup>		≤ 2	≤ 3	≤ 5	≤ 20
Outros teores	Asfalto	≤ 1	≤ 1	≤ 1	
	Mineral <sup>b</sup>	≤ 2	≤ 2	≤ 2	
	Sem mineral <sup>c</sup>	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 1
Densidade das partículas no estado seco (kg/m <sup>3</sup> )		≥ 2000	≥ 2000	≥ 1800	≥ 1500
Desvio padrão máximo (kg/m <sup>3</sup> )		± 150			s/ limite
Absorção máxima após 10 minutos (%)		10	15	20	s/ limite

<sup>a</sup> Teores de outros minerais como, por exemplo: tijolos com poros, concreto leve, concreto poroso, concreto poroso obtido de entulho, estuque,...

<sup>b</sup> teores extras de minerais são, por exemplo: vidro, cerâmica, metais,...

<sup>c</sup> teores extras de não minerais são, por exemplo: borracha, matéria plástica artificial, madeira, vegetação, papel, outros.

Tabela 8 – Recomendações para concretos com agregados reciclados (DIN 4226-100, 2002)

Solicitações necessárias	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV
Quantidade de agregado reciclado > 2mm (% dm <sup>3</sup> /dm <sup>3</sup> )	Até 45%		Não recomendado para concreto estrutural	
Quantidade de areia reciclada < 2mm	Não recomendado			
Máximo nível de resistência	Até C 30/37			
Projeto	De acordo com a DIN 1045 EN 206-1			

### 2.3.4 Composição química dos agregados reciclados

LIMBACHIYA, M.C.; MARROCCHINO, E, KOULOURIS, A. (2007) avaliaram as características químicas e mineralógicas dos agregados reciclados e seu desempenho em concretos. Os autores ressaltaram a influência de 30%, 50% e 100% de agregado reciclado graúdo na composição química do concreto. O estudo foi empreendido para estudar a fração de tamanho 16-4mm de concretos reciclados e agregados naturais, e areia natural de dimensão inferior a 4mm.

A composição de RCD foi determinada de acordo com BS 8500 e os resultados obtidos se encontravam dentro dos limites especificados pela norma. As técnicas de análise foram à utilização de espectrometria de dispersão de raios-X (EDX) e técnicas de difratometria de

raios-X (DRX) para estabelecer a composição química, assim como, a mineralógica. Elementos principais ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , em % de massa) e o **Pb**, **Zn**, **Ni**, **Co**, **Cr**, **V** (em ppm) foram determinados. As proporções dos elementos químicos determinados pelo XRF dos agregados reciclados e naturais, obtido de três fontes diferentes, são dados na tabela 9.

Tabela 9 – Composição química dos constituintes identificados pelo XRF

Principais Constituintes (mg/l)						
	PC	Agregado Graúdo				Areia Natural
		Natural	RCA 1	RCA 2	RCA 3	
$\text{SiO}_2$	20,60	97,03	65,37	68,43	63,61	88,54
$\text{TiO}_2$	0,22	0,01	0,22	0,39	0,17	0,05
$\text{Al}_2\text{O}_3$	5,47	0,34	5,33	5,49	3,57	1,21
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	3,31	0,10	2,16	2,40	2,03	0,76
$\text{MnO}$	0,06	0,00	0,05	0,05	0,06	0,02
$\text{MgO}$	2,26	0,65	1,91	2,84	2,62	0,42
$\text{CaO}$	62,50	0,26	13,93	11,19	16,86	5,33
$\text{Na}_2\text{O}$	0,65	0,16	1,19	0,94	0,87	0,33
$\text{K}_2\text{O}$	1,71	0,01	0,61	0,62	0,51	0,31
$\text{P}_2\text{O}_3$	0,21	0,02	0,11	0,10	0,49	0,08
LOI	1,64	1,41	9,12	7,56	9,19	2,95
Total	100	100	100	100	100	100
Pb <sup>a</sup>	19	-	50	47	30	6
Zn <sup>a</sup>	53	-	31	29	37	4
Ni	21	-	-	9	10	2
Co	-	418	55	111	-	-
Total Cr	42	8	21	29	52	5
V	134	5	42	62	47	15
Th	-	2	2	1	1	2
S	59,69	-	2879	1698	2964	360

Óxidos representados em %, elementos representados em ppm

<sup>a</sup> Análise semi-quantitativa

Fonte: Limbachiya *et al.*, (2007)

A análise química dos dados obtidos para ensaios dos agregados reciclados (Fig 1) mostra uma predominância dos picos de  $\text{SiO}_2$ , seguido pelo Feldspato e por picos menores de  $\text{CaCO}_3$ . A única distinção mineralógica entre amostras de agregados reciclados foi identificada no RCA 3, com os picos menores de muscovita/ilita, indicando a presença de teores baixos nos tijolos/cerâmica. Segundo os autores, isto é relacionado ao processo de reciclagem no estágio de remoção dos tijolos e de outros materiais cerâmicos presentes no resíduo de construção.





### 2.3.5 Absorção dos agregados reciclados

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.

Os valores de absorção do agregado reciclado dependem do tipo e forma de obtenção dos agregados. De acordo com TAM *et al*, (2006) normalmente, o agregado reciclado apresenta maior absorção do que o agregado natural. A absorção de água encontra-se aproximadamente entre 3 e 10 % para o agregado reciclado e menos de 1 até 5 % para os agregados naturais. Esses valores de absorção podem variar de acordo com o tipo de agregado utilizado e o tempo de ensaio da absorção dos agregados.

Vários autores admitem a elevada taxa de absorção dos agregados reciclados e afirmam que isto se deve à camada de argamassa antiga aderida às partículas no caso do agregado reciclado graúdo (LEVY, 1997; ZORDAN, 1997; BAZUCO, 1999, BANTHIA & CHAN, 2000).

DEVENNY & KHALAF (1999) encontraram valores de taxa de absorção de agregados de tijolos cerâmicos britados variando 5 a 15% em relação à massa do material seco. Os pesquisadores avaliaram quatro tipos de tijolos diferentes em relação à resistência à compressão e concluíram que seria necessário compensar a absorção de água do material reciclado, deixando imerso por um período de 30 minutos antes da mistura de concreto. A imersão em água dos agregados reciclados por 30 minutos, causou uma redução de apenas 2% na resistência à compressão em relação aos agregados reciclados imersos por 24 horas.

No estudo realizado por KHATIB (2005) com concretos com agregado reciclado fino, o valor da absorção foi de 6,2% para agregados cerâmicos e 14,8% para os agregados provenientes de concretos. Para os agregados naturais o valor da absorção foi de 0,8%.

No Brasil, a norma que regulamenta o ensaio de absorção de água, na condição saturada superfície seca (SSS) de agregados miúdos, é a NM 30 (2001). A norma adota o tempo de saturação de agregados durante 24 horas e posterior secagem ao ar. Muitos autores criticam o tempo e o método de determinação da absorção para os agregados reciclados, onde consideram que o tempo deveria ser maior.

TAM, V.W.Y.; GAO, X.F.; TAM, C.M.; CHAN, C.H. (2006) propuseram um método inovador para a medida da absorção de água para agregados reciclados. Os autores discutem a proposta atual da norma da BSI para agregados comuns, que poderia obter resultados não

confiáveis para agregados reciclados. A diferença da nova metodologia adotada é que fornece uma maneira mais fácil de obter a absorção de água em intervalos diferentes de tempo e sem a necessidade de molhagem e secagem do agregado reciclado, assim dando um resultado mais confiável. Os autores concluíram que um tempo de 96 e 120h de imersão em água são requeridas para o agregado reciclado e 24h de imersão em água para o agregado natural.

### **2.3.6 Resistência Mecânica e resistência à abrasão**

A porosidade elevada dos agregados reciclados pode principalmente ser atribuída ao resíduo de argamassa que adere ao agregado original. Isto, de fato afeta também a trabalhabilidade e outras propriedades da mistura de concreto e argamassa.

Como a resistência mecânica de um material diminui exponencialmente com o aumento da porosidade (MEHTA; MONTEIRO, 1994), é de se esperar que diferentes lotes desses agregados resultem em concretos com grande variação de propriedades mecânicas, o que reduz a atratividade desses agregados e implica aumento da resistência de dosagem e consumo de cimento do concreto. A variação da porosidade também vai afetar o comportamento no estado fresco do concreto, confeccionado com esses agregados (ANGULO, 2005; POON, C.S.; KOU, S.C.; LAM, L., 2006).

Cabe ressaltar que a resistência do agregado reciclado não será a mesma do que o material que o originou. Isto é devido a que o agregado passou pelo processo de britagem, causando o aparecimento de fissuras no agregado. A resistência à abrasão Los Angeles é uma propriedade que interessa unicamente para os agregados reciclados graúdos. O ensaio oferece um indicativo da qualidade do material a ser utilizado na produção do concreto. Com o mesmo se determina a resistência à fragmentação por choque e atrito das partículas de agregado graúdo.

De acordo com HANSEN & NARUD (1983) *apud* LEVY (1997) os valores de abrasão Los Angeles são de 20% a 50% maiores para os agregados reciclados em relação aos agregados naturais. Esses valores são bastante similares ao estudo realizado por BAZUCO (1999) que encontrou uma perda por abrasão de 44,5% para os agregados reciclados.

A Norma Brasileira NBR NM 51 (2001) estabelece um limite de 50% de perda por abrasão em massa para os agregados utilizados em concreto. Os valores encontrados na bibliografia satisfazem as prescrições da norma, mas encontram-se muito próximo desse limite.

### 2.3.7 Massa Específica

A massa específica dos agregados reciclados é comumente menor à dos agregados naturais. Isto é devido principalmente à argamassa aderida às partículas, que possui uma massa específica menor do que o agregado.

BAZUCO (1999) observou que os valores de massa específica dos reciclados são de 5 a 10% menores que os valores apresentados pelos agregados naturais. Cabe ressaltar que, os valores de massa específica podem variar um pouco, de acordo com a origem e a granulometria do material.

Conforme HANSEN (1992) *apud* LEITE (2001), os valores de massa específica de agregados originários de concreto oscilam entre 2,12 kg/dm<sup>3</sup> a 2,70 kg/dm<sup>3</sup>, dependendo dos agregados originais utilizados.

No estudo realizado por CARNEIRO *et al*, (2000) de caracterização do agregado miúdo e gráudo reciclado, a massa específica dos agregados foi da ordem de 2,59 kg/dm<sup>3</sup> e 2,19 kg/dm<sup>3</sup>, respectivamente. Enquanto a massa unitária foi de 1,30 e 1,07 kg/dm<sup>3</sup> para o agregado miúdo e gráudo, respectivamente. Já para KHATIB (2005), os valores de massa específica foram 2,05 kg/dm<sup>3</sup> para os agregados reciclados miúdos com cerâmica triturada e 2,34 kg/dm<sup>3</sup> para os agregados miúdos reciclados provenientes da moagem de concretos.

As variações nos valores das massas específicas entre os agregados reciclados miúdos e o agregado miúdo natural podem trazer conseqüências na dosagem do concreto ou argamassa. 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 (LEITE, 2001).

### 2.3.8 Textura superficial e forma dos grãos

Os agregados reciclados possuem uma superfície bastante porosa e rugosidade bastante elevada em comparação aos agregados naturais. HAMASSAKI *et al*, (1996) *apud* BAZUCCO (2001) classificam a superfície dos agregados naturais como praticamente polida e a superfície dos agregados reciclados como áspera e muito áspera. Isto é conseqüência novamente da argamassa aderida ao agregado original.

O tipo e o nível de britagem utilizado é outro fator que influencia em grande escala na textura do agregado reciclado utilizado na confecção de concretos e argamassas, assim como na forma dos agregados reciclados, que tendem a ser um pouco mais angular do que os agregados naturais (ZORDAN, 1997).

De acordo com NEVILLE (1997), a forma das partículas exerce uma influência muito grande na produção de concretos, principalmente sobre a trabalhabilidade, compacidade, ângulo de atrito interno e quantidade da água de amassamento necessária à mistura. Isto é devido a que depois de britados, os agregados tendem a apresentar uma relação superfície/volume maior em relação a dos agregados naturais, causando assim um maior consumo de argamassa para melhorar a trabalhabilidade.

## 2.4 CINÉTICA DA HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

Para o entendimento da hidratação do cimento Portland, é necessário conhecer seu processo de fabricação, sua composição química e mineralógica, sua estrutura cristalina e a reatividade dos seus compostos constituintes como silicatos e aluminatos de cálcio.

A composição química dos elementos presentes nos cimentos Portland industriais é formada geralmente por  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  e  $C_4AF$ . De acordo com MEHTA & MONTEIRO (1994) isto não é bem verdade, devido que em altas temperaturas, que prevalecem durante a formação do clínquer, existem outros elementos presentes no sistema, tais como magnésio, sódio, potássio e enxofre. Esses elementos possuem a capacidade de entrar em soluções sólidas com cada um dos principais compostos do clínquer.

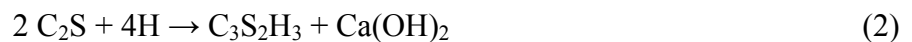
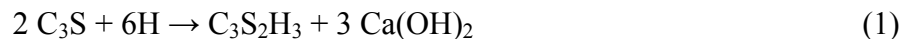
O silicato tricálcico ( $C_3S$ ) e o beta – silicato dicálcico ( $\beta-C_2S$ ) são os dois silicatos hidráulicos comumente encontrados nos clínqueres de cimento Portland industriais. São conhecidas geralmente como alita e belita. Analogamente, a estrutura da belita é irregular, mas os vazios intersticiais formados são muito menores do que no  $C_3S$  e isto torna a belita muito menos reativa do que a alita. Os silicatos têm um importante papel na determinação das características do desenvolvimento da resistência (TAYLOR, 1970).

De acordo com NEVILLE (1997), foram propostos dois mecanismos de hidratação do cimento portland. A hidratação por dissolução de compostos anidros em seus constituintes iônicos, formação de hidratos na solução e, devido à sua baixa solubilidade, uma eventual precipitação de hidratos provenientes da solução supersaturada. De acordo com outro mecanismo, denominado *topoquímico ou hidratação no estado sólido* do cimento, as reações ocorrem diretamente na superfície dos componentes do cimento anidro sem entrarem em

solução. O mecanismo de *dissolução-precipitação* é dominante nos estágios iniciais de hidratação do cimento, assim como, em estágios posteriores.

A hidratação do  $C_3S$  e  $\beta C_2S$  no cimento Portland produz uma família de silicatos de cálcio hidratados estruturalmente similares mas que variam largamente quanto à relação cálcio/sílica e ao teor de água quimicamente combinada.. Embora a reação ocorra e não seja detectável microscopicamente até após muitas semanas, os géis de C-S-H produzidos são do mesmo tipo que aqueles de  $C_3S$  (LEA, 1970).

No caso de hidratação completa, a composição aproximada do material corresponde ao  $C_3S_2H_3$ ; esta composição é então utilizada para cálculos estequiométricos. As reações estequiométricas para pastas completamente hidratadas de  $C_3S$  e  $C_2S$  podem ser expressas como (MEHTA & MONTEIRO, 1994; LEA, 1970; TAYLOR, 1969):



Os cálculos estequiométricos mostram que a hidratação do  $C_3S$  produziria 61% de  $C_3S_2H_3$  e 39% de hidróxido de cálcio, enquanto a hidratação de  $C_2S$  produziria 82% de  $C_3S_2H_3$  e 18% de hidróxido de cálcio.

A reação do  $C_3A$  com a água é imediata. Formam-se rapidamente hidratos cristalinos, tais como  $C_3AH_6$ ,  $C_4AH_9$  e  $C_2AH_8$ , com liberação de uma grande quantidade de calor de hidratação. Dependendo da concentração de sulfato, a hidratação do  $C_4AF$  pode produzir  $C_6A(F)S_3H_{32}$  ou  $C_4A(F)SH_{18}$ , que possuem composições químicas variáveis, porém estruturas similares à etringita e monossulfoaluminato, respectivamente.

Dependendo da concentração do aluminato e dos íons sulfato na solução, o produto cristalino de precipitação é o trissulfoaluminato de cálcio hidratado ou o monossulfoaluminato de cálcio hidratado. A etringita é geralmente o primeiro hidrato a cristalizar-se devido à elevada relação sulfato/aluminato na fase aquosa durante a primeira hora de hidratação. Nos cimentos Portland normalmente retardados que contêm 5 a 6% de gipsita, a precipitação da etringita contribui para o enrijecimento (perda de consistência), para a pega (solidificação da pasta), e desenvolvimento da resistência inicial. Mais tarde, depois do sulfato da solução ter sido consumido, quando a concentração de aluminatos se eleva novamente devido à renovação da hidratação do  $C_3A$  e do  $C_4AF$ , a etringita torna-se instável e é gradativamente convertida em monossulfato.

Há certa evidência de que a hidratação do  $C_3A$  é retardada pelo  $Ca(OH)_2$  liberado pela hidrólise do  $C_3S$ . Isso se deve ao fato de que o  $Ca(OH)_2$  reage com o  $C_3A$  para formar  $C_4AH_{19}$ , que forma uma camada protetora na superfície de grãos não hidratados de  $C_3A$ . Também é possível que o  $Ca(OH)_2$  diminua a concentração de íons de aluminato na solução reduzindo, assim, a velocidade de hidratação do  $C_3A$  (NEVILLE, 1997).

## 2.5 INFLUÊNCIA DA PRESENÇA DE METAIS PESADOS NOS AGREGADOS RECICLADOS

Diversos pesquisadores identificaram a presença de metais pesados nos agregados reciclados, principalmente em agregados miúdos (LIMBACHIYA, M.C.; MARROCCHINO, E, KOULOURIS, A., 2007; SCHAEFER, C.O., 2007). A presença de metais pesados quando incorporados em materiais cimentícios podem afetar suas propriedades no estado fresco e a durabilidade.

O efeito da presença de zinco foi estudado por diversos autores. ARLIGUIE e GRANDEST (1990) relatam que uma camada amorfa de  $Zn(OH)_2$  é formada durante a hidratação da fase de  $C_3S$  na presença de **Zn**, assim retardando a hidratação deste composto. Os mesmos resultados foram obtidos por outros autores (OLMO, I.F.; CHACON, E.; IRABIEN, A. (2001); TASHIRO, C. OBA, J.; AKAWA, K. (1979)).

NOCURI-WCZELIK e MALOLEPSZY (1995) relataram que os produtos de hidratação comuns são formados durante a hidratação do  $C_3A$  na presença de **PbO** e que retarda a hidratação imediatamente depois da adição de água, mas é acelerada poucos minutos depois.

TASHIRO, C.; OBA, J. (1979) estudaram a influência do  $Cr_2O_3$  na hidratação e na resistência à compressão da fase hidratada de  $C_3A$ ; em pastas que contêm 1 a 5% de  $Cr_2O_3$ . MOLLAH, M.Y.A., TSAI, Y.N., HESS, T.R., COCKE, L., FTIR (1992) estudaram a incorporação do nitrato de cromo em cimento Portland tipo V e IP. Os estudos indicam que os compostos de cromo não são formados na superfície do cimento endurecido e que podem substituir a sílica no C-S-H.

STEPHAN, D.; MALLMANN, R.; KNOFEL, D.; HARDTL, R. (1999) estudaram as mudanças nas propriedades de hidratação dos cimentos produzidos com clínquer na presença de **Cr**, **Ni**, e **Zn** comparado aos cimentos comuns. Os autores concluíram que uma concentração de até 1.000 ppm de **Cr**, **Ni**, ou **Zn** não tem nenhuma influência no estágio inicial de hidratação do cimento. Nas amostras com 5.000 ppm de **Ni**, a taxa de hidratação não

mudou comparada à amostra de referência. Em todos os três cimentos diferentes, 2.5% de **Cr** encurtou o período de indução e conseqüentemente a hidratação do cimento foi acelerada. É notável que as amostras com um teor elevado de **Cr** tiveram uma reação de expansão, causada provavelmente pela cal livre no cimento. Já para 2.5% de **Ni**, não houve quase nenhuma mudança no início da hidratação até a taxa máxima de geração do calor. Em todos os cimentos com 2.5% de **Zn**, o período de indução foi alongado e conseqüentemente a hidratação foi atrasada. Entretanto, as curvas de geração de calor foram diferentes. A curva do calor de hidratação para os cimentos com 25000 ppm é apresentada na figura 3.

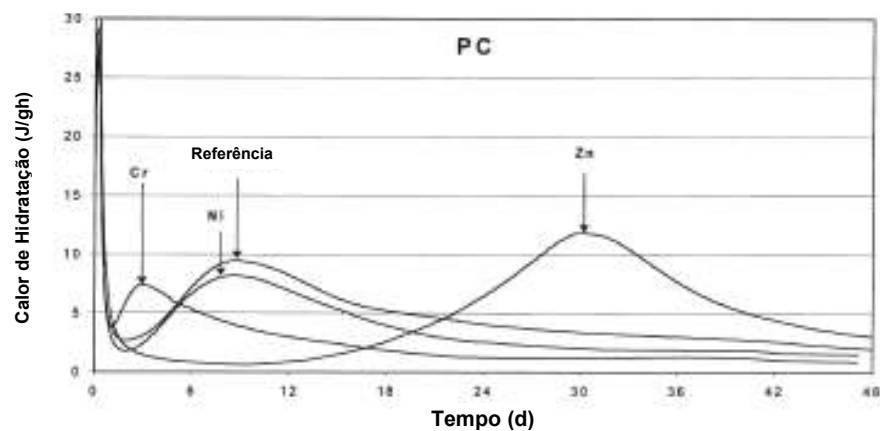


Figura 3 – Evolução do calor de hidratação do cimento com 25000 ppm de metais pesados (Stephan *et al*, 1999)

A evolução da resistência à compressão do cimento com teores de 25000 ppm de metais pesado é apresentada na figura 4.

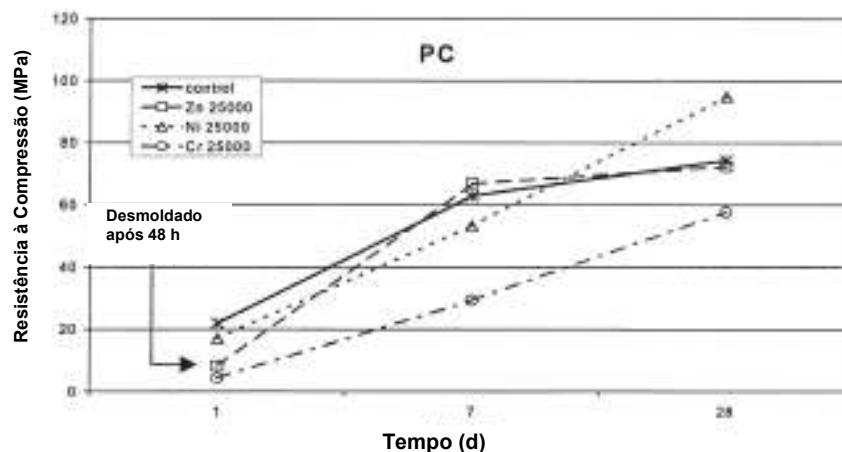


Figura 4 – Evolução da resistência à compressão do cimento com metais pesados (Stephan *et al*, 1999)

Aos 7 e 28 dias as amostras com 25.000 ppm de **Cr** apresentaram uma resistência mais baixa. Isto foi devido ao índice baixo de alita e ao teor muito elevado de cal livre e belita, causando aumento da resistência muito lenta e expansões. Em idades adiantadas, os cimentos com 25.000 ppm de **Zn** obtiveram resistência mais elevada. Já para o **Cr** com 5.000 ppm de **Cr**, em todas as idades a resistência foi mais baixa do que a referência. Os ensaios com cimento portland com 1.000 ppm de **Cr**, **Ni**, ou **Zn** mostraram que os metais pesados nesta concentração não têm nenhuma influência na resistência.

## **2.6 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS COM AGREGADO MIÚDO RECICLADO NO ESTADO FRESCO**

As diferentes características dos agregados reciclados em relação aos agregados naturais conferem aos concretos, mudanças nas suas propriedades em comparação ao concreto convencional. Diversos estudos apontam a dificuldade do uso dos agregados miúdos reciclados, devido a sua elevada absorção e alto teor de finos, produzindo concretos menos trabalháveis. Segundo BARRA (1997), existe a necessidade de se utilizar um sistema de dosagem especial para produção de concretos com agregados reciclados finos, capaz de tentar amenizar os problemas devido as características distintas do agregado reciclado. A seguir serão apresentadas as propriedades dos concretos no estado fresco, de acordo com a literatura, utilizando agregados reciclados de construção e demolição.

### **2.6.1 Trabalhabilidade**

De acordo com VRIES (1996) *apud* BAZUCO (1999), além do fator da forma e absorção dos agregados reciclados, a textura também influencia na trabalhabilidade. Como o agregado reciclado é mais rugoso, a fricção interna tende a aumentar, requerendo mais argamassa para se manter a trabalhabilidade destes concretos nos mesmos patamares de concretos convencionais com traços semelhantes.

A trabalhabilidade do concreto com agregado reciclado para teores de água iguais é mais baixa como relatado por muitos pesquisadores, especialmente quando os níveis de substituição excedem 50% (TOPÇU, I.B.; SENDEL, S., 2004).

HANSEN (1992) *apud* BAZUCO (1999) afirma que, para se manter a coesão e trabalhabilidade do concreto fresco, é necessário que haja de 25% a 40% em massa de agregado miúdo em relação ao agregado total existente, dependendo do tipo de areia e módulo



de finura, relação água/cimento e dimensão máxima dos grãos.

Uma das soluções proposta por POON, C.S.; KOU, S.C., LAM, L. (2004) a fim melhorar a trabalhabilidade, é de mudar a condição de umidade do agregado reciclado antes da mistura. A dosagem com agregado reciclado úmido diminuiria o efeito da absorção dos agregados e tornaria o concreto mais trabalhável.

No estudo realizado por KHATIB (2005), sobre a utilização de agregados reciclados finos, verificou-se que houve um aumento do abatimento obtido no abatimento do tronco de cone - *Slump Test* - para agregados miúdos de concreto e uma diminuição do abatimento para agregados finos cerâmicos, relação a uma mistura de referência com agregado miúdo natural. Os teores de substituição analisados foram 0%, 25%, 50%, 75% e 100%, onde a evolução do *slump* é apresentado na figura 5.

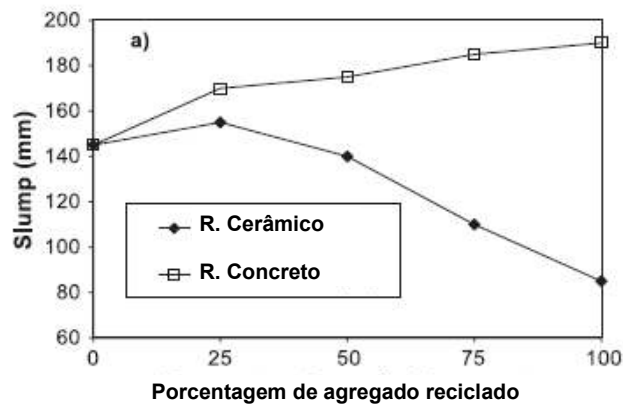


Figura 5 – Efeito dos agregados reciclados no abatimento do concreto (Khatib, 2005)

De acordo com as recomendações da RILEM (1994) *apud* RAO (2007), para que uma mistura de agregado reciclado consiga o mesmo abatimento, o índice de água livre deverá ser aproximadamente 5% maior do que para o concreto convencional. CORREIA (2006) 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.

A perda de trabalhabilidade pode ser considerada como a perda de fluidez do concreto fresco, devido ao enrijecimento gradual e alteração da pega da pasta de cimento Portland hidratado, associado aos produtos de hidratação como etringita e silicato de cálcio hidratado (MEHTA & MONTEIRO, 1994). 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.

No estudo realizado por POON, C.S.; KOU, S.C.; LAM, L. (2006) sobre a influência dos

agregados reciclados na consistência e perda da fluidez dos concretos, os autores realizaram medidas da consistência em cada 15 minutos após a mistura. Concluíram que grande parte da consistência é perdida na primeira hora após a mistura, onde os agregados reciclados apresentaram uma perda maior em relação aos agregados naturais.

### **2.6.2 Massa Específica**

A massa específica dos concretos também é influenciada pela substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado, da mesma maneira para os agregados graúdos reciclados. POON, C.S; CHAN, D. (2006) verificaram uma diminuição gradual da massa específica do concreto conforme o teor de substituição de agregados naturais.

No estudo realizado por BRITO (2005) com agregados graúdos reciclados, a massa específica dos concretos variou de  $2349\text{kg/m}^3$  para a mistura de referência a  $2123\text{kg/m}^3$  para a mistura com 100% de substituição.

Esses valores são parecidos com os valores de massa específica estudado por KATZ (2003). O autor comenta que a densidade da maioria dos concretos frescos feitos com agregados naturais encontra-se na escala de  $2400\text{kg/m}^3$ , visto que o concreto feito com agregados reciclados é significativamente menor, aproximadamente  $2150\text{kg/m}^3$ .

### **2.6.3 Retração Plástica**

NEVILLE (1997) explica que quando a água se desloca para fora de um corpo poroso não totalmente rígido, verifica-se uma variação dimensional. No concreto geralmente ocorre esse tipo de deslocamento de água desde o estado fresco até idades mais avançadas.

MEHTA & MONTEIRO (1994) comentam que uma variedade de causas contribui para a retração plástica do concreto: por exemplo, exsudação ou sedimentação, absorção de água pelo lastro ou agregado, rápida perda de água por evaporação, etc.

RAVINA (1986) *apud* ANDRADE (2004) comenta que a retração plástica faz parte de um fenômeno que inclui três estágios. No primeiro estágio a exsudação excede a evaporação e a superfície mantém saturada. O segundo estágio caracteriza-se pela evaporação de dentro da mistura, aumentando a retração linearmente com o tempo, devido principalmente à evaporação. No terceiro estágio, a mistura já apresenta certa rigidez devido à hidratação do cimento e perda de água, diminuindo consideravelmente a retração da mistura.

WITTMAN (1976) *apud* COHEN *et al*, (1990) comenta que a formação de uma alta tensão capilar pela água de amassamento é um dos principais fatores na retração plástica. O início da

pressão capilar gera uma pressão negativa suficiente para causar contrações horizontais e verticais. As deformações sofridas aumentam com a taxa de crescimento da pressão capilar até que o limite de pressão é alcançado. Após este ponto os níveis de deformação cessam.

ALMUSALLAM (2001) avaliou as propriedades do estado fresco dos concretos em amostras de dimensões 915x915x51mm, medindo as deformações com 4 LVDTs. Os efeitos das condições de exposição das amostras foram avaliados segundo a taxa de evaporação, tempo de fissuração, área fissurada e retração plástica. Concluiu que as deformações do concreto aumentam linearmente até o tempo de 6 a 10 horas.

BAGHABRA, O.S. *et al*, (2004) avaliaram a retração plástica dos concretos com a adição de sílica ativa em substituição ao cimento em varias proporções de 5%, 7,5% e 10% . O concreto foi moldado em placas de 1,00 x 1,00m e monitorado de 6h até 24h usando LVDTs conectados a um sistema de aquisição de dados. As leituras eram realizadas a cada 30 minutos e a área de fissuração das amostras foi monitorada visualmente. As amostras foram analisadas em ambientes de 45°C, UR de 35% e velocidade de vento de 15km/h. O esquema de ensaio utilizado é apresentado na figura 6.

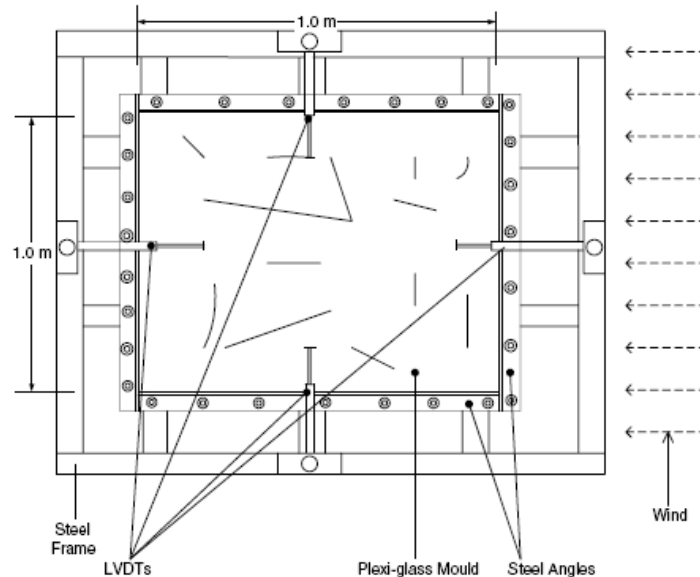


Figura 6 – Aparato de ensaio de retração plástica (Baghabra *et al*, 2004)

A retração plástica dos concretos analisados com sílica ativa foi maior em relação aos concretos com cimento Portland comum utilizado como referência. Verificou-se também que a retração também aumenta com o aumento do teor de sílica ativa no concreto e a fissuração dos concretos de referência foi menor em relação aos concretos com sílica.

Os autores concluíram que a finura da sílica, representada pela sua elevada superfície específica e densidade, são bons indicadores para avaliar o seu potencial de retração plástica do concreto.

#### 2.6.4 Calorimetria

Quando um cimento é hidratado, os compostos reagem com a água para atingir estados estáveis de baixa energia, e o processo é acompanhado pela liberação de energia na forma de calor, ou seja, a hidratação dos compostos do cimento é exotérmica.

NEVILLE (1997) comenta que para efeitos práticos, não é necessariamente a quantidade de total de calor de hidratação que preocupa, mas sim, a velocidade com que esse calor se desprende.

Estudos mostraram que existem três picos na velocidade de hidratação aproximadamente nos primeiros três dias, desde que o cimento tenha entrado em contato com a água (TAYLOR, 1969; LEA, 1970). A figura 7 mostra a curva típica de velocidade de desprendimento de calor em função do tempo.

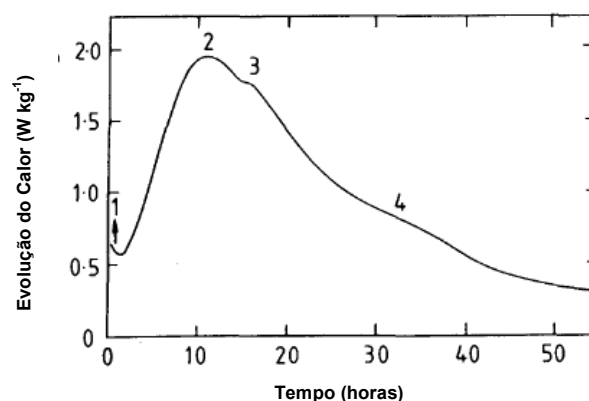


Figura 7 – Taxa de evolução de calor para cimento Portland comum (Taylor, 1969)

De acordo com TAYLOR (1969), o processo pode ser dividido em cinco estágios, tais como, períodos iniciais de reação, indução, aceleração e desaceleração e o período final de reação lenta. Pode-se notar que o primeiro pico, que é muito alto, corresponde à hidratação inicial na superfície das partículas, envolvendo principalmente o  $C_3A$ . Este período de grande velocidade de hidratação é muito curto e seguido de um período denominado período dormente, período de latência ou período de indução, durante o qual a velocidade é bem pequena.

De acordo com LEA (1970), a liberação inicial rápida de hidróxido de cálcio para a solução deixa uma camada externa de silicato de cálcio hidratado com cerca de 10  $\mu\text{m}$  de espessura.

Esta camada dificulta a hidratação subsequente, de modo que por algum tempo, a hidratação fica muito lenta. Eventualmente, a camada superficial se rompe, possivelmente devido a um mecanismo ou pelo crescimento dos cristais de hidróxido de cálcio. A velocidade de hidratação aumenta um pouco e lentamente os produtos de hidratação dos grãos individuais entram em contato entre si; então ocorre a pega.

A velocidade de desprendimento de calor atinge um segundo pico, tipicamente a cerca de 10h, mas, algumas vezes, até às 4h de idade. Após este pico, a velocidade de hidratação é reduzida durante um período longo, sendo a difusão através dos poros o fator que a controla. O terceiro pico encontrado com alguns cimentos ocorre, de acordo com LERCH *apud* LEA (1970), se todo o gesso combinar quando algum  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  ainda disponível para a reação  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  ou dos álcalis, no cimento. TAYLOR (1969) comenta que esse fenômeno está associado freqüentemente com a conversão da fase AFt para a AFm, ou seja, com a formação renovada da etringita.

De acordo com MEHTA & MONTEIRO (1994), para um cimento Portland, aproximadamente 50% do calor potencial é liberado durante os 3 primeiros dias e 90% nos 3 primeiros meses de hidratação.

Estudos de calorimetria dos concretos ou argamassas com agregados reciclados são praticamente escassos. Por esse motivo foi avaliada a influência da presença de agregados reciclados finos na cinética de hidratação dos concretos confeccionados com estes agregados.

## **2.7 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS com AGREGADO MIÚDO REICLADO NO ESTADO FRESCO**

MIRANDA, L.F.R.; SELMO, S.M.S. (2006) avaliaram o efeito de materiais inferiores à dimensão de  $75\mu\text{m}$  de RCD nas propriedades das argamassas e do desempenho dos revestimentos. Foram estudados três tipos de misturas: a primeira com 55% de cerâmica triturada e 45% de argamassa triturada; a segunda com 100% de argamassa triturada e a terceira com 45% de argamassa triturada e 55% de bloco de concreto triturado. Os teores de finos totais das argamassas dosadas com estes agregados passantes na peneira de abertura  $75\mu\text{m}$  foram de 18%, 25%, 32%. A água total para a relação a/c corrigida para as argamassas foi definida como aquela requerida obtendo um índice da consistência de  $285 \pm 15\text{mm}$ , de acordo com a NBR 7215 (1981). Os autores verificaram que as misturas com resíduo de argamassa apresentaram uma relação a/c maior, em relação às misturas com resíduo cerâmico

e de concreto.

Na avaliação da perda da consistência para as mesmas misturas em argamassas, MIRANDA (2000) observou que houve uma tendência em diminuir ou permanecer constante com o aumento do teor de finos. O autor atribui o efeito aos finos dos entulhos que atuaram como retentores de água, dificultando a sua saída, o que não ocorreu nas argamassas magras com 18% de finos e que, visualmente, apresentaram elevada exsudação. Considera também que uma consistência abaixo de 240mm, a aplicação da argamassa como revestimento ficaria muito dificultada, sendo necessário “reamassá-las” com água, o que no caso da execução de revestimentos, não é operacionalmente adequado.

GONÇALVES, J.P. *et al*, (2007) avaliaram o uso de agregados cerâmicos reciclados na confecção de argamassas. Os autores verificaram que a trabalhabilidade para uma relação a/c igual a 0,5 foi similar para as argamassas com agregado reciclado em relação às argamassas com agregado natural. Para uma relação a/c igual a 0,4 as argamassas com agregado reciclado apresentaram uma redução na trabalhabilidade. A maior diferença na consistência (14%) ocorreu para os agregados triturados com o britador tipo cone. Os agregados triturados no moinho de impacto a diferença foi de 6%.

## **2.8 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS COM AGREGADO MIÚDO RECICLADO NO ESTADO ENDURECIDO**

### **2.8.1 Resistência à Compressão**

NEVILLE (1997) explica que a resistência à compressão é uma das características desejáveis e importantes do concreto em projetos estruturais. MEHTA & MONTEIRO (1994) definem a resistência à compressão como a capacidade de resistir uma carga de compressão sem ruptura. O desempenho de um concreto depende diretamente do desempenho dos materiais utilizados para a sua confecção. Os agregados, como elemento fundamental, possuem influência nas propriedades dos concretos no estado fresco e endurecido.

KHATIB (2005) observou-se uma redução sistemática na resistência à compressão ocorre quando o agregado miúdo é substituído pelo agregado fino de concreto. Esta redução pode alcançar 30% para um teor de substituição de 100%. Um teor de 25% causa uma redução de somente 15% na resistência à compressão com agregados reciclados de concreto. A substituição da areia pelo agregado cerâmico fino, originados de resíduos de tijolos, não causa

redução substancial na resistência em idades avançadas, mesmo em teores elevados. Para uma substituição de até 50%, a resistência é similar àquela da referência, já para 100% de substituição ocorre uma redução de menos de 10%. O desenvolvimento da taxa mais elevada da resistência entre 28 e 90 dias, do concreto contendo cerâmica triturada, é atribuído à reação pozolânica causada pelos teores de sílica e alumina dos agregados cerâmicos com o produto de hidratação do cimento (isto é, Portlandita). A evolução da resistência à compressão das misturas é apresentada na figura 8.

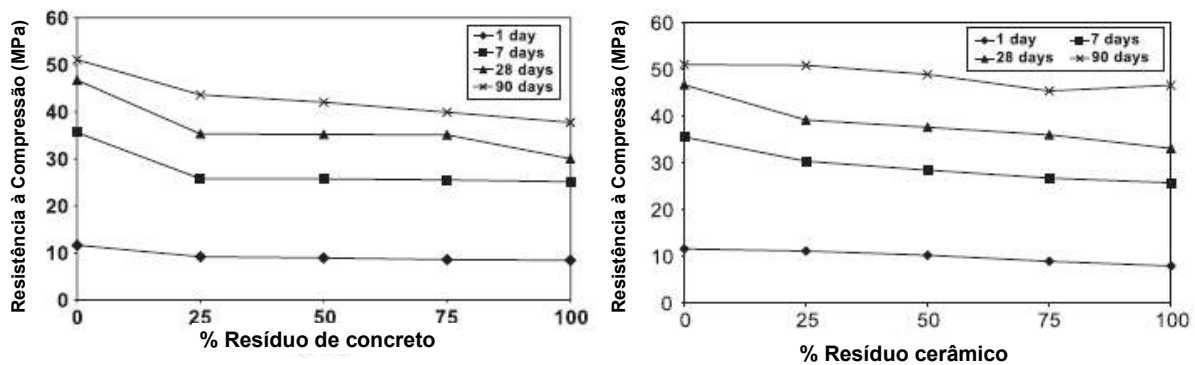


Figura 8 – Evolução da resistência à compressão para agregados de tijolo e telha (Khatib, 2005)

POON, C.S; CHAN, D. (2006) estudaram os efeitos do uso do agregado triturado fino de tijolo e telha como uma substituição de 20% de areia natural nas propriedades do concreto, com uma relação água/cimento (a/c) de 0,55, onde as misturas não foram pré-saturadas previamente. A resistência à compressão das misturas de concreto foi medida aos 3, 7 e 28 dias usando cubos de 100mm que apresentou aos 28 dias uma resistência característica de 45MPa para todas as misturas. Os concretos apresentaram uma redução de 15% na resistência à compressão com a substituição do agregado natural pelo agregado de tijolo e telha, usando o mesmo tipo de mistura.

Na Turquia, BINICI, H. (2006) estudou a aplicação de resíduos industriais cerâmicos como um substituto possível para agregados finos triturados convencionais. As análises foram realizadas aos 7, 28, 90 e 365 dias. O consumo de cimento ( $400 \text{ kg/m}^3$ ) e a relação água/cimento (0.48-0.51) foram mantidos constantes, com uso de aditivos superplastificantes e mistura a seco. Os teores de substituição foram de 40%, 50% e 60%. O autor comenta que a resistência aumenta à medida que o teor de agregado cerâmico aumenta, em consequência disso, a máxima resistência foi obtida com um teor de 60% para todas as idades.

CORREIA, J.R.; BRITO, J.; PEREIRA, A.S. (2006) encontraram uma redução de 45% e 22% para uma substituição de 100% e 22% do agregado graúdo reciclado, respectivamente. O

autor comenta que os dados podem variar muito, de acordo com as propriedades dos agregados que são utilizados para confeccionar os concretos.

SENTHAMARAI, R.M.; MONOHARAN, P.D. (2005) também estudaram a viabilidade da substituição de agregados britados graúdos por agregados reciclados cerâmicos. Seis misturas de concreto com relações água/cimento diferentes (0.35, 0.40, 0.45, 0.50, 0.55 e 0.60) foram utilizados para confecção dos concretos. As condições dos agregados na mistura foram de saturados superfície seca. A resistência à compressão variou de 30 a 51MPa e não foi significativamente diferente do concreto convencional. Já para POON, C.S.; KOU, S.C.; LAM, L. (2006), a resistência à compressão diminui 24% quando 100% de agregado reciclado é usado.

ZACARIA, M.; CABRERA, J.G. (1996) estudaram o desempenho e durabilidade de concretos com agregados reciclados de demolição, com relação água/cimento de 0.55 sem considerar a água absorvida pelos agregados. De acordo com os autores, a resistência relativamente mais baixa na idade inicial para o concreto com agregados de tijolos cerâmico é atribuída aos valores mais elevados de absorção de água destes agregados. Em idades avançadas a diferença na resistência à compressão diminui e em 90 dias de cura, a diferença cai ao redor de 3 a 5MPa para uma resistência de 62 a 64MPa. Vários pesquisadores atribuíram esse fato ao efeito pozolânico da parcela fina do agregado reciclado cerâmico. A ligação entre o agregado e a pasta na mistura feita com o tijolo triturado áspero e angular provavelmente é influenciada pelas propriedades e pela forma da superfície e resulta em uma resistência relativamente mais elevada em idades avançadas.

### **2.8.2 Módulo de Deformação**

Segundo NEVILLE (1997), os dois componentes do concreto, isto é, a pasta de cimento e o agregado, apresentam uma curva tensão-deformação sensivelmente linear. A razão da não linearidade do concreto é a presença de interfaces entre o agregado e a pasta de cimento e o aparecimento de microfissuras nessas interfaces. O autor comenta que o aparecimento de microfissuras significa que a energia acumulada é transformada em energia de superfície das novas faces das fissuras.

No estudo realizado por KHATIB (2005), substituindo os agregados naturais por agregado fino de tijolo e concreto, resultou em uma redução do módulo de elasticidade dinâmico com o aumento do teor de substituição dos agregados. Concretos contendo agregados oriundos da britagem de concretos apresentam um módulo de deformação até 100% maior, comparado



com os aqueles que contêm agregado cerâmico no mesmo nível de substituição. No estudo de SENTHAMARAI, R.M.; MONOHARAN, P.D. (2005), o módulo de elasticidade para os concretos com agregado graúdos reciclado foi reduzido em 2,4%.

No estudo de POON, C.S; CHAN, D. (2006), a redução do módulo de elasticidade do concreto chegou 10% para os concretos com 20% de agregado cerâmico.

## 2.9 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS COM AGREGADO MIÚDO RECICLADO NO ESTADO ENDURECIDO

Para avaliar as propriedades das argamassas no estado endurecido, vários ensaios são realizados por diferentes pesquisadores. Esses ensaios podem ser a resistência à compressão, resistência à tração na flexão, resistência à tração por aderência, fissuração, etc.

### 2.9.1 Resistência à Compressão

A experiência mostra que os revestimentos produzidos com areias naturais ou agregados reciclados de resíduos da construção e de demolição (RCD) poderiam ter uma tendência ao desempenho fraco, devido primeiramente à qualidade variável das areias, a ausência de um método de projeto estabelecido da mistura para argamassas, qualidade do substrato e a técnica da colocação (MIRANDA, L.F.R; SELMO, S.M.S., 2006).

Para avaliar as propriedades das argamassas, os autores realizaram ensaios de resistência à compressão com vários teores de substituição com resíduos cerâmicos, argamassa e concreto. A evolução da resistência à compressão das misturas relação com a a/c efetiva é apresentada na figura 9.

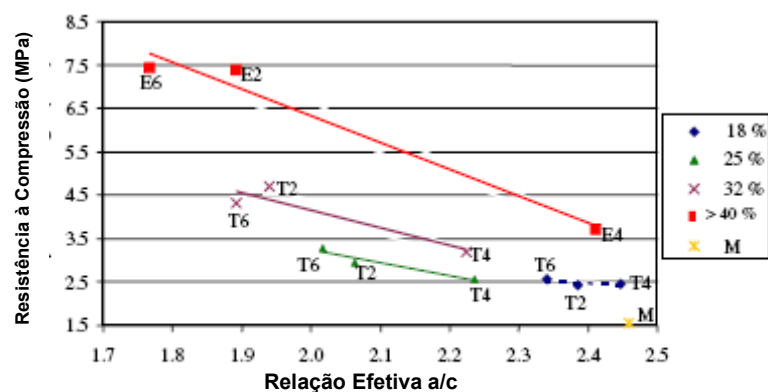


Figura 9 – Resistência à compressão em função da a/c (Miranda & Selmo, 2006)

Os autores chegaram à conclusão que para o mesmo teor de finos, uma variação de  $\pm 0,12$  na relação efetiva da água/cimento (aproximadamente  $\pm 1\%$  na água para materiais secos) não implicou em variação significativa na resistência à compressão, sem levar em conta a composição do RCD. O módulo de elasticidade variou inversamente com a relação a/c necessária para alcançar a consistência desejada da argamassa no estado fresco.

No estudo do envelhecimento acelerado causado pelo tratamento térmico, mostrou uma influência significativa na aparência das fissuras nos revestimentos. Fissuras visíveis ocorreram especialmente nos revestimentos que tiveram um teor mais elevado de partícula fina na sua mistura. É recomendado manter o teor de finos inferiores a  $75\mu\text{m}$  nas misturas tão baixas como possível para obter uma trabalhabilidade boa, onde 25% de substituição poderia ser considerado um valor crítico para a susceptibilidade das fissuras dos revestimentos com constituintes comuns ou alternativos.

TOLEDO, R.D *et al*, (2007) estudaram argamassas com o uso de resíduos cerâmicos triturados. Foram confeccionados argamassas com diferentes teores até 40% de substituição e relações água/cimento de 0,40 e 0,50, respectivamente. As argamassas apresentaram uma redução de 13% e 35% com até 40% de substituição para as duas relações a/c utilizadas. Para o módulo de elasticidade essa diferença foi menor, chegando a 10%.

HAMASSAKI *et al*, (1997) ensaiaram argamassas com 3 (três) tipos de agregado reciclado de diversas composições. Foram moldados corpos-de-prova cilíndricos  $5 \times 10 \text{cm}$  e as misturas apresentaram consistência de  $250 \pm 10 \text{mm}$ . As resistências das argamassas aumentaram com o acréscimo de teor de substituição de resíduos. Aos 7 dias praticamente todas as argamassas com reciclado atingiram resistências à compressão próximas à da argamassa convencional e aos 28 dias as resistências foram superiores em relação à referência.

### 2.9.2 Absorção Capilar

Na análise da cinética de absorção capilar são usualmente empregados os coeficientes de capilaridade e de sorptividade. O coeficiente de capilaridade (k) pode ser determinado através da seguinte relação:

$$H = k \cdot \sqrt{t} \quad (3)$$

onde:

H é altura da mancha capilar (cm);  
t é o tempo (s).

Já o coeficiente de sorptividade (S) é dado através da seguinte relação:

$$X = S \cdot \sqrt{t} \quad (4)$$

onde:

X: é o volume do líquido absorvido por área da seção transversal da amostra (cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup>);

t: é o tempo (min).

No estudo realizado por TOLEDO, R.D. *et al.*, (2007) sobre argamassas com agregado reciclado cerâmico, os resultados da sorptividade indicam que para ambas as séries (a/c=0,40 e 0,50) houve uma redução da sorptividade com o aumento do teor de substituição do material cerâmico. Os autores comentam que tipo de comportamento pode estar relacionado a um refinamento nos poros da estrutura pelo efeito filler e pozolânico do resíduo cerâmico.

## **2.10 ATIVIDADE POZOLÂNICA DO MATERIAL CERÂMICO PRESENTE NOS RESÍDUOS DE RCD**

No Brasil, a composição do resíduo de construção e demolição apresenta uma grande quantidade de materiais de base cimentícia e materiais cerâmicos (ZORDAN, 1997; XAVIER, 2001). Estes materiais, principalmente os materiais cerâmicos, podem apresentar características que contribuam para a melhoria das propriedades mecânicas de concretos e argamassas produzidos com o agregado miúdo reciclado. Neste sentido, observou-se que o material cerâmico finamente moído poderia contribuir com alguma reatividade pozolânica, melhorando o desempenho mecânico dos concretos em idades mais avançadas.

As pozolanas são, por definição, substâncias constituídas de sílica e alumina que em presença de água se combinam com o hidróxido de cálcio e com os diferentes componentes do cimento formando compostos estáveis à água e com propriedades aglomerantes. As pozolanas estão classificadas em naturais: rochas vulcânicas; artificiais: argilas de qualquer tipo; e por fim subprodutos industriais: cinzas volantes, cinza de casca de arroz, sílica ativa, entre outros (MEHTA & MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997).

### **2.10.1 Métodos de avaliação da atividade pozolânica dos finos de RCD**

KIHARA & SHUKUZAWA (1982) *apud* LEITE (2001) comentam que as argilas calcinadas pertencentes ao grupo das pozolanas artificiais podem ser obtidas em qualquer lugar e assim

apresentam alto potencial de utilização para produção de argamassas e concretos. No seu processo de produção, as pozolanas artificiais são obtidas com a criação da instabilidade da estrutura interna dos minerais argilosos pela ação de temperaturas que variam entre 500°C e 900°C. Este procedimento ajuda a aumentar a porosidade das partículas e assim, sua superfície ativa. Entretanto, a temperatura de queima das argilas deve ser inferior à de fusão. LEVY (1997) afirma que os materiais cerâmicos de 2ª linha utilizados na construção civil, são produzidos exatamente com temperaturas de queima que variam dentro desta faixa. Desta forma, podem possuir uma estrutura cristalina tal que apresente certa atividade pozolânica em presença do hidróxido de cálcio e dos demais produtos provenientes da hidratação do cimento Portland quando finamente moídos.

Existem duas teorias sobre a reatividade dos materiais cerâmicos em forma de blocos e tijolos. Uma relaciona as propriedades pozolânicas dos tijolos com uma fase vítrea solúvel que reage com o  $\text{Ca(OH)}_2$ , formando C-S-H. Esta fase vítrea só pode ser encontrada em tijolos cerâmicos queimados a temperaturas acima de 950°C. A segunda diz que apenas os tijolos queimados a baixas temperaturas é que podem apresentar esta reatividade. Esses materiais possuiriam metacaulim altamente reativo ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) numa forma instável (WINKLER e MÜELLER, 1998 *apud* LEITE, 2001).

HAMASSAKI *et al*, (1997) *apud* LIMA (1999) estudaram 8 traços diferentes de argamassa incorporando resíduos de blocos cerâmicos, tijolos e blocos de concreto separadamente e avaliaram, além de propriedades mecânicas das argamassas produzidas, o índice de atividade pozolânica dos materiais. Os autores realizaram o ensaio de Chapelle modificado, proposto por RAVERDI *et al*, (1980), no qual os resultados são expressos em termos da quantidade de CaO consumidos pela amostra. O material é considerado pozolânico quando apresenta um índice de consumo mínimo de 330mg de CaO/g da amostra. Os resultados encontrados pelos autores para os materiais utilizados estão apresentados na tabela 10.

Tabela 10 – Resultados do consumo de CaO no ensaio de Chapelle modificado

<b>Material Reciclado</b>	<b>Consumo de CaO (mg de CaO/g da amostra)</b>
Bloco cerâmico	137,1
Tijolo	255,8
Bloco de concreto	53,6

Fonte: HAMASSAKI *et al*, (1997) *apud* LIMA (1999)

Observa-se pelos resultados que nenhum dos materiais utilizados neste estudo apresentaram índice de consumo de CaO igual ou superior a 330 mg CaO/g. Isto indica que nenhum dos materiais pode ser classificado como uma pozolana. Entretanto, percebe-se que os materiais cerâmicos consomem mais CaO em relação aos agregados provenientes de bloco de concreto. Os autores sugerem que, em vista destes resultados, pode haver uma atividade pozolânica dos materiais cerâmicos sobre o desempenho mecânico das argamassas produzidas, ainda que pequena. Afirmam que este não é o único critério para se avaliar propriedades pozolânicas e que o ganho de resistência das argamassas com reciclado pode ser devido ao efeito filler causado pelas partículas finas.

LEVY (1997) avaliou a atividade pozolânica dos agregados reciclados através do mesmo método usado por HAMASSAKI *et al*, (1997). Foram avaliados quatro tipos de materiais cerâmicos. Os resultados são apresentados na tabela 11.

Tabela 11 – Resultados do consumo de CaO pelos agregados reciclados

<b>Material Reciclado</b>	<b>Consumo de CaO (mg de CaO/g da amostra)</b>
Blocos cerâmicos de 1° linha	242
Blocos cerâmicos de 1° linha (passante em #50)	224
Blocos cerâmicos de 2° linha (passante em #50)	454
Tijolos maciços (passante em #50)	565

Fonte: LEVY (1997)

Diferente dos resultados encontrados por HAMASSAKI *et al*, (1997), LEVY (1997) encontrou reatividade pozolânica nos blocos cerâmicos de 2° linha e nos tijolos maciços na avaliação de materiais passantes na peneira #50.

WINKLER e MÜELLER (1998) *apud* LEITE (2001) realizaram estudos com finos de tijolos adicionados ao cimento, tendo sua influência analisada também em argamassas. Os autores analisaram a influência de tijolos queimados a baixas e a altas temperaturas. Todos os materiais foram reduzidos a partículas com a mesma finura do cimento utilizado e adicionados às misturas em teores que variaram de 0 a 60 %. A atividade pozolânica foi analisada em função do consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  através de difração de raio-X, em amostras retiradas aos 28, 91 e 180 dias. Os autores verificaram que o teor de  $\text{Ca(OH)}_2$  diminui com o aumento do teor de pó de tijolos cerâmicos. Os autores consideram que o pó obtido com os tijolos queimados a altas temperaturas, apresenta uma maior reatividade pozolânica, pois para este material, se conseguiu também os maiores resultados de resistência à compressão.

No estudo realizado por LEITE (2001) sobre a atividade pozolânica com a cal, verificou-se

que a resistência média à compressão da argamassa foi de 7,7 MPa, ou seja, 28% superior ao mínimo exigido pela NBR 12653 (1992) que é de 6 MPa. Para a atividade pozolânica com o cimento, o índice de atividade pozolânica chegou a 87,2%, superior aos 75% recomendado pela norma NBR 5752 (1992).

Os resultados encontrados na bibliografia não podem ser considerados como conclusivos quanto a influência pozolânica de materiais cerâmicos. É possível dizer apenas que o efeito pozolânico existe e depende do tipo e quantidade de material que está sendo utilizado, sendo necessário um estudo mais aprofundado em cada caso.

### **2.10.2 Avaliação da atividade pozolânica através da Análise Térmica Diferencial (ATD)**

A análise térmica abrange um grupo de técnicas, através das quais uma propriedade física de uma substância e ou de seus produtos de reação é medida em função da temperatura. Uma delas é a análise térmica diferencial que é uma técnica na qual a diferença de temperatura entre a substância e o material de referência é medida em função da temperatura, enquanto a substância e o material de referência são submetidos a uma programação controlada de temperatura. O registro é a curva térmica diferencial ou DTA; as diferenças de temperatura ( $\Delta T$ ) colocadas em ordenadas, com as reações endotérmicas voltadas para baixo e T nas abscissas, com valores crescentes da esquerda para a direita.

De acordo com ROSCZYNIANSKI, W. (2002), a análise térmica diferencial e termogravimetria são dois dos melhores entre os diferentes métodos de caracterização da atividade pozolânica, o que permite prever as propriedades dos materiais do cimento endurecido. Ao usar esse método pode-se encontrar o teor de hidróxido de cálcio na pasta. A redução de  $\text{Ca(OH)}_2$  reflete muito bem a ação pozolânica da mistura, em função da percentagem e do tempo a partir do início da hidratação. Evidentemente, a determinação do teor de  $\text{Ca(OH)}_2$  é baseada na perda de massa no intervalo de decomposição do hidróxido de cálcio cerca de 425-550°C (TAYLOR, 1969).

TOLEDO, J.P.;GONÇALVES, R.D.;REGO, E.M. (2006) avaliaram a influência da utilização do resíduo da indústria cerâmica na quantidade de produtos hidratados em pastas através de TG e DTG. Foram produzidas cinco pastas, sendo uma pasta de referência (sem resíduo cerâmico) e quatro pastas contendo o resíduo cerâmico. Os teores de substituição ao cimento variaram de 10% a 40% em relação à massa de cimento. Os parâmetros de avaliação foram a quantidade de água quimicamente combinada relativamente ao hidróxido de cálcio e o teor de água quimicamente combinada relativamente aos sais hidratados, em relação à perda total de

massa. Os resultados da análise térmica e a evolução da água combinada do hidróxido de cálcio para as pastas de resíduo cerâmico, são apresentados na figura 10.

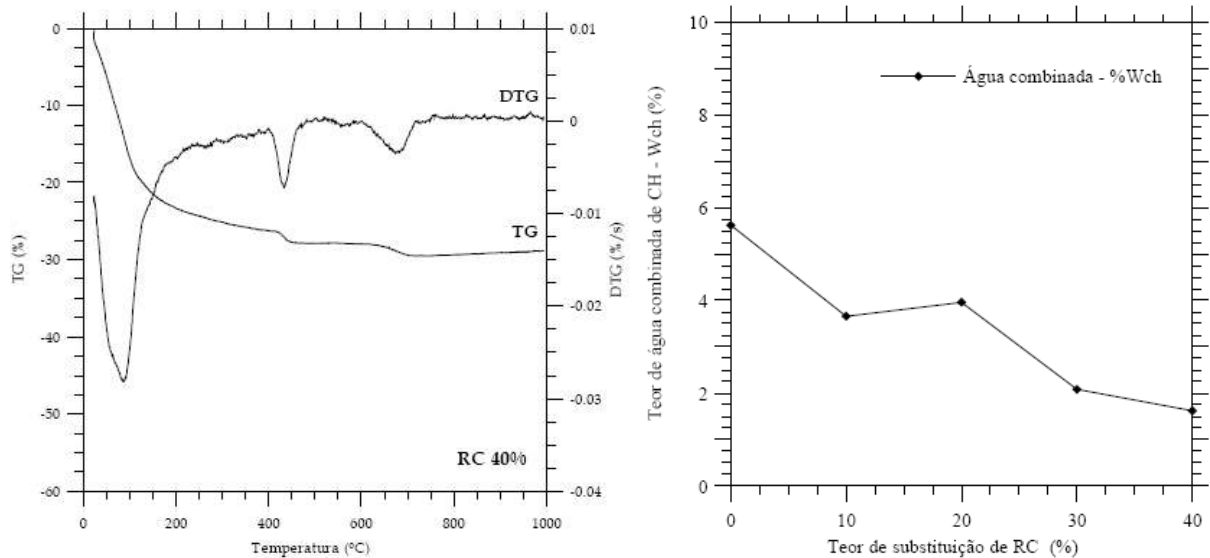


Figura 10 – Termograma da pasta com 40% de resíduo cerâmico (a) e evolução do teor de água quimicamente combinada do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (Toledo *et al*, 2006)

Os autores concluíram que as pastas contendo resíduo cerâmico possuem um teor de água quimicamente combinada no hidróxido de cálcio inferior a pasta de referência como apresentado na figura 10. Em relação à pasta de referência, essa redução foi da ordem de 17% e 60% para pastas com substituição de 10% e 40% de cimento por resíduo cerâmico, respectivamente. Esse fato ocorre devido à reação pozolânica do resíduo cerâmico com o hidróxido de cálcio presente na mistura e a redução da fração de cimento, aumentando assim a concentração de resíduo cerâmico para reagir com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Verificou-se ainda que o teor de 40% não foi suficiente para o consumo total do hidróxido de cálcio da pasta avaliada.

DOLLIMORE *et al*, (2001) utilizaram essa técnica para estudar os concretos reciclados ricos em dolomita e baixo teor de calcita no estado de Ohio nos Estados Unidos. Para o uso da análise térmica, o tamanho de amostra usado encontrava-se entre 25 e 30mg. As amostras foram preparadas como um pó fino na peneira de abertura 0,075mm. As amostras foram previamente calcinadas no forno a 808°C por 1h e depois armazenados em um dessecador. A figura 11 mostra o termograma característico da amostra.

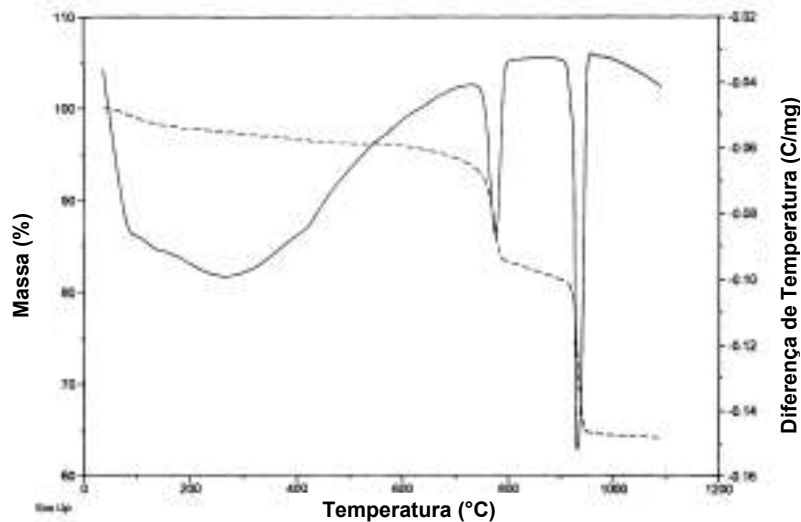


Figura 11 – Termograma de agregados reciclados de concreto para amostra 3 (Dollimore *et al*, 2001)

A primeira ocorrência foi a perda de água adsorvida dentro da faixa 100-150°C e uma perda contínua de água na faixa de 150 a 400°C. De acordo com o autor essa perda é devido aos silicatos de cálcio hidratados presentes no concreto e a 400°C ocorre à dissociação da portlandita. A presença do quartzo podia ser vista em muitas das amostras nos dados da ATD como uma pequena transição endotérmica a 573°C. A dolomita presente decompõe em dois estágios: o primeiro estágio ocorre a 780°C e pode ser visto no lote do termograma e em torno de 910°C toda a calcita presente decompõe.

A calcita restante pode ser originada de duas fontes: (i) a quantidade de calcita presente como agregado e (ii) a quantidade de calcita originada da carbonatação da portlandita. É razoável supor que toda ou a maioria da calcita presente poderiam ter resultado da carbonatação da portlandita. Os autores verificaram que toda a calcita presente no concreto foi devida a carbonatação da portlandita ao longo da vida útil do concreto.



### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para o desenvolvimento do programa experimental, as atividades foram realizadas no Laboratório de Materiais de Construção Civil e no Laboratório ValoRes do Departamento de Engenharia Civil da UFSC. O fluxograma apresentado na Figura 12 sintetiza o delineamento da pesquisa com as etapas adotadas para o desenvolvimento da pesquisa.

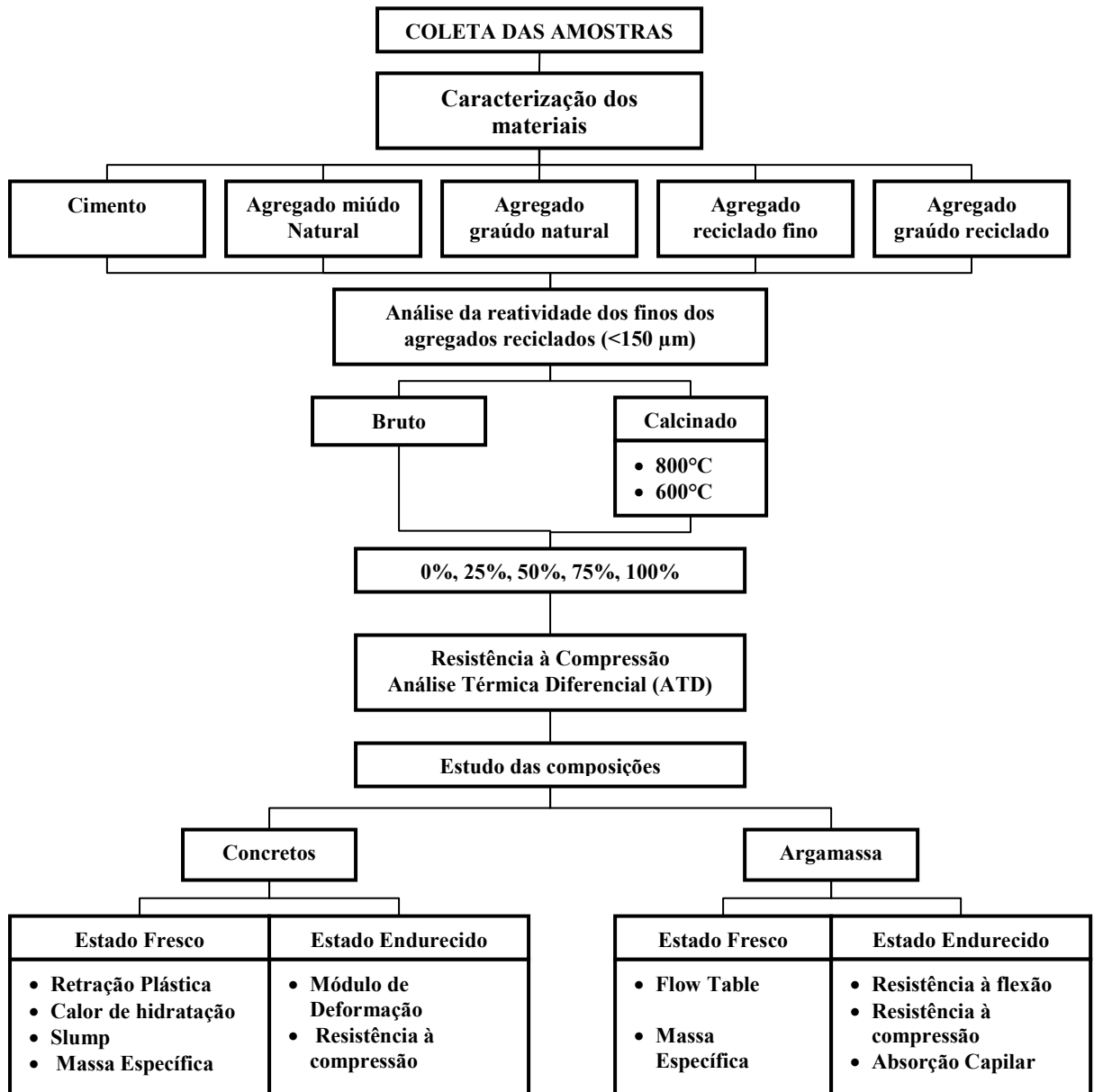


Figura 12 – Fluxograma do delineamento da pesquisa

### 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

#### 3.1.1 Agregado miúdo e graúdo reciclado

As amostras de agregados reciclados, provenientes do beneficiamento de resíduos da construção e demolição, foram coletadas na central de reciclagem de Belo Horizonte/MG. O material corresponde a uma produção de dois dias da central de beneficiamento. A amostragem dos materiais foi executada conforme recomendações da NBR NM 26/2001 – Agregados: Amostragem.

#### 3.1.2 Cimento

Foram utilizados dois tipos de cimento no estudo. O cimento utilizado para a determinação do Índice de Atividade Pozolânica (IAP) foi o cimento CP I – S da marca Votoran, escolhido por não possuir adições ativas. As propriedades do cimento são apresentadas na tabela 12.

Tabela 12 – Propriedades do cimento CP I-S

Ensaio Físicos	Unidade	Média	Máximo	Mínimo	Desvio
<b>Peneira 200</b>	%	2,26	3,00	1,30	0,42
<b>Peneira 325</b>	%	14,25	16,50	9,50	2,41
<b>Blaine</b>	cm <sup>2</sup> g <sup>-1</sup>	3685	3980	3370	181
<b>Água de consistência normal</b>	%	25,36	25,80	24,80	0,35
<b>Início de pega</b>	horas	02:56	03:10	02:40	0:09
<b>Fim de pega</b>	horas	03:56	04:10	03:40	0:10
<b>Expansão a quente</b>	mm	1,39	2,00	1,00	0,33
<b>Resistência - 1 dia</b>	MPa	19,48	20,70	17,80	1,10
<b>Resistência - 3 dias</b>	MPa	28,27	30,90	25,90	1,46
<b>Resistência - 7 dias</b>	MPa	32,21	34,40	29,10	1,64
<b>Resistência - 28 dias</b>	MPa	x	x	x	x
Ensaio Químicos	Unidade	Média	Máximo	Mínimo	Desvio
<b>Perda ao fogo</b>	%	3,46	3,82	3,11	0,21
<b>SiO<sub>2</sub></b>	%	18,40	18,85	18,01	0,22
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	%	4,51	4,62	4,46	0,06
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	%	3,04	3,09	2,97	0,04
<b>CaO</b>	%	61,51	62,10	61,12	0,32
<b>MgO</b>	%	6,25	6,47	6,09	0,11
<b>K<sub>2</sub>O</b>	%	0,92	0,94	0,88	0,02
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	%	0,07	0,07	0,07	0,00
<b>SO<sub>3</sub></b>	%	3,10	3,35	2,94	0,15
<b>Resíduo insolúvel</b>	%	0,82	1,04	0,58	0,13
<b>CO<sub>2</sub></b>	%	2,60	2,76	2,41	0,14

Fonte: Laudo Técnico Votoran

Para a confecção das argamassas e concretos foi utilizado o cimento CP II – F da marca Itambé. As propriedades do cimento fornecidas pelo fabricante são apresentadas na tabela 13.

Tabela 13 – Propriedades do cimento CP II-F

Ensaio Físicos	Unidade	Média	Máximo	Mínimo	Desvio
Peneira 200	%	4,26	5,30	3,10	0,69
Peneira 325	%	17,40	19,90	14,60	1,70
Blaine	cm <sup>2</sup> g <sup>-1</sup>	3168	3250	3100	38,87
Água de consistência normal	%	25,50	25,80	25,20	0,20
Início de pega	horas	03:03	03:10	02:55	0:04
Fim de pega	horas	03:57	04:15	03:45	0:07
Expansão a quente	mm	0,45	1,00	0,00	0,30
Resistência - 1 dia	MPa	13,50	14,80	12,00	1,00
Resistência - 3 dias	MPa	26,10	27,00	24,30	0,80
Resistência - 7 dias	MPa	32,20	33,20	30,90	0,70
Resistência - 28 dias	MPa	40,20	41,00	39,20	0,70
Ensaio Químicos	Unidade	Média	Máximo	Mínimo	Desvio
Perda ao fogo	%	5,24	5,80	4,89	0,20
SiO <sub>2</sub>	%	18,41	18,77	18,21	0,10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	4,13	4,16	4,10	0,02
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	2,57	2,59	2,56	0,01
CaO	%	60,00	60,07	59,93	0,04
MgO	%	5,16	5,34	5,08	0,06
CaO livre	%	1,63	2,13	1,04	0,35
SO <sub>3</sub>	%	3,00	3,11	2,84	0,07
Resíduo insolúvel	%	1,52	1,97	1,18	0,21
Eq. Alcalina	%	0,60	0,61	0,59	0,01

Fonte: Laudo Técnico Itambé (Nov 07)

### 3.1.3 Agregado miúdo natural

Para a confecção de concretos e argamassas foram utilizados como agregado miúdo natural, uma areia quartzosa fornecida pela empresa Protenph Pré-Fabricados. De acordo com a empresa a areia é da região de Tijucas no estado de Santa Catarina.

### 3.1.4 Agregado graúdo natural

O agregado graúdo natural de origem granítica utilizado foi fornecido, através de doação, também pela empresa Protenph Pré-Fabricados. De acordo com a empresa o agregado graúdo é originado de uma pedreira.

### 3.1.5 Água

Água utilizada para os ensaios é proveniente da rede de abastecimento local fornecida pela CASAN e também água destilada/deionizada em processo realizado no laboratório ValoRes.

## 3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A tabela 14 apresenta os ensaios executados para a caracterização dos respectivos materiais utilizados na pesquisa.

Tabela 14 – Ensaios de caracterização executados

<b>Propriedade</b>	<b>Materiais ensaiados</b>	<b>Ensaio/Método</b>	<b>Observação</b>
Análise Química	Agregado Reciclado	Espectrometria de Dispersão de Raios-X	EDX-700HS da marca Shimadzu Laboratório de ValoRes da UFSC
Identificação dos constituintes solubilizados e lixiviados	Agregado Reciclado	NBR 10005 e NBR 1006 (2004)	Procedimento para obtenção de extrato solubilizado e lixiviado de resíduos sólidos
Identificação das fases mineralógicas	Agregado Reciclado	Técnica de análise Difração de Raios-X	Radiação K- $\alpha$ de cobre 30 kV e 15mA - 2 $\theta$ (10° a 100°)
Massa Específica	Agregado graúdo	Método da Balança Hidrostática – NBR NM53/03	
	Agregado miúdo	Método do Picnômetro NBR NM52/03	
Massa Unitária	Agregados reciclados e naturais (miúdo e graúdo)	NBR 7251/82 Determinação da massa unitária	
Composição Granulométrica	Agregado reciclado e natural (miúdo e graúdo)	NBR 7217/87 Composição Granulométrica	
Teor de material pulverulento	Agregado reciclado e natural	NBR 7219/87 Determinação do teor de material pulverulento	
Ataque de ácido	Agregado miúdo reciclado	IPT 25/40 – Reconstituição de traço	
Absorção de água (SSS)	Agregado miúdo reciclado e natural	NBR NM30 – Determinação da absorção de água	
Absorção capilar granular	Agregado miúdo reciclado e natural	Metodologia – Lab. ValoRes	

Os procedimentos de cada ensaio de caracterização dos materiais granulares utilizados são apresentados nos sub-itens abaixo.

### 3.2.1 Espectrometria de Dispersão de Raios X

Para determinação da composição química e concentração dos metais pesados presentes nos agregados reciclados finos, assim como, em soluções lixiviadas e solubilizadas foi utilizado o espectrômetro de fluorescência de raios-X, EDX 700HS da marca Shimadzu.

O espectrômetro de fluorescência de raios-X é um instrumento que determina quantitativamente os elementos presentes em uma determinada amostra. Isto é possível através da aplicação de raios-X na superfície da amostra e a posterior análise dos fluorescentes raios-X emitidos. A técnica de fluorescência de raios-X é não-destrutiva para todos os tipos de amostras, incluindo sólidos, líquidos, etc., com detecção em ppm.

### 3.2.2 Difração de Raios-X

A técnica da difração de raios-x foi utilizada para identificar as fases mineralógicas do material reciclado. As análises foram realizadas em equipamento Rigaku, Mini Flex, operando com radiação K-alfa de cobre, 30 kV e 15 mA, com varredura entre  $2\theta$  ( $10^\circ$ ) e  $2\theta$  ( $100^\circ$ ). O ensaio foi realizado no Laboratório de Síntese e Caracterização de Materiais, do departamento da Física da UFSC. O aparelho de difração de raios-x utilizado é apresentado na figura 13.

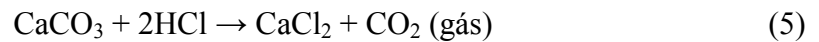


Figura 13 – Aparelho de Difração de Raios-X

### 3.2.3 Reconstituição de Traço

O ensaio de reconstituição de traço tem como objetivo identificar o traço original do concreto ou argamassa utilizado de acordo com o Boletim IPT 25/40 (1998). Para determinação da quantidade de argamassa presente no agregado reciclado, utilizou-se uma solução de ácido clorídrico com concentração de 20%. Separou-se duas amostras de agregados que foram secas

em estufa até a constância de massa, pesadas e imersas separadamente na solução de ácido clorídrico até a completa desagregação da argamassa dos agregados. A reação química que envolve é apresentado na seguinte equação:



Carbonato de cálcio + ácido clorídrico = cloreto de cálcio + Dióxido de carbono

Posteriormente, os agregados foram lavados em água corrente para certificar-se da retirada total da argamassa e colocados em estufa até constância de massa. As amostras foram pesadas novamente, e, por diferença de massa, encontrou-se a porcentagem de argamassa presente nos agregados miúdos reciclados.

### 3.2.4 Absorção de materiais granulares

No ensaio para a determinação da absorção de água para materiais granulares foi adotado o procedimento utilizado pelo Laboratório ValoRes da UFSC, apresentado por ANDRADE, L.B.; ROCHA, J.C.; CHERIAF, M.; (2007), que consiste na medida da variação da altura em função do tempo de uma coluna de água contida em um tubo de Mariotte graduado. As amostras foram testadas em um anel cilíndrico metálico de 10cm de diâmetro e 4cm de altura cuja face inferior foi submetida à ação capilar. A variação da altura da coluna de água está diretamente relacionada com a quantidade de água absorvida pelo material, sendo assim, a carga hidráulica no tubo nula. O esquema do ensaio utilizado é apresentado na figura 14.

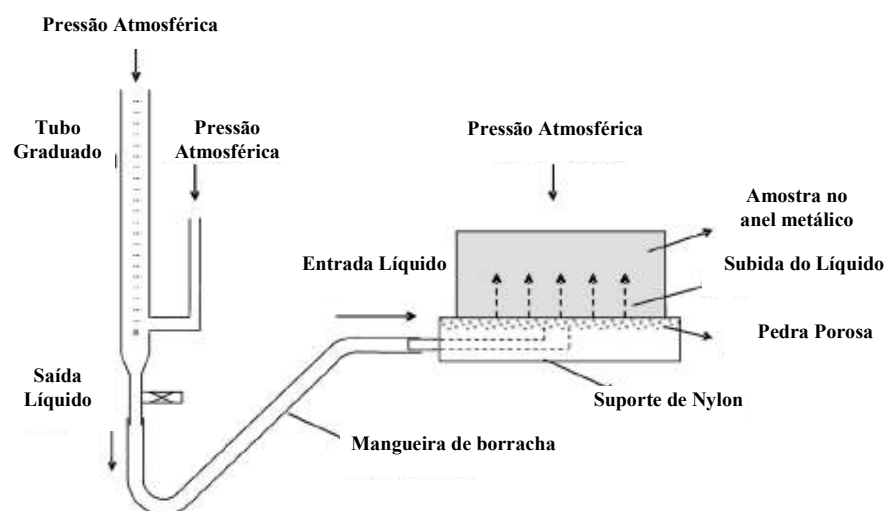


Figura 14 – Esquema do equipamento de absorção capilar de materiais granulares (Andrade *et al*, 2007)

A vantagem do procedimento é a realização de várias medidas para cada unidade de volume de água ingressado na amostra. Para a realização deste ensaio parte-se do pressuposto de que o agregado reciclado promove uma maior absorção de água, em comparação aos agregados naturais. Dessa forma, obtêm-se então a cinética de molhagem dos agregados e a porcentagem de absorção em relação ao teor de substituição do agregado reciclado fino.

O potencial da fixação de água e a cinética de absorção capilar foram avaliados através do índice de absorção que se relaciona ao tempo. Este índice é calculado relacionando a massa do líquido infiltrado à área unitária da amostra em contato com o líquido, como apresentado na equação 6.

$$I_{abs} = \frac{M_{H_2O}}{A_{anel}} \quad (6)$$

onde:

$I_{abs}$ : índice de absorção capilar granular dos agregados ( $\text{cm}^3/\text{cm}^2$ );  
 $M_{H_2O}$ : massa de água absorvida pelo agregado (g);  
 $A_{anel}$  = área unitária da amostra em contato com o líquido ( $\text{cm}^2$ ).

Outros parâmetros interessantes também foram avaliados, como o teor de umidade volumétrico e mássico, determinados através das equações 7 e 8.

$$\%Umid_{vol} = \frac{Vol_{H_2Oabs}}{V_{anel}} \times 100 \quad (7)$$

onde:

$\%Umid_{vol}$ : teor de umidade volumétrico (%);  
 $Vol_{H_2Oabs}$ : volume total de água absorvida ( $\text{cm}^3$ );  
 $V_{anel}$  = volume do anel ( $\text{cm}^3$ ).

$$\%Umid_{mas} = \frac{m_{H_2Oabs}}{m_{amostra}} \times 100 \quad (8)$$

onde:

$\%Umid_{mas}$ : teor de umidade mássico;  
 $m_{H_2Oabs}$ : massa total de água absorvida (g);  
 $m_{amostra}$  = massa da amostra no anel (g).

A sorptividade das amostras foi determinada considerando a quantidade de água capilar absorvida em função da raiz do tempo, através da equação 9.

$$I_{absH_2O} = S \cdot \sqrt{t} \quad (9)$$

onde:

S = Sorptividade do material ( $\text{cm}^3/\text{cm}^2/\text{s}^{1/2}$ );

t = tempo (seg).

A cinética de absorção capilar dos agregados é calculada através da equação 10:

$$Vel_{absH_2O} = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (10)$$

onde:

$\Delta V$  = variação de água absorvida entre os tempos  $t_i$  e  $t_{i+1}$  ( $\text{cm}^3$ );

$\Delta t$  = tempo da infiltração da água (seg).

A absorção capilar granular foi avaliada para 4 (quatro) tipos de materiais com características diferentes: agregado miúdo natural, agregado miúdo reciclado com finos no estado bruto e agregado miúdo reciclado com finos ( $<150\mu\text{m}$ ) calcinados a  $600^\circ\text{C}$  e  $800^\circ\text{C}$ . Para uma melhor avaliação das misturas, todas as misturas apresentaram mesma distribuição granulométrica. Também procurou-se avaliar a influência da dimensão mínima dos grãos na mistura quanto a absorção final e a cinética de absorção. A tabela 15 apresenta a descrição das misturas utilizadas.

Tabela 15 – Descrição das misturas para ensaio de absorção capilar granular

Mistura	Descrição
REF AN (4,8/fundo)	Areia natural - 4,8mm até o fundo
REF AN (4,8/0,075)	Areia natural - 4,8mm até 0,075mm
REF AN (4,8/0,15)	Areia natural - 4,8mm até 0,15mm
RCD Bruto (4,8/fundo)	RCD Bruto - 4,8mm até o fundo
RCD Bruto (4,8/0,075)	RCD Bruto - 4,8mm até 0,075mm
RCD Bruto (4,8/0,15)	RCD Bruto - 4,8mm até 0,15mm
RCD $600^\circ\text{C}$ (4,8/fundo)	RCD c/ fino calcinado a $600^\circ\text{C}$ - 4,8mm até o fundo
RCD $600^\circ\text{C}$ (4,8/0,075)	RCD c/ fino calcinado a $600^\circ\text{C}$ - 4,8mm até 0,075mm
RCD $800^\circ\text{C}$ (4,8/fundo)	RCD c/ fino calcinado a $800^\circ\text{C}$ - 4,8mm até o fundo
RCD $800^\circ\text{C}$ (4,8/0,075)	RCD c/ fino calcinado a $800^\circ\text{C}$ - 4,8mm até 0,075mm



### **3.2.5 Lixiviação e Solubilização**

Os ensaios de lixiviação e solubilização seguiram os procedimentos recomendados pela NBR 10005 (2004) e NBR 10006 (2004), respectivamente. A NBR 10005 (2004) define como lixiviação ao processo para a determinação da capacidade de liberação de substâncias orgânicas e inorgânicas através da dissolução em meio extrator.

A determinação foi realizada em várias amostras para os agregados reciclados miúdos e graúdos e determinados os elementos químicos lixiviados e solubilizados através do EDX.

## **3.3 ANÁLISE DA POZOLANICIDADE DO MATERIAL FINO RECICLADO**

Visando a avaliação dos agregados reciclados, primeiramente foi realizada a análise da reatividade pozolânica dos agregados reciclados em estudo. Foram estudadas inicialmente em duas condições: a primeira foi avaliar o comportamento dos finos em estado bruto e a segunda foi calcinar os finos em duas temperaturas diferentes, 600°C e 800°C por 1 hora, para determinar as condições de reatividade desses finos. Os agregados reciclados finos foram previamente separados na peneira de abertura 0,15mm, condicionados em recipientes apropriados para posteriormente proceder à calcinação.

### **3.3.1 Processo de calcinação do material fino**

Primeiramente os finos passantes na peneira de abertura 0,15mm foram secos em estufa a uma temperatura de 105°C até constância de massa. Logo depois, foi determinada a massa inicial seca para depois da calcinação determinar a perda de massa ao fogo do material. O material fino foi colocado então em recipientes adequados e conduzidos até a mufla. A mufla foi programada para uma taxa de aquecimento de 10°C/min até atingir a temperatura desejada (600° e 800°C). Em seqüência, manteve-se essa mesma temperatura por um tempo de 1 hora e posteriormente procedeu-se ao resfriamento do material e pesagem. O esquema de calcinação e a mufla utilizada para a calcinação são apresentados nas figuras 15 e 16.

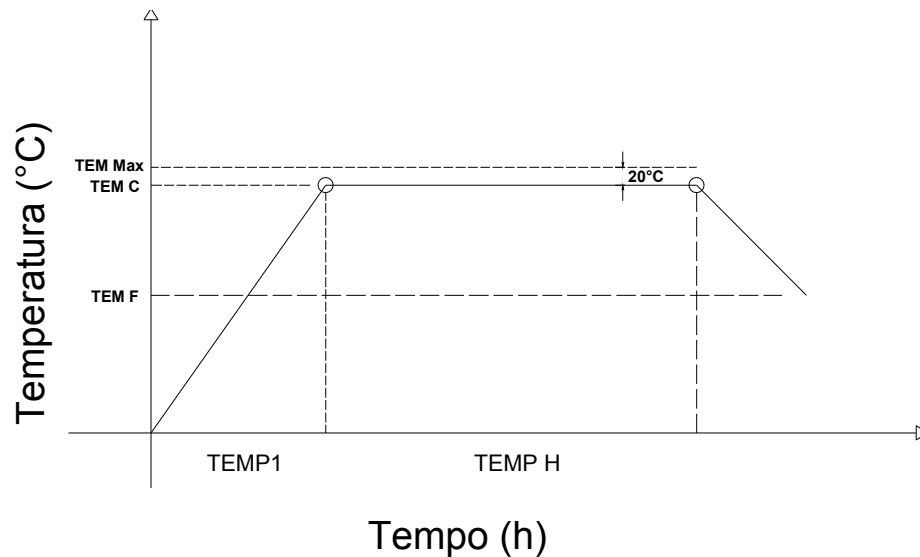


Figura 15 – Esquema de calcinação dos agregados reciclados finos



Figura 16 – Mufla utilizada para a calcinação dos finos de RCD

### 3.3.2 Preparação das pastas com Hidróxido de Cálcio

Para o ensaio de pozolanicidade foi utilizada a metodologia adotada pelo grupo ValoRes da Engenharia Civil da UFSC. Foram definidas as porcentagens de substituição em massa do material reciclado por 0% (referência), 25%, 50%, 75% e 100% em substituição ao material granular fino natural. Para tal, foram feitas pastas misturando 50% de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  de padrão analítico P.A. e 50% do material granular fino. Para a referência, foi utilizado como material fino uma sílica não reativa. Para efeito de comparação a quantidade de hidróxido de cálcio foi mantida constante para todas as misturas (50% do material total), assim como, a relação de água que foi mantida em 0,60. A tabela 16 apresenta os traços e as porcentagens em massa de cada material utilizado para a confecção das pastas.

Tabela 16 – Traço utilizado utilizados no ensaio da determinação da reatividade pozolânica

% Subst.	Traço (Ca(OH) <sub>2</sub> : SiO <sub>2</sub> : RCD)*	Total Massa seca (g)	% Ca(OH) <sub>2</sub>	% SiO <sub>2</sub>	% RCD	% Água
REF	1:1:0:0,60	200,0	50,0	50,0	0,0	60,0
25	1:0,75:0,25:0,60	200,0	50,0	37,5	12,5	60,0
50	1:0,5:0,5:0,60	200,0	50,0	25,0	25,0	60,0
75	1:0,25:0,75:0,60	200,0	50,0	12,5	37,5	60,0
100	1:0:1:0,60	200,0	50,0	0,0	50,0	60,0

\* Traço em massa

Misturados os materiais, foram moldados os corpos-de-prova cilíndricos de dimensões 2,0cm de diâmetro e 4,0cm de altura em moldes de acrílico vedados, que impedem a carbonatação das misturas. Depois de moldados os corpos-de-prova foram mantidos em sala de temperatura e umidade relativa controlada a  $24 \pm 1^\circ\text{C}$  e UR de 55% até o momento do ensaio. As idades definidas para os ensaios foram 3, 7, 28 e 90 dias, para determinação da resistência à compressão das pastas e avaliação através da análise térmica diferencial (ATD).

As amostras foram desmoldadas e secas em estufa a  $50^\circ\text{C}$  por 24 horas. Em seqüência, foi determinada a massa específica no estado endurecido, assim como, a resistência à compressão. Para o ensaio de resistência à compressão foram utilizados uma célula de carga de capacidade máxima de 500 kgf, um aparelho de aquisição de dados e uma prensa de ruptura, localizados no Laboratório CERMAT da Engenharia Mecânica da UFSC. O equipamento utilizado para a determinação da resistência à compressão é apresentado na figura 17.



Figura 17 – Equipamentos utilizados para determinação da resistência à compressão das pastas

Determinada a resistência à compressão dos corpos-de-prova, foram moídos até passar completamente na peneira de abertura 0,15mm. Todos os materiais foram devidamente separados e embalados em papel de alumínio e colocados no dessecador até o momento do ensaio.

O equipamento utilizado para o ensaio da análise térmica diferencial foi montado no Laboratório de ValoRes da UFSC com taxa de aquecimento de 10°C/min. Através do ensaio de ATD foram determinados os termogramas para cada amostra e analisados os picos característicos da desidroxilação. Dados os termogramas da análise térmica diferencial, foram determinados alguns parâmetros como o tempo de deflexão dos picos, perda ao fogo do material e as áreas respectivas dos picos.

Para a determinação da área do pico seguiu-se o seguinte procedimento:

- Traçar as linhas de base: AB e DE;
- Determinar o centróide C: interseção de duas tangentes com maior inclinação;
- Traçar a linha de base da deflexão B'D';
- Determinar a duração da deflexão B'D';
- Determinar a área do pico.

A figura 18 apresenta o esquema para determinar as áreas dos picos.

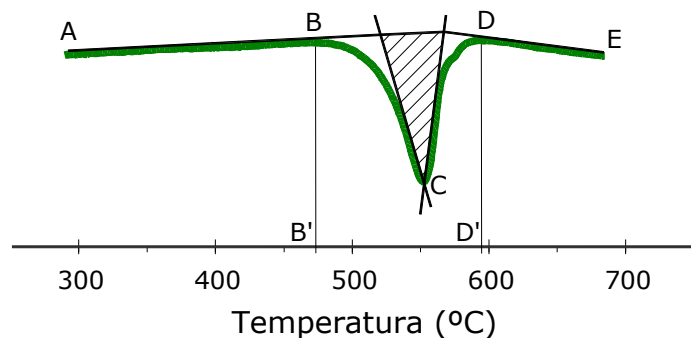


Figura 18 – Esquema para determinação da área do pico

Com a determinação das áreas dos picos é possível obter o consumo de hidróxido de cálcio referente a cada mistura através da equação 11, a qual relaciona as áreas dos picos de cada mistura com a área correspondente ao pico de referência.

$$\%C_{Ca(OH)_2} = \frac{A_{ref} - A_i}{A_{ref}} \times 100 \quad (11)$$

onde:

$A_{ref}$  = área do pico para a amostra de referência (u.A.);

$A_i$  = área do pico da amostra analisada (u.A.).

### 3.4 AVALIAÇÃO DA POZOLANICIDADE PELO MÉTODO DA NBR 5752

Um outro procedimento para avaliar a atividade pozolânica é definido pela norma NBR 5752 (1992). O ensaio consiste na confecção de argamassas: uma de referência no traço 1:3, constituída somente de cimento Portland, e outra mistura substituindo 35% do seu volume absoluto de cimento por material pozolânico. Para cada argamassa recomenda-se a moldagem de 3 (três) corpos-de-prova cilíndricos de 50mm x 100mm. A quantidade de água utilizada na mistura foi o suficiente para produzir argamassas com índices de consistência de  $225 \pm 5$  mm. Como agregado miúdo foi utilizado a areia normal do IPT e o tipo de cimento utilizado foi o cimento CP I-S da marca Votoran.

Os corpos-de-prova foram hermeticamente fechados e colocados em banho Maria a uma temperatura de  $38 \pm 2^\circ\text{C}$  até a idade de 28 dias, quando foi realizado o ensaio de resistência à compressão das argamassas. O índice de atividade pozolânica é calculado através da relação entre a resistência da argamassa com a pozolana e a argamassa de referência.

### 3.5 ESTUDO DAS COMPOSIÇÕES EM CONCRETO E ARGAMASSA

Visando a avaliação do comportamento dos agregados reciclados de RCD, como material substituinte da areia natural, o programa experimental teve como objetivo analisar o comportamento desses materiais em concretos e argamassas.

Para o estudo das composições dos concretos foram avaliados 3 (três) tipos de mistura com agregado miúdo de RCD e outras 2 (duas) misturas com agregado graúdo de RCD. O objetivo das misturas com agregado graúdo de RCD foi analisar o efeito da presença de partículas inferiores a 4,8mm nos agregados graúdos, devido que grande parcela é composta por este tipo de material. Para as argamassas foram realizados 3 (três) tipos de mistura (M1,M2,M3) com agregado miúdo reciclado. As características das misturas estudadas são apresentadas na tabela 17.

Tabela 17 – Descrição das misturas estudadas

<b>Código</b>	<b>Composição das misturas</b>
M1	Concreto com agregado miúdo bruto de RCD de 4,8/fundo
M2	Concreto com agregado miúdo bruto de RCD de 4,8/0,15mm
M3	Concreto com agregado miúdo calcinado de RCD de 4,8/fundo
M4	Concreto com agregado graúdo de RCD de 9,5/4,8mm
M5	Concreto com agregado graúdo de RCD de 9,5/fundo

Para uma avaliação mais ampla dos agregados reciclados como substituição de agregados naturais, foram adotados vários teores de substituição que variaram desde 25% a 100%, tendo como referência a mistura com agregados miúdos naturais, como mostrado na tabela 18 abaixo.

Tabela 18 – Porcentagens de substituição dos agregados reciclados finos

Dosagem	Composição das misturas
REF M1	Mistura de referência - com areia natural
25%M1	Mistura com 25% do agregado miúdo substituído
50%M1	Mistura com 50% do agregado miúdo substituído
75%M1	Mistura com 75% do agregado miúdo substituído
100%M1	Mistura com 100% do agregado miúdo substituído

O traço estabelecido para os concretos produzidos com diferentes teores de substituição de agregados reciclados incorporados foi de **1:2,36:1,81:0,60**, correspondente ao cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água, respectivamente. Os valores são expressos em massa do material e a relação água/cimento manteve-se constante para todas as misturas.

O traço estabelecido para as argamassas produzidas com diferentes teores de substituição de agregados reciclados incorporados foi de **1:3,0:0,66**, para cimento, agregado miúdo e água, respectivamente. Os valores são expressos em massa do material e a relação água/cimento manteve-se igualmente constante para todas as misturas.

Devido às diferenças entre as massas específicas do agregado miúdo natural e agregado miúdo reciclado, adotou-se o procedimento de substituição em volume. As expressões utilizadas para determinar o conteúdo de material reciclado a incorporar são apresentadas abaixo.

$$m_{rcd} = \%Subst \cdot \left( \frac{\delta_{rcd}}{\delta_{areia}} \right) \cdot m_{areia1} \quad (12)$$

$$m_{areia2} = (1 - \%Subst) \cdot m_{areia1} \quad (13)$$

onde:

$m_{rcd}$  = massa de agregado reciclado de RCD (g);

$\%Subst$  = teor de substituição de areia natural por areia de RCD;

$\delta_{rcd}$  = massa específica do agregado reciclado ( $g/cm^3$ );

$\delta_{areia}$  = massa específica da areia natural (g);

$m_{areia1}$  = massa da areia natural antes da substituição (g);

$m_{areia2}$  = massa de areia natural remanescente após substituição (g).

### **3.5.1 Correção granulométrica**

Para manter a mesma distribuição de poros capilares na mistura e avaliar a influência dos grãos dos agregados, procurou-se utilizar uma mesma distribuição granulométrica para os agregados naturais e reciclados. A correção foi realizada para os agregados naturais para obter a mesma distribuição dos agregados reciclados através de peneiramento.

Primeiramente foram determinadas as porcentagens retidas dos agregados reciclados e procedeu-se a fracionar os agregados naturais. Logo depois, procedeu-se a pesagem correspondente a cada peneira e misturados em um recipiente. Assim, ter-se-ia um outro agregado natural com distribuição granulométrica similar aos agregados reciclados.

### **3.5.2 Ensaios das misturas no estado fresco para os concretos**

#### **3.5.2.1 Medida da Consistência**

Para determinar a consistência foi utilizado o ensaio de abatimento de tronco de cone – *Slump Test*, conforme a norma NBR NM 67/98 – Determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone. O ensaio foi realizado logo após a mistura ter sido fabricada.

#### **3.5.2.2 Massa Específica e Moldagem dos corpos-de-prova**

Para determinação da massa específica no estado fresco foi seguido o procedimento segundo a norma NBR 9983/87 – Determinação da massa específica e teor de ar pelo método gravimétrico. A moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos foi realizada de acordo a norma NBR 5738/94 – Moldagem e cura de corpos de prova de concreto cilíndricos e prismáticos.

#### **3.5.2.3 Retração Plástica**

Em virtude das misturas cimentícias possuírem como característica uma variação dimensional em função da perda do conteúdo de umidade para o meio, buscou-se avaliar o comportamento dos concretos em relação à retração plástica que ocorre nessas misturas e a avaliação da retração com a utilização de agregados porosos.

Visto que as ordens de grandeza dessas variações dimensionais são dependentes das dimensões do corpo-de-prova, foi necessário adaptar um aparato de ensaio tal que se conseguisse medidas precisas da retração plástica sofrida. Para tanto, o equipamento de ensaio utilizado para a medição da retração plástica foi montado no Grupo de Pesquisa de Valorização de Resíduos – ValoRes – da UFSC, em conjunto com o *Institut National des Sciences Appliquées* – INSA – de Lyon na França.

O corpo-de-prova moldado apresentava as seguintes dimensões: seção quadrada com lado igual a 7cm e comprimento longitudinal igual a 50cm. Os dados eram coletados automaticamente do multímetro através da conexão deste com um equipamento digital de aquisição de dados da marca Hewlett-Packard, modelo 34970A (Data Logger), conectado a um computador na qual gravava os dados coletados de variação de voltagem e os transformava em valor dimensional (mm), por meio do software Agilent BenchLink Data Logger 1.5.

Devido à deformação que poderia ocorrer na amostra pelo concreto ainda estar no estado fresco, as placas laterais metálicas e de nylon somente foram retiradas ao iniciar a pega do sistema até uma idade de 20horas após a retirada do molde. O ensaio foi executado em sala climatizada no grupo ValoRes ( $T = 24^{\circ}\text{C}$  e  $\text{UR} = 55\%$ ). As figuras 19 e 20 apresentam o esquema do ensaio e o equipamento utilizado no ensaio de retração plástica nos concretos.

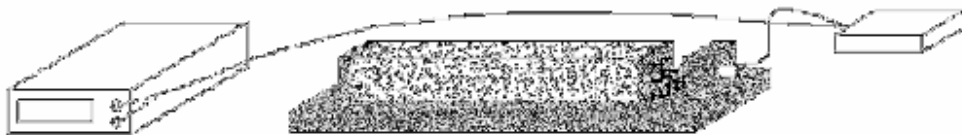


Figura 19 – Esquema do ensaio de retração plástica em concretos (Andrade, 2004)



Figura 20 – Equipamento utilizado no ensaio de retração plástica em concretos

#### 3.5.2.4 Calorimetria

A medição da evolução do calor dos concretos foi realizada utilizando um calorímetro semi-adiabático tipo de Langavant. As leituras da temperatura no corpo-de-prova foram feitas utilizando um termopar tipo K, onde procurou-se manter na metade da altura da amostra. A amostra de concreto no estado fresco foi colocada em um recipiente cilíndrico de EPS com 1,5cm de espessura, 12cm de altura e 7cm de diâmetro. O copo de EPS cilíndrico foi coberto



com uma manta térmica revestida com uma folha de alumínio (manta radiante).

Depois de lançada a amostra, o copo cilíndrico revestido com a manta térmica era lacrado com fita adesiva e colocado em uma caixa térmica menor que ficava dentro de uma caixa térmica maior. Ambas as caixas são fabricadas com isoplástico com paredes em duas camadas com uma camada de ar entre elas. As aberturas da passagem do fio termopar para a leitura da temperatura foram preenchidas com borracha de silicone isolante.

As medidas foram feitas em um Data Logger Hewlett-Packard modelo 34970A, conectado a um microcomputador, com leituras a cada 20 segundos. O ensaio iniciava-se assim que a amostra era despejada e adensada no recipiente de ensaio e todo o aparato era fechado. O tempo desde o contato inicial do cimento com a água até o lançamento do ensaio de calor foi de aproximadamente 15 minutos. Devido a esse fator, o ensaio não determinou o pico de calor de dissolução que ocorre por volta de 10 minutos (LEA, 1969).

Os valores dos calores específicos dos materiais constituintes dos concretos – cimento Portland, areia quartzosa, brita granítica, água potável, agregados reciclados – foram definidos de acordo com valores utilizados em outros estudos. Os valores dos calores específicos dos materiais são apresentados na tabela 19.

Tabela 19 – Calores específicos considerados para os materiais utilizados

<b>Material</b>	<b>Cimento Portland</b>	<b>Areia quartzosa</b>	<b>Brita granítica</b>	<b>Água potável</b>	<b>Agregado reciclado</b>
Calor específico (kJ/kg.K)	0,84	0,80	0,80	4,186	0,90

A partir da medição da temperatura ao longo do tempo, o procedimento experimental utilizado permitiu determinar uma série de parâmetros que contribuíram para a análise comparativa da influência dos agregados reciclados nos concretos.

- O aparato de medição de calor de hidratação permitiu a medição da temperatura da amostra  $T_i$  e variação da temperatura com o tempo  $\Delta T_i$ : no calorímetro durante o tempo de ensaio utilizando um fio termopar. Portanto, é possível determinar uma curva de evolução de temperatura ao longo do tempo de ensaio. A variação da temperatura  $\Delta T_i$  pode ser determinada através da equação 14.

$$\Delta T_i = T_i - T_1 \quad (14)$$

Onde:

$\Delta T_i$ : variação da temperatura da amostra em função da temperatura inicial em  $t = 0$ , em °C;

$T_i$ : temperatura da amostra no intervalo de tempo  $i$  considerado, em °C;

$T_1$ : temperatura da amostra no início do ensaio, em °C.

- Capacidade térmica da amostra  $C_s$ : calculada segundo o procedimento estabelecido pelo RILEM TC 119-TCE1. Leva em consideração a massa e o volume da amostra de concreto, quantidade de cimento contida na amostra e as características térmicas dos materiais (calor específico) apresentadas na tabela 19. A capacidade térmica ( $C_s$ ) pode ser calculada através da equação 15.

$$C_s = m_s \cdot \Sigma(g_i \cdot c_i) \quad (15)$$

Onde:

$C_s$ : capacidade térmica da amostra, em J/K;

$m_s$ : massa da amostra, em kg;

$g_i$ : proporção relativa do constituinte na massa da amostra, em kg/kg;

$c_i$ : calor específico do constituinte, em kJ/kg.K (tabela 19).

- Calor gerado no tempo  $Q_i$  e taxa de calor gerado no tempo  $\Delta Q_i$ : com a evolução da temperatura ao longo do tempo, pode-se calcular o desenvolvimento do calor gerado na amostra. A taxa de calor gerada ao longo do tempo é possível determinar relacionando o calor e o tempo. As equações 16 e 17 foram utilizadas para o cálculo de  $Q_i$  e  $\Delta Q_i$ , respectivamente.

$$Q_i = \frac{C_s \cdot \Delta T_i}{m_c} \quad (16)$$

Onde:

$Q_i$ : quantidade de calor gerado no tempo  $i$ , em J/g;

$C_s$ : capacidade térmica da amostra, em J/K;

$\Delta T_i$ : variação da temperatura no tempo  $i$ , em °C;

$m_c$ : massa de cimento na amostra, em g.

$$\Delta Q_i = \frac{Q_i}{t} \quad (17)$$

Onde:

$\Delta Q_i$ : taxa de calor gerado no tempo i, em J/g/h;

$Q_i$ : quantidade de calor gerado no tempo i, em J/g;

t: intervalo de tempo i, em h.

- Calor total gerado  $Q_{\max}$ : a quantidade de calor acumulado no tempo possibilita a obtenção do valor total do calor envolvido no tempo de ensaio. O tempo total de ensaio foi determinado em 20 horas para obtenção do calor total. O calor total é determinado através da equação 18.

$$Q_{\max} = \sum Q_i \quad (18)$$

Onde:

$Q_{\max}$ : quantidade do calor total gerado durante o ensaio, em kJ/g;

$Q_i$ : quantidade de calor gerado no tempo i, em kJ/g.

### 3.5.3 Ensaios das misturas no estado endurecido dos concretos

#### 3.5.3.1 Resistência à Compressão

A determinação da resistência à compressão dos concretos fabricados com agregados reciclados miúdos e graúdos seguiu os procedimentos da norma NBR 5739/94 – Concretos – Determinação da resistência à compressão axial. Os corpos-de-prova foram submetidos à compressão nas idades: 7, 28 e 90 dias, com 3 amostras por idade. Para garantir o nivelamento e planicidade dos topos das amostras, os corpos-de-prova foram fresados antes de serem ensaiados.

A cura foi feita em uma câmara úmida, com acionamento manual do equipamento de umidificação, onde as amostras eram submetidas 95% de umidade relativa.

A prensa utilizada para os ensaios de rompimentos dos corpos-de-prova foi da marca Shimadzu, modelo UH-2000KNA, localizado no LMCC da UFSC.

### 3.5.3.2 Módulo de Deformação

Para a determinação do gráfico tensão-deformação e do valor do módulo de deformação para os concretos fabricados, a norma 8522/2003 – Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação – foi usada para auxílio no procedimento do ensaio e do cálculo do módulo de deformação. A norma citada prevê para o cálculo do valor do módulo o emprego da equação 19 apresentada abaixo.

$$E_{ci} = \frac{\sigma_{30} - \sigma_{0,5}}{\varepsilon_{30} - \varepsilon_{0,5}} \quad (19)$$

onde:

$\sigma_{30}$  = tensão no corpo-de-prova a 30% da carga máxima de compressão (MPa);

$\sigma_{0,5}$  = tensão igual a 0,5 MPa;

$\varepsilon_{30}$  = deformação específica do corpo-de-prova no ponto medido a 30% da tensão limite de resistência à compressão;

$\varepsilon_{0,5}$  = deformação específica do corpo-de-prova no ponto medido de tensão de resistência à compressão igual a 0,5 MPa.

O equipamento de medição da deformação usado no ensaio apresentado nas figuras 21, 22 e 23, fabricado pela Shimadzu, é acoplado a mesma prensa utilizada para os ensaios de resistência à compressão e ambos comandados automaticamente por um microcomputador ligado à prensa. As figuras 21, 22 e 23 mostram o conjunto de equipamentos de medição da deformação, prensa e computador.



Figura 21 – Equipamento utilizado para resistência à compressão dos concretos



Figura 22 – Equipamento utilizado para resistência à compressão e aquisição de dados da deformação dos concretos



Figura 23 – Medidores de deformação longitudinal dos concretos

### 3.5.4 Ensaios das misturas no estado fresco das argamassas

#### 3.5.4.1 Determinação da consistência

Para avaliação das argamassas produzidas com agregados miúdos reciclados, em substituição a areia natural, foi realizada a medição da consistência na mesa de espalhamento – *Flow Table*. O equipamento de mistura foi uma argamassadeira com capacidade de mistura de 10 litros. Neste ensaio procurou-se seguir o mesmo procedimento de mistura da norma MB 1, com pequenas alterações descritas na seqüência:

- Primeiramente, com a cuba umedecida, foram colocados todo o cimento e água da dosagem e na seqüência promovia-se a agitação da pá da argamassadeira em velocidade baixa durante trinta segundos;

- Após esse tempo, era colocada toda a areia natural e agregado miúdo reciclado, respectivamente, e agitava-se em velocidade baixa por 60 segundos;
- Em seqüência, o equipamento era parado para raspagem da pá e da cuba e deixava-se repousar por um tempo de 1(un) minuto;
- Agitava-se novamente em velocidade alta por mais um minuto e levada a mesa de espalhamento;
- A mesa era previamente umedecida para a mistura não perder umidade. A argamassa era moldada em um tronco de cone padrão (MB1) com 3 (três) camadas iguais com 15, 10 e 5 golpes cada camada, respectivamente.
- Feita a moldagem, o tronco de cone era retirado e aplicado 30 golpes em aproximadamente 30 segundos. O diâmetro do espalhamento da argamassa era medido com ajuda de um paquímetro em duas direções ortogonais, sendo o valor do espalhamento a média das duas leituras. As leituras eram feitas com 5, 15 e 30 golpes, respectivamente.
- Por fim, a argamassa era imediatamente retirada da mesa e colocada de novo na cuba para realizar a moldagem dos corpos-de-prova para os ensaios posteriores.

A figura 24 mostra as fotos dos equipamentos de mistura das argamassas e a mesa de espalhamento – *Flow Table*.



Figura 24 – Mesa de espalhamento e equipamento de mistura

### 3.5.4.2 Moldagem dos corpos-de-prova

Para a moldagem dos corpos de prova cilíndricos (diâmetro=5cm e altura=10cm) foi utilizado o procedimento adotado pela norma NBR 7215 (1996). As amostras foram moldadas em 4 camadas com 30 golpes cada. Foram moldados um total de 4(quatro) corpos-de-prova para cada mistura para os ensaios de absorção capilar aos 28 e 90 dias.

Para a moldagem dos corpos de prova prismáticos (40x40x160mm) foi adotado o procedimento adota pela norma NBR 13279 (2005). O adensamento foi mecânico com 30 quedas do equipamento padrão descrito pela norma. Foram moldados 3 corpos-de-prova para cada mistura para os ensaios de resistência à tração na flexão e resistência à compressão dos prismas. As amostras foram desmoldadas 48 horas após a moldagem e armazenadas em sala com temperatura e umidade relativa controlada ( $T = 24 \pm 2^{\circ}\text{C}$  e  $UR = 55\%$ ) até o momento do ensaio. Os equipamentos utilizados para a moldagem dos corpos-de-prova são apresentados na figura 25.



Figura 25 – Equipamento de compactação e moldes dos corpos-de-prova prismáticos

## 3.5.5 Ensaios das misturas no estado endurecido das argamassas

### 3.5.5.1 Absorção de água por capilaridade

A execução do ensaio de absorção de água por capilaridade seguiu os procedimentos da norma NBR 9779/95 – Determinação da absorção de água por capilaridade. Esta norma prevê medidas da massa e altura da mancha de água nas argamassas.

Os corpos-de-prova, chegado à idade do ensaio (28 e 90 dias), foram secos em estufa a  $50 \pm 2^{\circ}\text{C}$  até constância de massa para posteriormente realizar o ensaio. As idades de ensaio das argamassas foram 28 e 90 dias. Para o ensaio de absorção capilar com álcool as amostras eram novamente secas em estufa logo após o ensaio com água, a uma temperatura de  $50 \pm 2^{\circ}\text{C}$

até constância de massa.

O ensaio de absorção de água consistia em manter uma lâmina de água de 5mm em um recipiente e determinar a quantidade de água absorvida em tempos pré-estabelecidos. Para o ensaio de absorção com álcool foi adotado o procedimento utilizado pelo grupo ValoRes, mencionado por SANTOS (2006), que consiste na medida da variação da altura em função do tempo de uma coluna de álcool contida em um tubo de Mariotte graduado, sendo que esta variação da altura da coluna de água está diretamente relacionada com a quantidade de álcool absorvida pela amostra. Logo, a carga hidráulica no tubo é nula.

Para minimizar o efeito da evaporação de água ou álcool através da superfície do corpo-de-prova as amostras tiveram suas faces laterais envolvidas com filme de PVC. O aparato utilizado para a realização do ensaio de absorção de água e álcool está ilustrado nas figuras 26, 27 e 28.

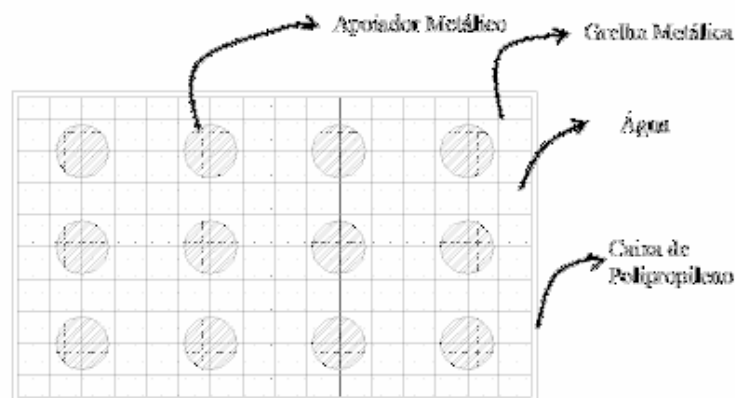


Figura 26 – Aparato de ensaio de absorção de água por capilaridade – vista superior (Andrade, 2004)



Figura 27 – Aparato de ensaio de absorção de água por capilaridade – vista lateral (Andrade, 2004)



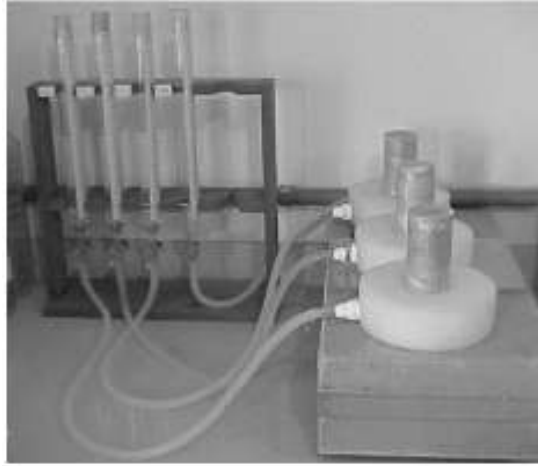


Figura 28 – Aparato de ensaio de absorção de álcool por capilaridade (Santos,2006)

Através do ensaio de absorção capilar com álcool pode-se conhecer o ângulo de molhamento aparente entre o líquido molhante utilizado e a parede do capilar da amostra. Em relação à água, o álcool é considerado um líquido perfeitamente molhante, ou seja, ângulo de molhamento aparente igual a zero. O ângulo de molhamento aparente pode-se determinado através da equação 20.

$$\cos \alpha_e = \left( \frac{S_e}{S_a} \right)^2 \frac{\mu_e \cdot \sigma_a}{\mu_a \cdot \sigma_e} \quad (20)$$

Onde:

$\alpha_e$  = ângulo de molhamento aparente;

$\mu_e$  = viscosidade dinâmica da água (centipoise);

$\mu_a$  = viscosidade dinâmica do álcool (centipoise);

$\sigma_e$  = tensão superficial água-ar (dynes/cm);

$\sigma_a$  = tensão superficial álcool-ar (dynes/cm);

$S_e$  = inclinação da reta do gráfico que relaciona a absorção de água (St) com a raiz do tempo;

$S_a$  = inclinação da reta do gráfico que relaciona a absorção de álcool (St) com a raiz do tempo

Os valores de viscosidade, tensão superficial e densidade da água e álcool utilizados para a determinação do ângulo de molhamento aparente são apresentados na tabela 20.

Tabela 20 – Parâmetros característicos dos líquidos utilizados na absorção capilar (T = 20°C)

Líquido	$\sigma$ (dynes/cm)	$\mu$ (centipoise)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
Água	72,75	1,005	1,000
Álcool	23,04	1,2	0,789

### 3.5.5.2 Resistência à tração na flexão

A execução do ensaio de resistência à tração na flexão seguiu os procedimentos da norma NBR 13279 (2005). O equipamento utilizado para o ensaio de flexão foi da marca EMIC, localizado no laboratório CERMAT da Engenharia Mecânica da UFSC.

O ensaio foi executado aplicando uma carga de  $50 \pm 10$  N/s até a ruptura do corpo-de-prova prismáticos de dimensão 160x160x40mm. A resistência à tração na flexão é calculada de acordo com a equação 21 apresentada pela norma.

$$R_t = \frac{1,5F_t L}{40^3} \quad (21)$$

onde:

$R_t$  é a resistência à tração na flexão, em MPa;

$F_t$  é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em N;

$L$  é a distância entre os suportes, igual a 100mm.

### 3.5.5.3 Resistência à compressão axial

Após o ensaio de resistência à flexão, as duas metades dos corpos-de-prova prismáticos foram utilizadas para determinar a resistência à compressão. O ensaio foi realizado no mesmo equipamento utilizado para o ensaio de flexão aplicando uma carga de  $500 \pm 50$  N/s até a ruptura do corpo-de-prova. A carga é aplicada sobre uma área igual a 40x40mm. A resistência à compressão é calculada segundo a equação 22 apresentada pela norma.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (22)$$

onde:

$R_c$  é a resistência à compressão, em MPa;

$F_c$  é a Carga máxima aplicada, em N;

1600 é a área da seção considerada quadrada do dispositivo de carga 40mm x 40mm, em  $\text{mm}^2$ .

Os equipamentos utilizados para determinar a resistência à tração na flexão e resistência à compressão são apresentados na figura 29.



Figura 29 – Equipamentos utilizados para o ensaio de resistência à tração na flexão e resistência à compressão

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

#### 4.1.1 Composição química

As tabelas 21 a 24 apresentam os resultados da análise química por EDX para os agregados reciclados finos e cimento utilizados.

Tabela 21 – Composição química do agregado miúdo reciclado bruto (%)

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	SO <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	MnO	SrO
<b>RCD Bruto</b>	30,17	62,76	0,71	0,53	5,42	0,37	0,009	0,02	0,02

Tabela 22 – Composição química do agregado miúdo reciclado calcinado a 800°C (%)

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	SO <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	MnO	Rb <sub>2</sub> O	SrO
<b>RCD 800°C</b>	33,11	57,61	1,42	0,72	6,65	0,44	0,02	0,02	0,003	0,022

Tabela 23 – Composição química do agregado miúdo reciclado calcinado a 600°C (%)

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	Rb <sub>2</sub> O	SrO
<b>RCD 600°C</b>	31,54	61,84	0,85	0,53	4,60	0,11	0,47	0,01	0,01	0,02	0,002	0,01

Tabela 24 – Características químicas do cimento CP II – F (%)

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	CaO livre
<b>CP II-F</b>	18,85	4,30	2,64	59,55	5,01	3,05	1,55

Fonte: Relatório de Ensaio de cimento 2008

De acordo com as tabelas acima, observa-se que os agregados reciclados são compostos principalmente de óxido de silício (SiO<sub>2</sub>), óxido de cálcio (CaO), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. A origem das espécies químicas SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dos agregados de RCD reciclados está associada aos diversos tipos de silicatos, provenientes das partículas de pasta de cimento endurecida e de agregados naturais, rochas naturais, cerâmica vermelha, etc. (ANGULO, 2005).

Os compostos principais são praticamente similares àqueles encontrados por diversos autores no estudo com agregado miúdo reciclado (TOLEDO *et al*, 2007; BARONIO & BINDA, 1996; FARIAS FILHO *et al*, 2006; LIMBACHIYA, M.C.; MARROCCHINO, E, KOULOURIS, A., 2007).

A figura 30 apresenta o difratograma com a identificação das fases mineralógicas dos agregados reciclados (bruto e calcinado) passantes na peneira de abertura 0,15mm, determinados a partir do ensaio de difração de raios-x.

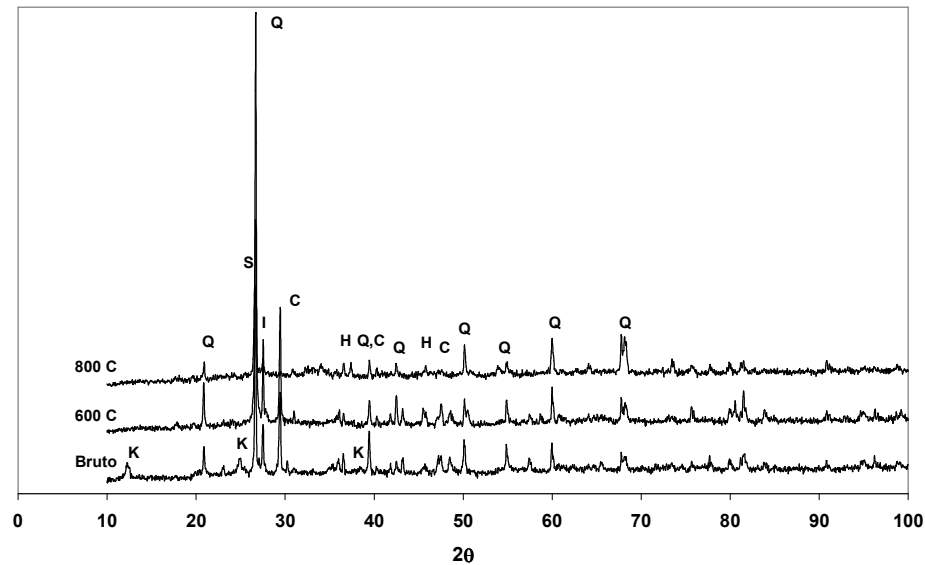


Figura 30 – Difratoograma para o agregado reciclado de RCD bruto e calcinado

Q: Quartzo –  $\text{SiO}_2$   
 H – Hematita –  $\text{Fe}_2\text{O}_3$   
 C: Calcita –  $\text{CaCO}_3$   
 I: Ilita –  $(\text{K},\text{H}_3\text{O}) \text{Al}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10} (\text{OH})_2$   
 K: Caulinita –  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$   
 S: Silimanita –  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$

Como observado na figura 30, os agregados reciclados são predominantemente compostos de sílica, calcita, ilita e hematita. A identificação da ilita é devido à presença de materiais cerâmicos nas partículas finas e a calcita devido à presença de materiais cimentícios na composição dos agregados reciclados. A presença de caulinita nos agregados miúdos reciclados brutos é um indicativo importante na característica das argilas utilizadas como pozolanas.

No processo de calcinação do agregado miúdo reciclado teve-se a seguinte variação na mineralogia predominante do material bruto:

- descarbonatação da calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) nas amostras calcinadas a  $800^\circ\text{C}$ ;
- transformação da fase  $\alpha$  para  $\beta$  da  $\text{SiO}_2$ ;
- perda de hidróxidos da caulinita a  $600^\circ\text{C}$ ;
- transformação da caulinita presente no agregado reciclado bruto em metacaulina.

Alguns efeitos são comprovados pelo termograma obtido pela análise térmica diferencial (ATD), apresentada na figura 31 para os agregados reciclados finos inferiores a  $150\mu\text{m}$ .

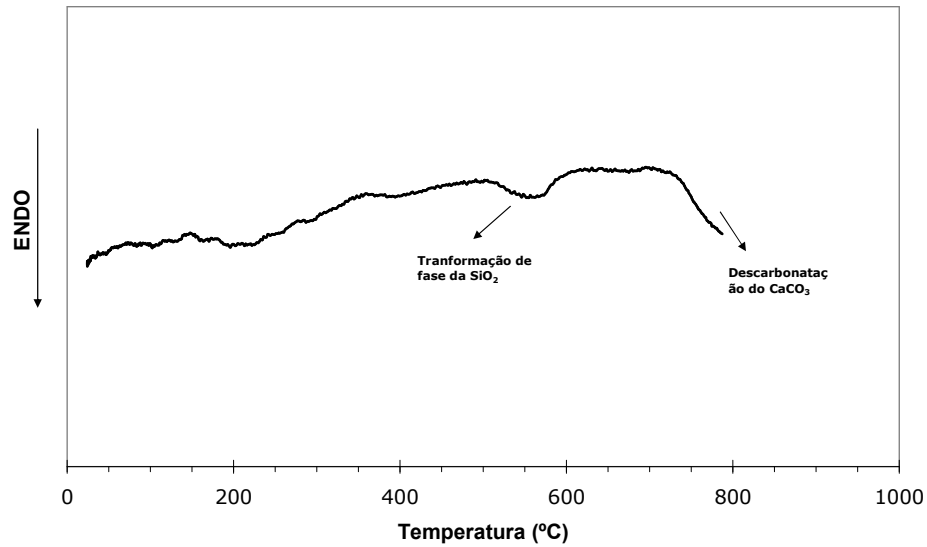


Figura 31 – Termograma obtido do ensaio da ATD para os agregados reciclados finos

De acordo com a figura 31, observa-se os efeitos da calcinação dos agregados reciclados finos, com a transformação do quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) da fase  $\alpha$  para a fase  $\beta$  a uma temperatura de aproximadamente  $573^\circ\text{C}$  e a descarbonatação da calcita a uma temperatura de  $750^\circ\text{C}$ . Os termogramas da análise térmica diferencial para os materiais calcinados a  $600^\circ\text{C}$  e  $800^\circ\text{C}$  estão apresentados no anexo.

#### 4.1.2 Identificação dos metais pesados presentes nos agregados reciclados

A tabela 25 apresenta as análises químicas, referentes aos ensaios de lixiviação e solubilização dos agregados miúdos e graúdos reciclados utilizados.

Tabela 25 – Análise química dos ensaios de lixiviação e solubilização dos agregados reciclados

Elementos	Solubilização (mg/L)		Lixiviação (mg/L)	
	FINO	B0	FINO	B0
As	6,00	7,70	5,26	6,88
Ca	178,54	151,58	2080,43	959,51
Cd	16,88	14,16	15,46	10,09
Cl	3612,31	3280,12	2547,36	2220,93
Cr	15,38	23,32	0,00	0,00
Cu	26,74	23,59	17,74	23,04
Fe	24,96	19,65	16,78	20,41
Mn	21,79	16,76	19,43	11,94
Nb	5,02	4,83	4,38	5,83
Ni	8,13	7,37	10,53	6,76
Rb	4,81	4,91	6,94	6,74
Se	14,06	7,49	0,00	6,39
Sn	11,91	15,45	11,05	13,84
Sr	5,09	6,93	15,28	9,88

Elementos	Solubilização (mg/L)		Lixiviação (mg/L)	
	FINO	B0	FINO	B0
Ti	ND	33,80	26,50	0,00
V	ND	16,49	0,00	0,00
Y	9,17	4,43	6,92	5,33
Zr	4,65	4,13	7,12	6,67
Zn	16,15	10,12	12,30	9,92

FINO: agregado miúdo reciclado  
B0: agregado graúdo reciclado

(cont. tabela25)

Como observado na tabela 25, a concentração dos elementos analisados foi maior nos agregados miúdos reciclados em comparação aos agregados graúdos reciclados.

A presença de **Ca** foi devida basicamente aos carbonatos presentes no material cimentício e o **Fe** à presença da hematita presente na parcela cerâmica e argila nos agregados reciclados. A presença de metais pesados (**Zn**, **Cr**) nos agregados reciclados é um fator negativo, devido a que pode interferir na hidratação do cimento, assim como, na resistência final da mistura (STEPHAN, D. *et al*; 1999).

#### 4.1.3 Composição granulométrica

A análise granulométrica dos agregados miúdos reciclados e naturais, realizada de acordo com a norma NBR NM 248 (2003), é apresentada na figura 32.

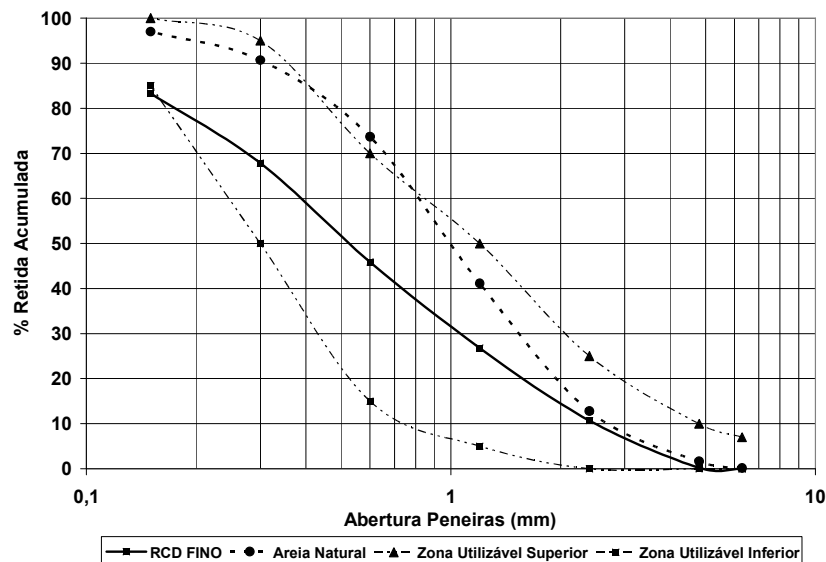


Figura 32 – Curva granulométrica do agregado miúdo reciclado e natural

Conforme apresentado na figura 32, os agregados apresentam uma distribuição contínua, enquadrando-se na zona utilizável determinada pela NBR 7211 (2005) para os agregados

miúdos. De acordo com a norma antiga NBR 7211 (1983) pode-se classificar os agregados miúdos reciclados e naturais como areia média. Como já comentado realizou-se a correção da granulometria do agregado miúdo natural através de peneiramento, a fim de ter mesma distribuição nas misturas que foram estudadas.

Para os agregados graúdos, a figura 33 apresenta a distribuição granulométrica do agregado graúdo natural e reciclado utilizado.

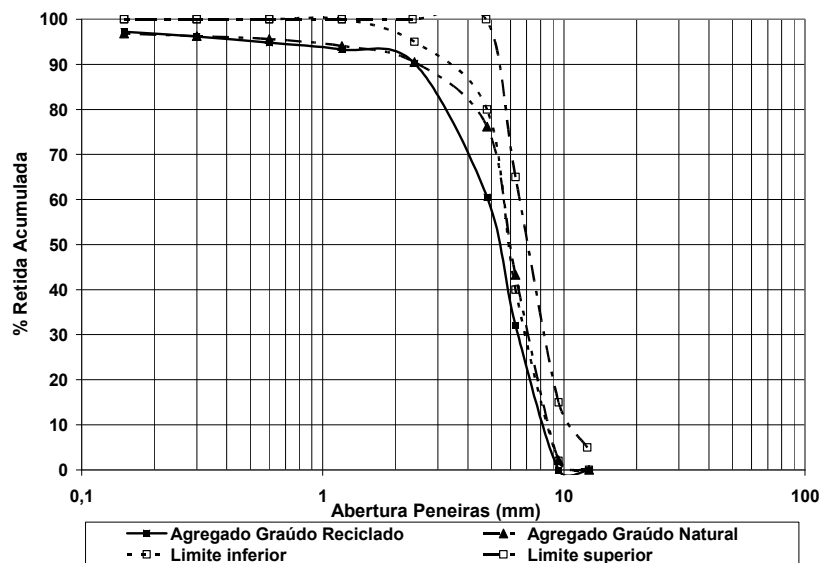


Figura 33 – Curva granulométrica do agregado graúdo natural e reciclado

Como observado na figura 33, o agregado graúdo não se enquadra completamente dentro da faixa 4,75/12,5 apresentado pela norma NBR 7211 (2005), já para a norma antiga NBR 7211 (1983) pode ser classificada como uma brita 0 (zero).

A distribuição granulométrica do agregado graúdo natural também foi corrigida através de peneiramento, para obter uma distribuição equivalente à composição granulométrica dos agregados graúdos reciclados nas misturas M4 e M5 apresentado na metodologia.

Da análise dos dados da composição granulométrica dos agregados, têm-se os principais parâmetros apresentados na tabela 26.



Tabela 26 – Principais parâmetros obtidos da granulometria dos agregados

Parâmetro/Material	Agregado miúdo reciclado	Areia Natural	Agregado graúdo reciclado	Agregado graúdo natural
D60	0,39	0,80	4,90	5,50
D30	1,20	1,60	6,50	7,00
D10	2,50	2,70	8,10	8,50
Coefic. Unif. (Cu)	0,156	0,296	0,605	0,647
Coefic. Curv. (Cc)	1,477	1,185	1,064	1,048
% < 150µm	16,7	3,0	2,7	3,1
% < 4,8mm	100	100	39,5	23,8

Obs: D60, 30 e 10: diâmetro através do qual 60%, 30% e 10% do material total passa na peneira de malha equivalente.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

De acordo com a tabela 26, percebe-se uma grande parcela de material passante na peneira de abertura 0,15mm nos agregados reciclados finos em relação ao agregado miúdo natural. Esta grande quantidade de finos apresenta uma maior superfície específica, conseqüentemente uma maior quantidade de água na mistura. Esses valores são superiores àqueles encontrados por outros pesquisadores (KHATIB, 2005; POON & CHAN, 2007; BINICI, 2006) onde a parcela média de material passante na peneira 150µm foi de 10%.

Os agregados graúdos reciclados apresentam 39% do material passante na peneira de abertura 4,8mm, bem superior ao agregado graúdo natural que tem 23% de material passante. Esses valores são bem superiores àqueles apresentados por outros pesquisadores (CHEN *et al*, 2003; DEBIEB, 2007), mas similares àqueles estudados por ANGULO (2005).

Em relação aos valores dos coeficientes de uniformidade (Cu) e curvatura (Cc), todos os agregados reciclados e naturais caracterizaram-se por serem bastante uniformes (Cu < 5) e bem graduados (1 < Cc < 3).

#### 4.1.4 Parâmetros físicos dos agregados

A tabela 27 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização quanto aos parâmetros físicos dos agregados utilizados (areia natural, agregado miúdo reciclado, agregado graúdo natural e reciclado).

Tabela 27 – Ensaio de caracterização dos agregados reciclados e naturais

<b>Parâmetro/Material</b>	<b>Agregado miúdo reciclado</b>	<b>Areia Natural</b>	<b>Agregado graúdo reciclado</b>	<b>Agregado graúdo natural</b>
Massa Específica (kg/dm <sup>3</sup> )	2,515	2,614	2,52	2,621
Massa Unitária (kg/dm <sup>3</sup> )	1,156	1,522	1,093	1,443
Dimensão Máxima (mm)	4,8	4,8	6,3	9,5
Dimensão Mínima (mm)	< 0,15	0,15	0,30	0,60
Classificação (NBR 7211/83)	Média	Média	B0	B0
Módulo de Finura	2,40	3,17	5,41	5,52
Material Pulverulento (%)	10,0	2,0	4,8	2,6
Absorção de água (%)	10,6*	3,7*	10,1**	2,8**
Abs. de água mat calc.(600°C) (%)	11,8*	*****	*****	*****

\*Absorção de água de acordo com a NBR NM 30

\*\*Absorção de água de acordo com a NBR NM 53

De acordo com a tabela 27 apresentada acima, percebe-se que os valores tanto da brita natural quanto da areia natural, encontram-se dentro dos patamares aceitáveis para sua aplicação em concretos. No caso dos agregados reciclados, sua massa específica e massa unitária apresentam valores 4% e 31,6% menores em relação aos agregados miúdos naturais. Devido a essa diferença, as substituições dos agregados reciclados pelas naturais foram feitas em volume, como comentado na metodologia.

A presença de material pulverulento nos agregados miúdos reciclados é 5 (cinco) vezes maior do que nos agregados miúdos naturais, bem superior aos valores recomendados pelas normas. A norma NBR 7219 (1982) – Determinação do teor de materiais pulverulentos nos agregados – fixa os valores máximos dos materiais passantes na peneira de abertura 0,075mm em 3% para concretos submetidos a desgaste superficial e 5% para os demais concretos. Em relação as recomendações das normas internacionais, a RILEM (1994) estabelece um limite de 3% para partículas inferiores a 80µm para os agregados reciclados.

Para os agregados graúdos reciclados, as normas internacionais RILEM (1994) e DIN 4226-100 (2002) não recomendam a presença de partículas inferiores a 4,8mm nos agregados graúdos reciclados para produção de concretos.

A absorção do material granular na condição saturada superfície seca, também foi maior para o caso dos agregados reciclados, considerando a mesma distribuição granulométrica. Este fator também poderá levar a um aumento do consumo de água na mistura, para manter a mesma consistência da mistura.

O processo de calcinação dos finos inferiores a 0,15mm provocou um pequeno aumento na

absorção das partículas finas. A absorção dos agregados miúdos reciclados encontrados foi menor em comparação aos outros autores (KHATIB, 2005; POON & CHAN, 2007), que chegaram a um valor médio de 14% de absorção de água do material reciclado.

Os valores da absorção para os agregados graúdos reciclados também mostraram a mesma tendência dos agregados miúdos reciclados, sendo a absorção dos agregados graúdos reciclados 4 (quatro) vezes maior em relação aos agregados graúdos naturais. Esses valores são compatíveis em relação aos estudos realizados por outros pesquisadores (CORREIA, 2006; POON *et al*, 2004). Em comparação às recomendações da RILEM (1994) os valores de absorção encontraram-se dentro dos limites recomendados para os agregados reciclados que é de 20%.

Durante o processo da calcinação foi determinada a perda de massa ao fogo dos agregados reciclados finos. A tabela 28 apresenta os valores de perda de massa ao fogo do material durante esse processo de calcinação na mufla nas duas temperaturas (600° e 800°C).

Tabela 28 – Perda de massa ao fogo no processo de calcinação

<b>Temperatura de calcinação</b>	<b>Perda de massa ao fogo (%)</b>
600°C	6,02
800°C	12,84

A perda ao fogo pode estar associada a vários fatores: a) liberação da água de constituição e dos silicatos de cálcio hidratado e b) liberação de água dos argilominerais provenientes dos solos, cerâmicas queimadas abaixo de 500°C e rochas naturais como granitos e feldspatos.

A perda de massa ao fogo dos finos calcinados a 800°C teve valores superiores, pois nessa temperatura, ocorre o início da descarbonatação do carbonato de cálcio presente nos agregados reciclados.

#### **4.1.5 Absorção capilar granular**

Com o objetivo de analisar a cinética de absorção dos agregados utilizados, foram realizados ensaios de absorção capilar granular dos agregados miúdos natural, agregado miúdo reciclado bruto e calcinado, utilizando uma distribuição granulométrica similar para os dois agregados.

Para a realização do ensaio partiu-se do pressuposto do que os agregados reciclados apresentariam maior absorção capilar devido a sua elevada porosidade e forma irregular dos grãos.

Através da realização do ensaio de absorção capilar granular foram obtidos vários parâmetros, tais como, absorção final de cada mistura, sorptividade, teor de umidade volumétrica e mássica. A figura 34 apresenta a evolução do índice de absorção capilar para as misturas estudadas em relação à raiz do tempo.

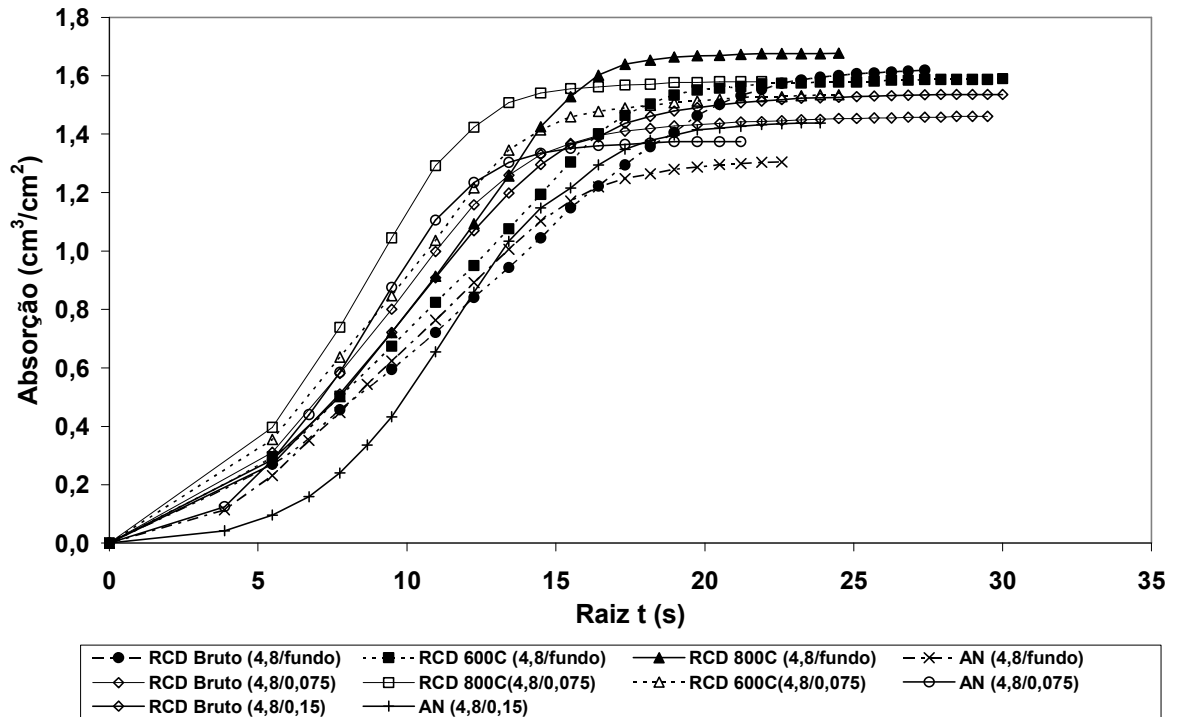


Figura 34 – Índice de absorção de água por capilaridade em materiais granulares

A tabela 29 apresenta os resultados dos parâmetros analisados no ensaio de absorção capilar granular para os agregados e misturas em estudo.

Tabela 29 – Resultados da absorção capilar granular dos agregados miúdos

Mistura	$\delta s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\delta u$ (g/cm <sup>3</sup> )	Vol. água final (cm <sup>3</sup> )	Abs. Final (%)	Abs. Final (g/cm <sup>2</sup> )	S (sorpt.) x 10 <sup>-2</sup> (cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> /s <sup>1/2</sup> )	% Umidade volum.	% Umidade mássica
REF_AN (4,8/fundo)	1,52	1,85	106,64	21,59	1,31	9,72	32,63	21,46
REF_AN (4,8/0,075)	1,49	1,83	112,29	22,76	1,37	15,2	34,35	23,05
REF_AN (4,8/0,15)	1,48	1,84	117,56	24,74	1,44	13,7	35,82	24,23
RCD Bruto (4,8/fundo)	1,23	1,64	132,29	32,48	1,62	8,46	35,47	30,78
RCD Bruto (4,8/0,075)	1,21	1,58	119,41	30,60	1,46	12,21	36,53	31,20
RCD Bruto (4,8/0,15)	1,21	1,59	125,54	31,85	1,54	11,84	36,53	32,20
RCD 600°C (4,8/fundo)	1,22	1,62	118,10	30,31	1,45	8,14	36,13	29,50
RCD 600°C (4,8/0,075)	1,21	1,62	125,42	34,06	1,53	12,58	38,37	31,69
RCD 800°C (4,8/fundo)	1,25	1,66	137,08	33,27	1,68	13,64	37,94	33,58
RCD 800°C (4,8/0,075)	1,23	1,64	129,10	33,26	1,58	15,62	39,50	34,16

$\delta s$  = massa unitária no estado seco

$\delta u$  = massa unitária no estado úmido

S = sorptividade

A determinação do conteúdo de água absorvida revelou que a umidade final para os agregados reciclados foi maior em relação aos agregados naturais, devido à elevada porosidade dos grãos dos agregados reciclados, considerando-se a mesma distribuição granulométrica para os dois agregados. Essa variação pode chegar a 50% considerando-se os agregados com granulometria original. Dessa forma, o aumento do índice de absorção é mais considerável quando o agregado reciclado miúdo for utilizado, por resultar em um sistema com maior porosidade entre grãos, bem como maior potencial de absorção do próprio grão.

Na comparação entre os materiais reciclados, percebe-se que a quantidade de água absorvida para os agregados calcinados foi aproximadamente 5% maior em relação aos agregados brutos. Com isso, pode-se afirmar que o processo de calcinação dos finos causou um pequeno aumento na porosidade intrínseca dos finos.

O ensaio também foi realizado a fim de considerar a influência da dimensão mínima do grão na mistura. Pode-se observar que quando a dimensão mínima do grão é reduzida, a quantidade de água absorvida na mistura também diminui. Isto é devido a que as partículas menores preenchem os espaços entre os grãos reduzindo os vazios, levando a uma menor absorção final.

A presença de agregados reciclados também possibilitou uma mudança no teor de umidade volumétrica e mássica da mistura. Os teores de umidade aumentaram com a retirada dos finos da mistura, seja para agregados naturais como agregados reciclados.

A sorptividade determinada através das inclinações dos trechos retilíneos das curvas de absorção, são maiores nos agregados reciclados em relação ao agregado natural, caracterizando novamente o maior potencial de absorção dos agregados reciclados.

As figuras 35, 36 e 37 apresentam a evolução da cinética de absorção das misturas analisadas.

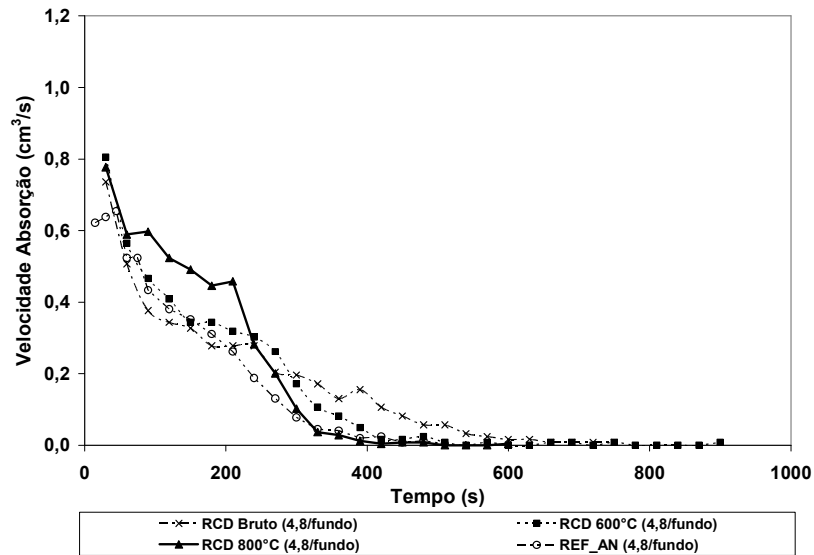


Figura 35 – Evolução da cinética de absorção de água por capilaridade - 4,8/fundo

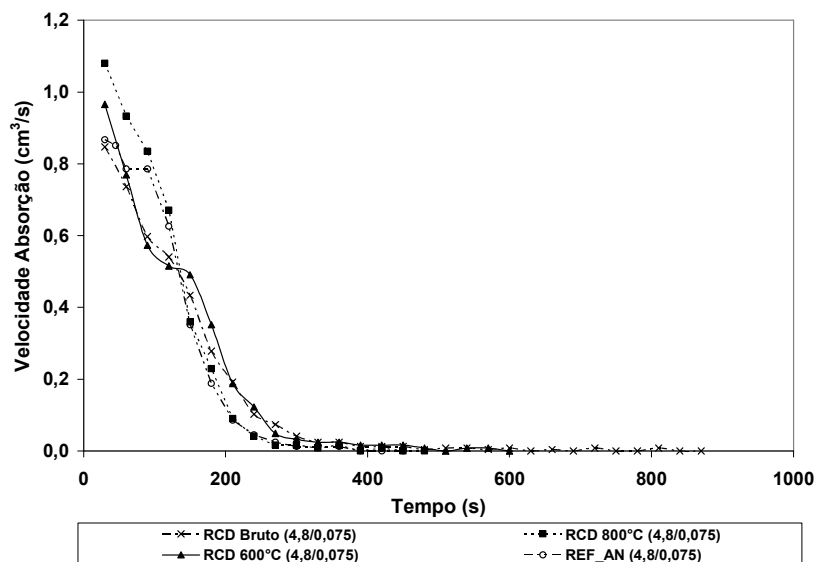


Figura 36 – Evolução da cinética de absorção de água por capilaridade - 4,8/0,075

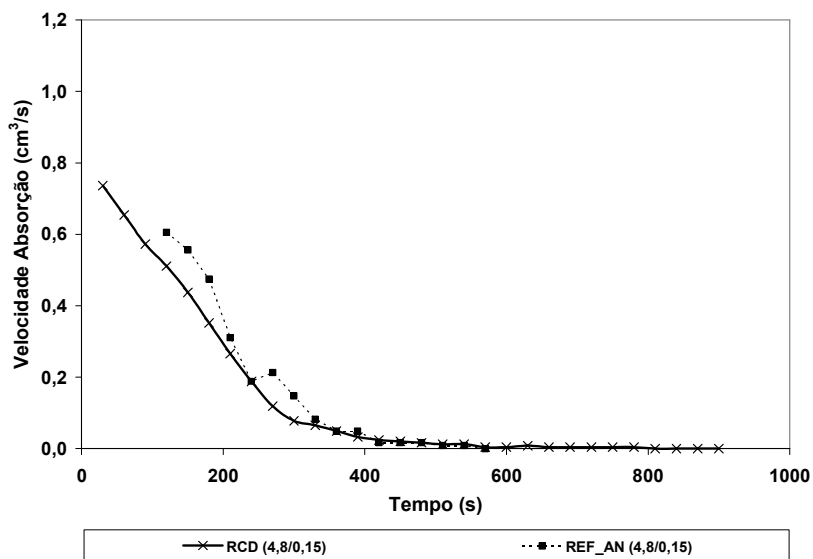


Figura 37 – Evolução da cinética de absorção de água por capilaridade - 4,8/0,15

Pela análise das figuras 35, 36 e 37, percebe-se que a cinética de absorção de água por capilaridade para os agregados reciclados foi maior em comparação aos agregados naturais. A maior porosidade intrínseca dos agregados reciclados possibilita uma absorção mais rápida em relação aos agregados naturais. As misturas com dimensão mínima igual a 0,15mm apresentaram velocidade menor em relação às misturas com dimensão do grão inferior, devido a que apresentam capilares maiores diminuindo assim a sua velocidade. Com a adição de partículas finas na mistura, a velocidade de absorção aumenta, mas em compensação a absorção final diminui.

Diante dos resultados obtidos, pode-se afirmar que os agregados reciclados promovem uma modificação na taxa de absorção e cinética de absorção das misturas em relação aos agregados miúdos naturais.

#### 4.1.6 Reconstituição de Traço do agregado miúdo reciclado

Visando quantificar a presença de argamassa no agregado miúdo reciclado, foi realizada a reconstituição de traço através do ataque com ácido clorídrico. Para a realização do ensaio foi fixado o tempo de 24 horas de repouso para os agregados reciclados imersos em ácido clorídrico. Contudo, percebeu-se ainda a presença de argamassa, deixando-se por mais 24 horas em uma nova solução de ácido clorídrico.

Após as 48 horas, verificou-se uma separação completa da argamassa no agregado reciclado, procedeu-se a lavagem e secagem na estufa até constância de massa. A tabela 30 apresenta os resultados do ensaio com o ataque de ácido nos agregados miúdos reciclados.

Tabela 30 – Resultados de reconstituição de traço do agregado reciclado

<b>Amostras</b>	<b>Massa Inicial (g)</b>	<b>Massa Final (g)</b>	<b>% de argamassa</b>
Amostra 1	200,0	167,8	16,1
Amostra 2	210,6	172,7	18,0
Média	-----	-----	17,1

Como apresentado na tabela 30, aproximadamente 17% dos agregados miúdos reciclados é composto de argamassa, sendo a maior parte composto de materiais cerâmicos ou agregados naturais, como constatado nos ensaios de composição química dos agregados miúdos reciclados.

## 4.2 ANÁLISE DAS COMPOSIÇÕES INICIAIS

### 4.2.1 Verificação da atividade pozolânica dos agregados reciclados finos

O estudo inicial refere-se à verificação da atividade pozolânica do material fino passante na peneira de abertura 0,15mm, de acordo com a metodologia proposta pelo laboratório ValoRes da UFSC. A tabela 31 apresenta os traços e as porcentagens de cada material em massa, utilizado para a confecção das pastas.

Tabela 31 – Traço utilizado utilizados no ensaio da determinação da reatividade pozolânica

% Subst.	Traço (Ca(OH) <sub>2</sub> : SiO <sub>2</sub> : RCD)	Total Massa seca (g)	% Ca(OH) <sub>2</sub>	% SiO <sub>2</sub>	% RCD	% Água
REF	1:1:0:0,60	200,0	50,0	50,0	0,0	60,0
25	1:0,75:0,25:0,60	200,0	50,0	37,5	12,5	60,0
50	1:0,5:0,5:0,60	200,0	50,0	25,0	25,0	60,0
75	1:0,25:0,75:0,60	200,0	50,0	12,5	37,5	60,0
100	1:0:1:0,60	200,0	50,0	0,0	50,0	60,0

Como apresentado na tabela 31, as quantidades de hidróxido de cálcio e água foram mantidas constantes para efeito de comparação. As pastas foram moldadas e armazenadas em sala com temperatura e umidade relativa controlada até o momento do ensaio. As figuras 38 a 41 apresentam os resultados da resistência à compressão dos corpos-de-prova cilíndricos 2x4cm, moldados com a pasta, para as 3 misturas estudadas em idade de 3, 7, 28 e 90 dias.

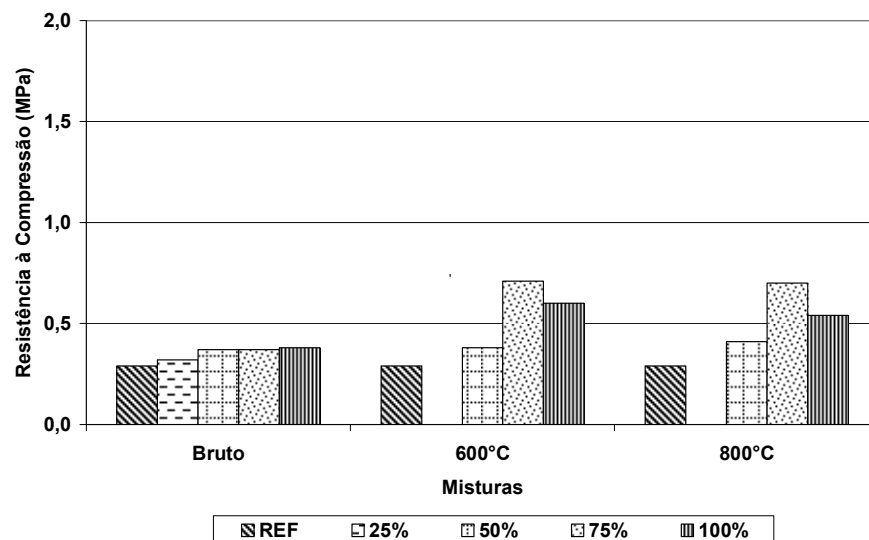


Figura 38 – Resistência à compressão das pastas aos 3 dias



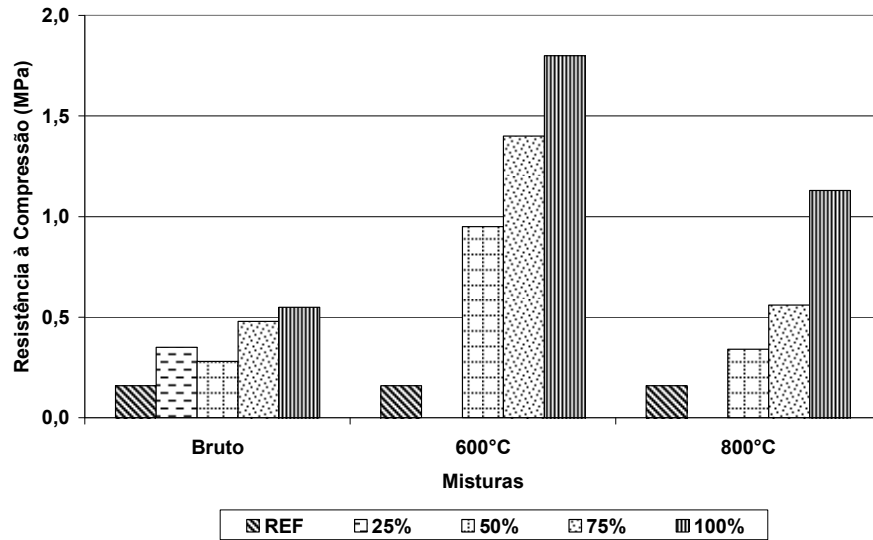


Figura 39 – Resistência à compressão das pastas aos 7 dias

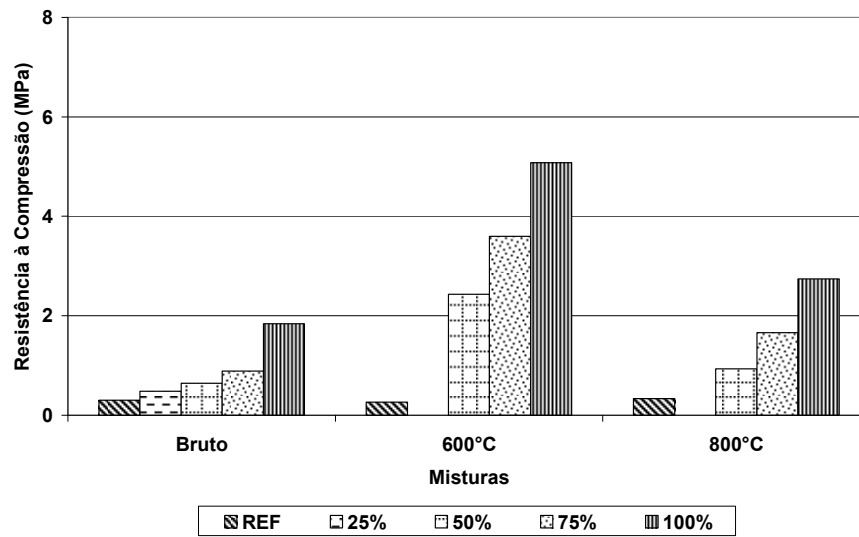


Figura 40 – Resistência à compressão das pastas aos 28 dias

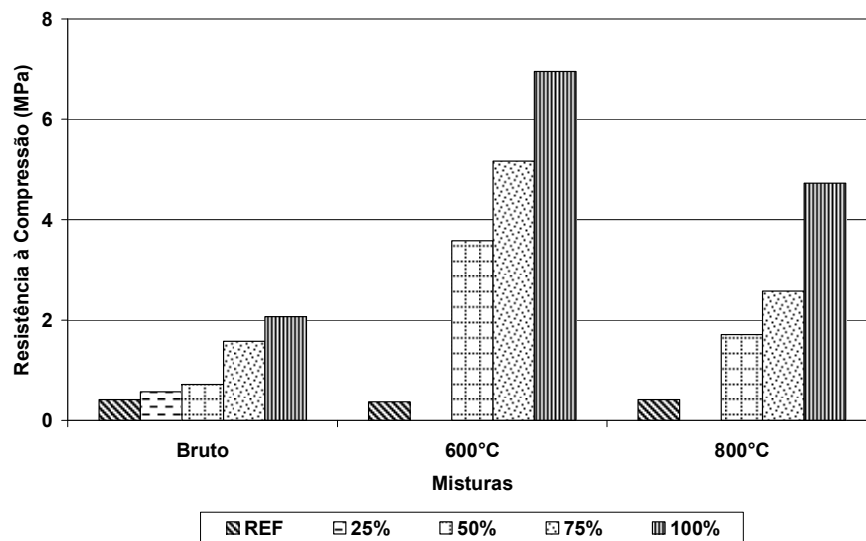


Figura 41 – Resistência à compressão das pastas aos 90 dias

Como observada nas figuras 38 a 41, foi verificado um aumento da resistência à compressão das pastas com o aumento do teor de substituição. A mistura com fino calcinado a uma temperatura de 600°C apresentou uma resistência à compressão maior em relação às outras misturas. Essa diferença chega a ser 3 vezes em relação às pastas com agregado bruto e 30% para as pastas com agregado calcinado a 800°C para 100% de substituição em idade de 90 dias. Em idades iniciais, a variação na resistência não é importante havendo uma diferença considerável em idades avançadas, onde a reação dos finos é maior com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  presente.

Determinadas as resistências das pastas, procedeu-se à moagem das pastas ensaiadas até o material passar completamente na peneira de abertura 0,15mm, para posteriormente analisar com ajuda da ATD. O comportamento dos termogramas típicos das amostras é apresentado na figura 42. Os termogramas restantes obtidos para todas as amostras e idades estão apresentados em Anexo.

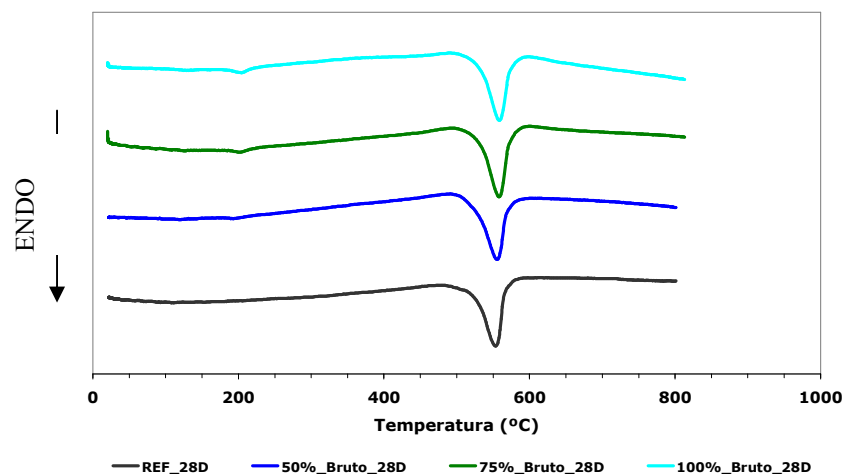


Figura 42 – Termogramas típicos das misturas com agregado reciclado fino bruto

Traçados os termogramas para cada mistura, vários parâmetros foram determinados como: as áreas dos picos característicos correspondente ao hidróxido de cálcio, perda de massa ao fogo e tempo de deflexão. A evolução do consumo de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , obtido através da equação 11, em relação com o teor de substituição é apresentado nas figuras 43 a 46 para todas as idades analisadas.

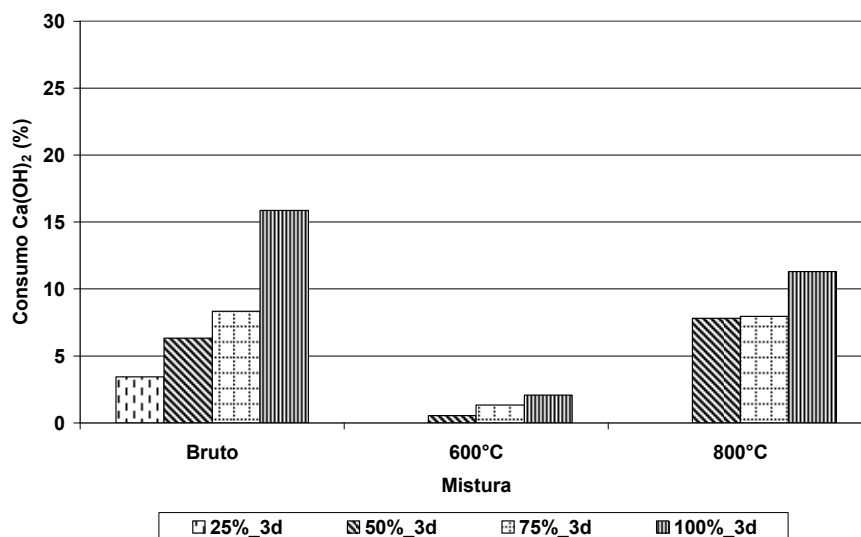


Figura 43 – Evolução do consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  das pastas aos 3 dias

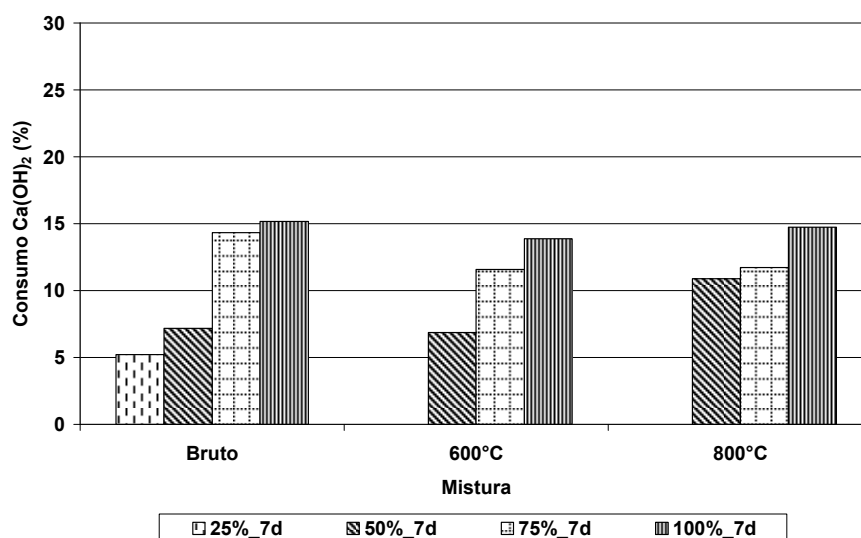


Figura 44 – Evolução do consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  das pastas aos 7 dias

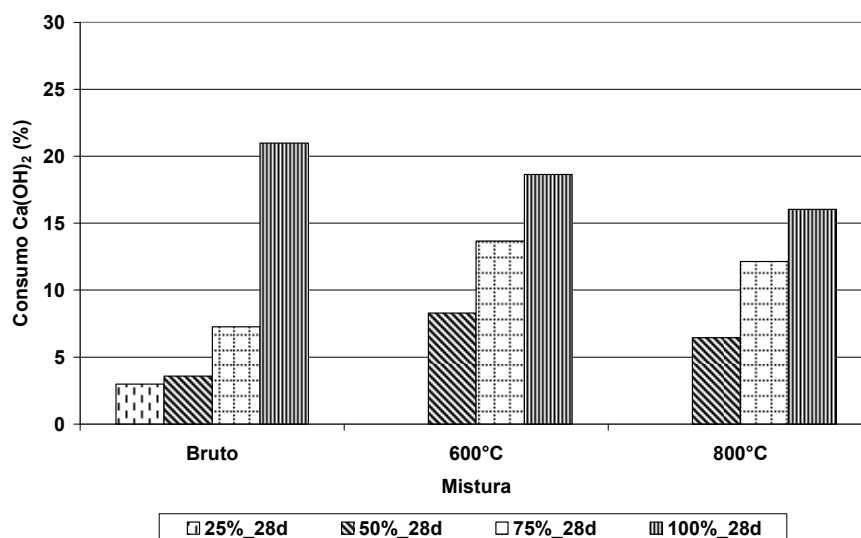


Figura 45 – Evolução do consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  das pastas aos 28 dias

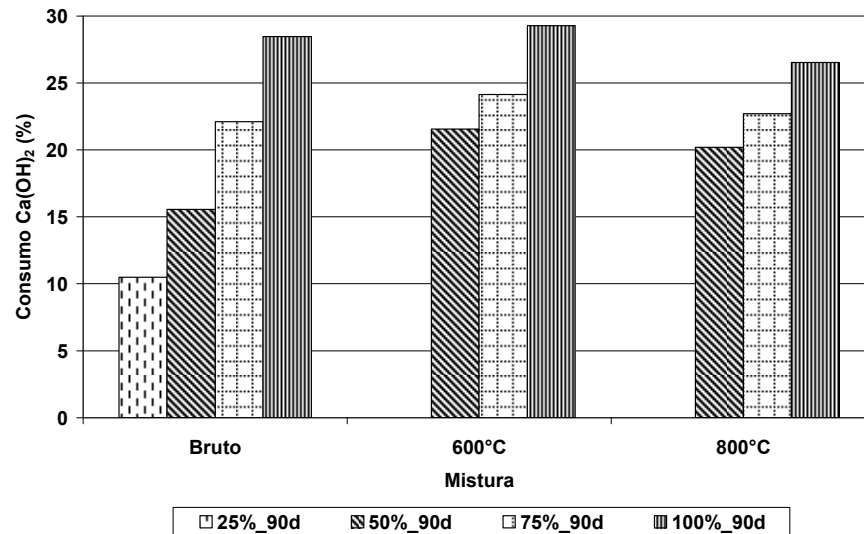


Figura 46 – Evolução do consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  das pastas aos 90 dias

Como apresentado nas figuras acima, o consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  aumentou com o teor de substituição do fino reciclado. O consumo não apresentou uma variação importante em idades iniciais em relação à referência, onde os agregados reciclados finos brutos obtiveram consumo maior em comparação aos finos calcinados. Aos 28 dias pode-se perceber uma diferença no consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  de até 20% em relação à referência. Em idades avançadas a reatividade do fino reciclado calcinado chega a ser 15% maior em relação aos agregados reciclados brutos, verificando-se assim um maior potencial de reação em idades avançadas. O consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  não apresentou a mesma proporção em relação à área dos picos nos termogramas, esperando-se um mesmo comportamento das misturas.

Analisando-se as duas temperaturas estudadas, a temperatura de calcinação a  $600^\circ\text{C}$  apresentou um consumo de hidróxido de cálcio um pouco maior em relação aos finos calcinados a  $800^\circ\text{C}$ . Essa variação foi de 16% para 28 dias e 10% para 90 dias com 100% de substituição. Com isso, foi decidido utilizar somente o material calcinado a  $600^\circ\text{C}$  para análise em misturas cimentícias na continuação da pesquisa.

As figuras 47 e 48 apresentam a correlação entre a resistência à compressão das pastas e o consumo de hidróxido de cálcio dos finos de RCD.

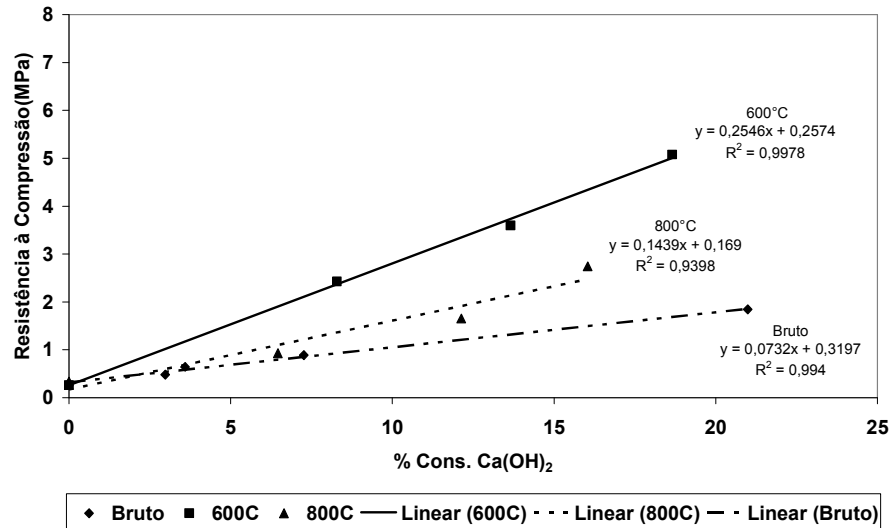


Figura 47 – Correlação entre a resistência à compressão e o consumo Ca(OH)<sub>2</sub> aos 28 dias

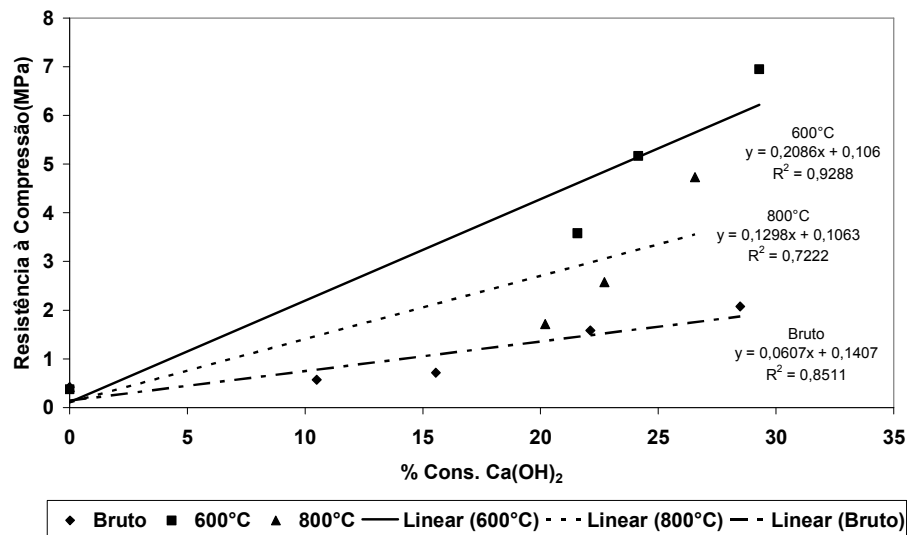


Figura 48 – Correlação entre a resistência à compressão e o consumo Ca(OH)<sub>2</sub> aos 90 dias

Como observado nas figuras 47 e 48, existe uma correlação linear entre a resistência à compressão e a porcentagem de consumo do hidróxido de cálcio da mistura. Os materiais pozolânicos reagem com o Ca(OH)<sub>2</sub> formando compostos resistentes na mistura, aumentando assim sua resistência aos esforços solicitados.

Outro parâmetro importante obtido do ensaio de análise térmica diferencial é a perda de massa ao fogo das misturas estudadas. A tabela 32 apresenta os valores de perda de massa ao fogo para os materiais utilizados para a confecção das pastas, determinados a partir do ensaio de análise térmica diferencial. As perdas de massa ao fogo das misturas com os teores de substituição correspondentes estão apresentadas em Anexo.

Tabela 32 – Perda de massa ao fogo determinados no ensaio de ATD

<b>Material</b>	<b>Perda de massa ao fogo (%)</b>
RCD bruto (<150µm)	8,19
RCD 800°C (<150µm)	1,48
RCD 600° (<150µm)	4,27
Sílica (<150µm)	7,74
Ca(OH) <sub>2</sub>	17,23

A perda ao fogo dos agregados de RCD está associada à transformação de fase da sílica presente e a descarbonatação da calcita. A perda de massa do hidróxido de cálcio está relacionada à sua decomposição a uma temperatura de aproximadamente 500°C como mostrado na figura 42.

#### 4.2.2 Índice de Atividade Pozolânica (IAP)

A determinação do índice de atividade pozolânica (IAP) foi realizada de acordo com a norma NBR 5752 (1992). A norma determina a atividade pozolânica com o cimento através da resistência de argamassas, considerando o material como pozolânico se atingir 75% da resistência em relação à referência. A tabela 33 apresenta as quantidades dos materiais utilizados nas misturas e as características das misturas.

Tabela 33 – Quantidade de material para o índice de atividade pozolânica

<b>Argamassa</b>	<b>Cimento (g)</b>	<b>Pozolana (g)</b>	<b>Areia Normal (g)</b>	<b>Água (g)</b>	<b>Água adic. (g)</b>	<b>a/mc</b>
<b>REFERENCIA 1:3</b>	400,0	0,0	1200,0	200,0	6,9	0,52
<b>BH - AGR FINO BRUTO</b>	260,0	121,7	1200,0	200,0	29,2	0,60
<b>BH - AGR FINO 800°C</b>	260,0	121,7	1200,0	200,0	27,8	0,60
<b>BH - AGR FINO 600°C</b>	260,0	121,7	1200,0	200,0	24,2	0,59

A tabela 34 apresenta os resultados da resistência à compressão das argamassas para a determinação da atividade pozolânica dos agregados reciclados finos.

Tabela 34 – Índice de atividade pozolânica dos agregados reciclados finos

<b>Argamassa</b>	<b>N</b>	<b>Força (kN)</b>	<b>Resistência (MPa)</b>	<b>Média (MPa)</b>	<b>D.P. (MPa)</b>	<b>C.V. (%)</b>	<b>IAP</b>
<b>REF</b>	1	80,20	40,85	42,14	1,44	3,42	1,00
	2	82,25	41,89				
	3	85,80	43,70				
<b>BRUTO</b>	1	46,25	23,55	23,47	0,36	1,55	0,56
	2	46,70	23,78				
	3	45,30	23,07				
<b>800°C</b>	1	54,55	27,78	26,21	1,41	5,38	0,62
	2	50,65	25,80				
	3	49,20	25,06				
<b>600°C</b>	1	55,05	28,04	27,60	0,75	2,72	0,65
	2	52,50	26,74				
	3	55,05	28,04				

Como apresentado na tabela 34, os agregados reciclados finos brutos apresentaram uma atividade pozolânica de 0,56 e 0,65 para os finos calcinados a 600°C. De acordo com estes resultados, os agregados reciclados finos não são considerados pozolânicos, devido a que não atingiram o índice pozolanicidade mínimo estipulado pela norma NBR 5752 (1992) que é de 0,75. Os agregados reciclados calcinados apresentaram um índice de atividade pozolânica maior do que os agregados brutos, verificando assim o efeito positivo da calcinação na pozolanicidade do material. Este método de comparação para as misturas não é o mais conveniente, devido a grande variação da relação a/mc final em comparação à mistura com agregados naturais.

O índice de atividade pozolânica dos agregados reciclados brutos foi similar aquele apresentado por MIRANDA, L.F.R; SELMO, S.M.S. (2006) que foi de 55,6% para blocos cerâmicos, inferior daqueles encontrados por LEITE (2001) que foi de 87,2%. Vários autores comentam que a atividade pozolânica varia em relação à composição dos agregados reciclados utilizados.

#### 4.3 COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS – TRAÇOS UTILIZADOS

A tabela 35 apresenta os traços finais para todas as misturas apresentadas na metodologia, confeccionadas para os concretos e argamassas. Todas as dosagens dos concretos e argamassas foram no estado seco, sem a utilização de aditivos plastificantes e a substituição do agregado reciclado em relação ao agregado natural foi feita em volume. O consumo teórico de cimento foi de 400 kg/m<sup>3</sup> para os concretos.

Tabela 35 – Traços finais utilizados nas misturas de concreto

Dosagem		Traço Unitário, em massa – Seca - RCD FINO*	Dosagem		Traço Unitário, em massa – Seca – RCD GRAÚDO**
0%		1 : 2,36 : 0,00 : 1,81 : 0,60	0%		1 : 2,36 : 1,81 : 0,00 : 0,60
M1	25%	1 : 1,77 : 0,56 : 1,81 : 0,60	M4	25%	1 : 2,36 : 1,36 : 0,44 : 0,60
	50%	1 : 1,18 : 1,12 : 1,81 : 0,60		50%	1 : 2,36 : 0,91 : 0,88 : 0,60
M2	75%	1 : 0,59 : 1,69 : 1,81 : 0,60	M5	75%	1 : 2,36 : 0,45 : 1,32 : 0,60
	100%	1 : 0,00 : 2,25 : 1,81 : 0,60		100%	1 : 2,36 : 0,00 : 1,76 : 0,60

\*Traço unitário = cimento: areia natural: areia RCD: brita natural: água

\*\*Traço unitário = cimento: areia natural: brita natural: brita RCD: água

A tabela 36 apresenta os traços finais utilizados para as argamassas com os diferentes teores de substituição analisados.

Tabela 36 – Traços finais das misturas de argamassas

Dosagem		Traço Unitário, em massa – Seca - RCD FINO*
0%		1 : 3,00 : 0,00 : 0,66
M1	25%	1 : 2,25 : 0,71 : 0,66
	50%	1 : 1,50 : 1,43 : 0,66
M2	75%	1 : 0,75 : 2,14 : 0,66
M3	100%	1 : 0,00 : 2,86 : 0,66

\*Traço unitário = cimento: areia natural: areia RCD: água

Conhecendo-se o traço final das misturas e a massa específica pode-se calcular o consumo real de cimento para cada mistura. Os valores da massa específica dos concretos estão apresentados na figura 54. O consumo real de cimento pode ser calculado através da equação 23.

$$C_{cim} = \frac{\delta_{conc}}{1 + m + x} \quad (23)$$

onde:

$\delta_{conc}$ : massa específica do concreto ( $\text{kg/m}^3$ );

$m$ : traço dos agregados em massa ( $m = a_{nat} + a_{red} + p$ );

$x$ : relação água/cimento da mistura.

As tabelas 37 e 38 apresentam o consumo real por  $\text{m}^3$  de cimento para os concretos e argamassas.

Tabela 37 – Consumo real de cimento por  $\text{m}^3$  dos concretos

Dosagem	Consumo por $\text{m}^3$	Dosagem	Consumo por $\text{m}^3$
M1	0%	M4	0%
	25%		25%
	50%		50%
	75%		75%
	100%		100%
M2	0%	M5	0%
	25%		25%
	50%		50%
	75%		75%
	100%		100%
M3	0%		
	25%		
	50%		
	75%		
	100%		



Tabela 38 – Consumo real de cimento das argamassas

Dosagem		Consumo por m <sup>3</sup>	Dosagem		Consumo por m <sup>3</sup>
M1	0%	449,6	M3	0%	449,6
	25%	443,4		25%	447,8
	50%	445,8		50%	448,6
	75%	447,0		75%	449,0
	100%	442,4		100%	448,4
M2	0%	436,9			
	25%	439,2			
	50%	439,2			
	75%	435,6			
	100%	432,8			

Nota-se na tabela 37 que o consumo real de cimento por m<sup>3</sup> de concreto diminui com o aumento do teor de substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados, chegando a uma redução de 10% em relação a mistura de referência. Essa redução foi devida à variação na massa específica dos concretos, influenciando no consumo final de cimento. O consumo é maior no caso das misturas M1 e M3 em relação à mistura M2, na ordem de 3% para 100% de substituição. No caso dos concretos com agregado graúdo reciclado, o consumo de cimento foi 3,5% maior para os concretos M5 em relação aos concretos M4.

No caso das argamassas, o consumo de cimento não apresentou uma variação importante, encontrando-se no mesmo patamar para todos os teores analisados. A mistura M2 apresentou um consumo menor devido à menor massa específica.

#### 4.4 AVALIAÇÃO DAS MISTURAS NO ESTADO FRESCO

##### 4.4.1 Consistência na mesa de espalhamento

A avaliação da consistência das argamassas com agregados miúdos reciclados em substituição ao agregado miúdo natural, foi feita mediante o ensaio na mesa de espalhamento *Flow Table*. A medida do espalhamento da mistura foi realizada com 0, 5, 15 e 30 golpes. As figuras 49, 50 e 51 apresentam a evolução da consistência das argamassas com o aumento do teor de substituição, produzidas em função da substituição do agregado miúdo natural.

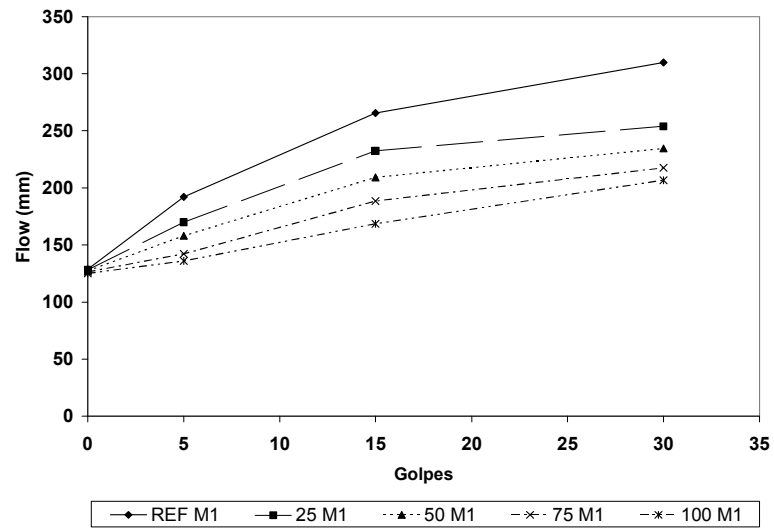


Figura 49 – Avaliação da consistência das argamassas – M1

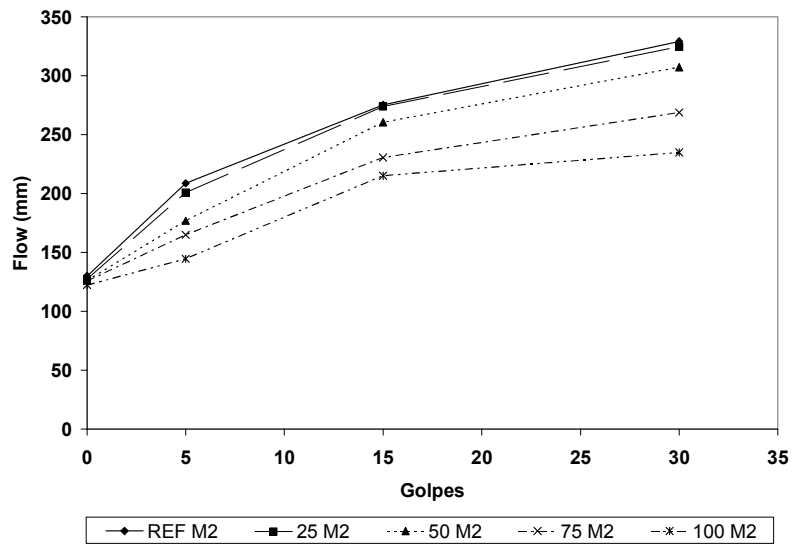


Figura 50 – Avaliação da consistência das argamassas – M2

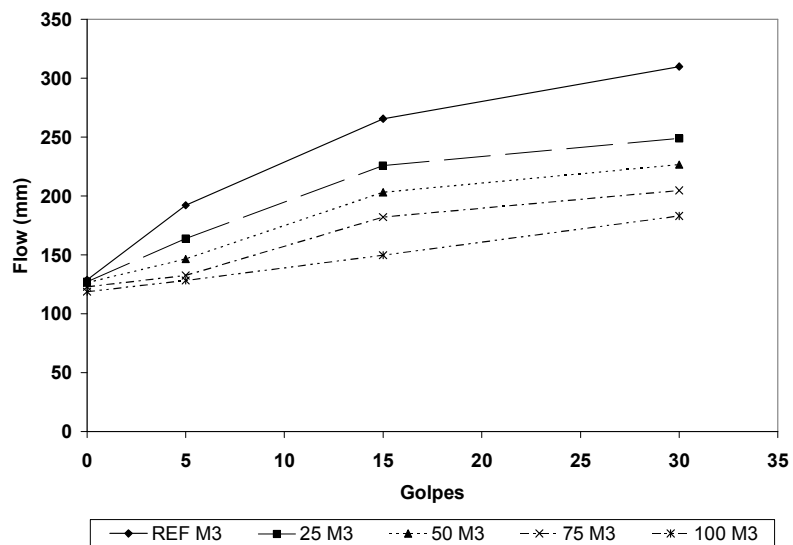


Figura 51 – Avaliação da consistência das argamassas – M3

Como observado nas figuras 49, 50 e 51, ocorreu uma perda no espalhamento com o aumento do teor de substituição do agregado miúdo natural. Isto foi devido à elevada absorção dos agregados reciclados, diminuindo a quantidade de água livre, conseqüentemente, a trabalhabilidade da mistura.

Comparando as três misturas, percebeu-se que o espalhamento para a mistura M2 foi maior em relação às misturas M1 e M3. Essa variação foi devida a que os finos passantes na peneira de abertura 0,15mm possuem uma maior superfície específica, aumentando assim a água livre da mistura. Para as misturas M1 e M3, houve uma redução importante na fluidez quando substituído 25% do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado. Para a mistura M2 isto ocorre somente acima de 50% de substituição. Na comparação entre as misturas M1 e M3, não foi evidenciado uma variação importante na consistência das misturas.

Para os concretos, a consistência foi medida através do ensaio de abatimento do tronco de cone – *Slump Test*. A figura 52 apresenta os resultados do abatimento do tronco de cone para as cinco misturas estudadas para os concretos com agregado miúdo e graúdo reciclado.

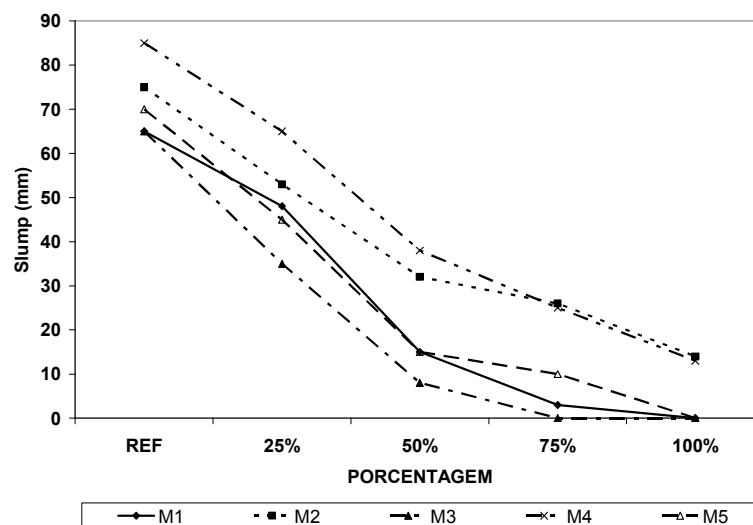


Figura 52 – Resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone para os concretos

Como observado na figura 52, a fluidez dos concretos também diminuiu com a substituição dos agregados miúdos naturais pelos agregados miúdos reciclados, devido à elevada absorção dos agregados reciclados, diminuindo assim a quantidade de água livre na mistura. A mistura M2 apresentou um abatimento menor em relação às misturas M3 e M1, especialmente para teores elevados de substituição. Isto se deve principalmente à maior superfície específica dos finos presentes nas misturas M3 e M1. Para altos teores de substituição (75% e 100%) a trabalhabilidade dos concretos ficou seriamente comprometida, dificultando a moldagem dos corpos-de-prova. Uma das medidas para amenizar esse problema seria a utilização de aditivos

superplastificantes ou a previa saturação dos agregados reciclados.

No caso dos concretos com agregados graúdos reciclados, a mistura M5 apresentou um abatimento menor em relação à mistura M4. Com a adição da parcela inferior a 4,8mm no agregado graúdo reciclado, é necessário uma maior quantidade de água para atingir a mesma trabalhabilidade, devido a maior quantidade de finos. Com 25% de substituição não houve uma redução importante na fluidez do concreto M5, porém, acima de 50% a consistência ficou comprometida tornando difícil a sua aplicação e moldagem. Para o concreto M4 só se observou uma redução importante para altos teores (75% e 100%), onde tiveram um abatimento bem inferior a referência.

As figuras 53 e 54 apresentam a influência da substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados na massa específica das argamassas e concretos estudados.

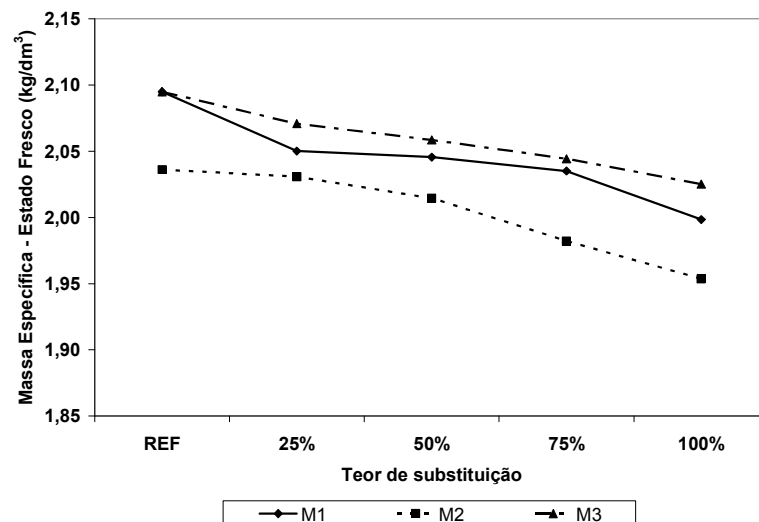


Figura 53 – Influência dos agregados reciclados na massa específica das argamassas no estado fresco

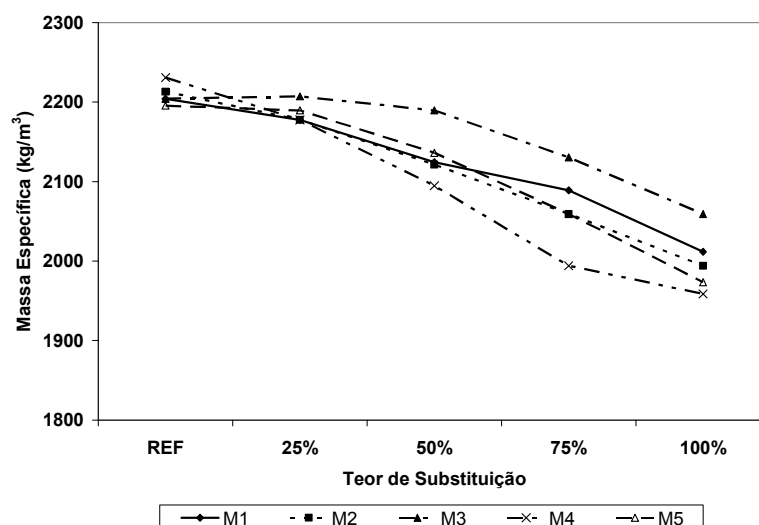


Figura 54 – Influência dos agregados reciclados na massa específica dos concretos no estado fresco

Pela análise das figuras 53 e 54, nota-se uma redução da massa específica dos concretos e argamassas com o aumento do teor de substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado. Essa redução na massa específica dos concretos e argamassas foi devido principalmente pela incorporação de ar na mistura, cujos valores são apresentados na tabela 39. Os agregados reciclados possuem uma massa específica menor em comparação aos agregados naturais, interferindo também na massa específica da mistura. A mistura M2 apresenta uma massa específica inferior em relação às outras misturas. Para as misturas M1 e M3 houve uma queda acentuada para 25% de substituição e manteve-se constante até 75%.

No caso dos concretos, até 25% de substituição praticamente não houve variação entre as massas específicas para todas as misturas. A mistura M2 apresenta também uma massa específica um pouco menor em relação às misturas M1 e M3.

Para os concretos com agregado graúdo reciclado, a mistura M4 apresenta uma massa específica menor em relação à mistura M5, devido que a parcela inferior a 4,8mm dos agregados aumenta o empacotamento das partículas na mistura.

Com a determinação da massa específica das misturas foi possível calcular o teor de ar incorporado para os concretos e argamassas, comparando-se a massa específica teórica e experimental para cada mistura. A tabela 39 e 40 apresentam os teores de ar incorporado para os concretos e argamassas.

Tabela 39 – Teor de ar incorporado nos concretos

<b>Dosagem</b>	$\gamma_{\text{teórico}}$	$\gamma_{\text{experimental}}$	<b>% ar incorp.</b>	<b>Dosagem</b>	$\gamma_{\text{teórico}}$	$\gamma_{\text{experimental}}$	<b>% ar incorp.</b>		
<b>M1</b>	<b>0%</b>	2,292	2,204	3,85	<b>M4</b>	<b>0%</b>	2,292	2,231	2,688
	<b>25%</b>	2,283	2,178	4,63		<b>25%</b>	2,286	2,178	4,74
	<b>50%</b>	2,274	2,124	6,59		<b>50%</b>	2,279	2,095	8,10
	<b>75%</b>	2,265	2,089	7,79		<b>75%</b>	2,272	1,994	12,23
	<b>100%</b>	2,256	2,012	10,82		<b>100%</b>	2,265	1,959	13,55
<b>M2</b>	<b>0%</b>	2,292	2,213	3,46	<b>M5</b>	<b>0%</b>	2,292	2,195	4,24
	<b>25%</b>	2,283	2,178	4,63		<b>25%</b>	2,286	2,189	4,22
	<b>50%</b>	2,274	2,121	6,72		<b>50%</b>	2,279	2,136	6,26
	<b>75%</b>	2,264	2,059	9,08		<b>75%</b>	2,272	2,059	9,35
	<b>100%</b>	2,256	1,994	11,61		<b>100%</b>	2,265	1,973	12,86
<b>M3</b>	<b>0%</b>	2,292	2,204	3,85					
	<b>25%</b>	2,283	2,207	3,33					
	<b>50%</b>	2,274	2,189	3,72					
	<b>75%</b>	2,265	2,130	5,96					
	<b>100%</b>	2,256	2,059	8,73					

Tabela 40 – Teor de ar incorporado nas argamassas

Dosagem		$\gamma_{\text{teórico}}$	$\gamma_{\text{experimental}}$	% ar incorp.	Dosagem		$\gamma_{\text{teórico}}$	$\gamma_{\text{experimental}}$	% ar incorp.
M1	0%	2,186	2,095	4,18	M3	0%	2,186	2,172	4,18
	25%	2,172	2,050	5,63		25%	2,172	2,071	4,68
	50%	2,159	2,046	5,25		50%	2,159	2,059	4,65
	75%	2,145	2,035	5,11		75%	2,144	2,044	4,68
	100%	2,131	1,998	6,23		100%	2,131	2,025	4,98
M2	0%	2,186	2,036	6,87					
	25%	2,172	2,031	6,52					
	50%	2,159	2,015	6,69					
	75%	2,145	1,982	7,58					
	100%	2,130	1,954	8,30					

Como observado nas tabelas acima, o teor de ar incorporado foi maior nos concretos em comparação às argamassas. O teor de ar incorporado atingiu em média 10% para os concretos com agregado miúdo reciclado e 12% para os concretos com agregado graúdo reciclado. As misturas com menos quantidades de finos (M2 e M4) apresentaram um teor de ar incorporado maior em relação às outras misturas.

Para as argamassas, o teor de ar incorporado praticamente não variou com o aumento do teor de substituição para as 3 (três) misturas, apresentando em média uma variação de 5% para as misturas M1 e M3 e 6% para a mistura M2.

O teor de ar, se elevado, leva a um aumento na porosidade da mistura, conseqüentemente, em reduções importantes na resistência do concreto (NEVILLE, 1997).

#### 4.4.2 Retração plástica dos concretos

O ensaio de retração plástica foi realizado unicamente para os concretos M1 e M3 para todos os teores de substituição apresentados. A tabela 41 apresenta os valores máximos de retração plástica para os concretos e as figuras 55 e 56 apresentam a evolução da retração ao longo do tempo.

Tabela 41 – Resultado final da retração plástica para os concretos

Tipo de concreto	Valor da retração ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )				
	0%	25%	50%	75%	100%
M1	3,7116	4,7452	0,6636	3,4658	0,7866
M3		1,9910	2,2368	1,7206	1,8436

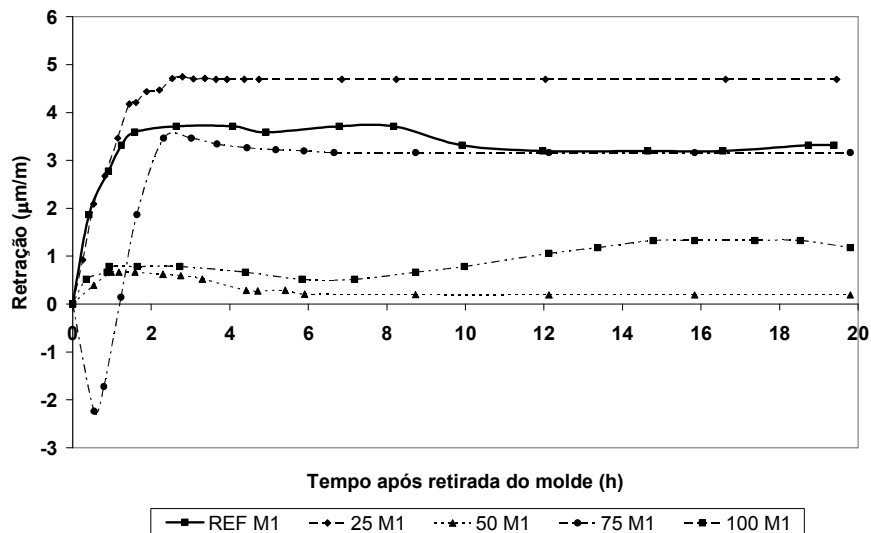


Figura 55 – Evolução da retração plástica do concreto M1

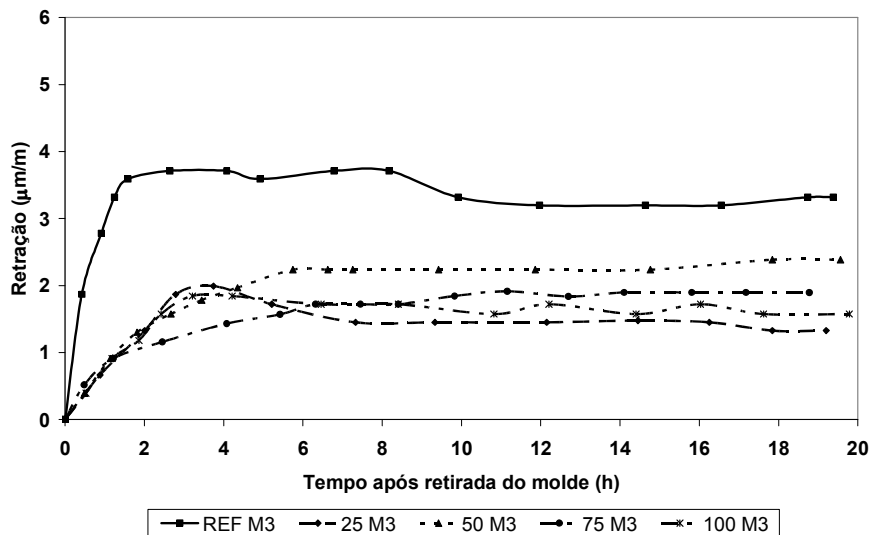


Figura 56 – Evolução da retração plástica do concreto M3

É interessante ressaltar que, os valores negativos de retração das curvas apresentadas nas figuras 55 e 56 se devem a pequenas acomodações do material, geradas na retirada dos moldes laterais do equipamento de ensaio e não devido a uma provável expansão da mistura.

A análise dos resultados mostra que houve uma variação no valor máximo da retração com a substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado. Percebe-se que o valor da retração diminuiu com o aumento do teor de substituição dos agregados, especialmente para teores elevados como 75% e 100%. Em comparação aos dois concretos, observa-se que não houve uma grande variação entre os dois concretos estudados.

Os agregados porosos atuam como agente de cura interna da mistura, fornecendo água para o concreto e tornando-se eficaz no controle de retração dos concretos em idades iniciais. Com a

redução da relação água/cimento efetiva da mistura, ocorre uma diminuição da permeabilidade interna do concreto, conseqüentemente a uma redução do potencial de trânsito do fluido. Se a distância pasta-agregado diminuir até o ponto máximo, então a redução do diâmetro do agregado poroso pode-se tornar eficaz para o controle da retração do concreto (ZHUTOVSKY *et al*, 2004). A tabela 42 apresenta a variação da retração plástica em relação ao concreto de referência com agregados miúdos naturais.

Tabela 42 – Percentual de variação da retração plástica em função do teor de agregado miúdo reciclado

Tipo de concreto	Influência do agregado miúdo de RCD na retração (%)				
	0%	25%	50%	75%	100%
M1	0,0	27,8	-82,1	-6,6	-78,8
M3		-46,4	-39,7	-53,6	-50,3

Nota-se claramente na tabela 42, a influência dos agregados reciclados na retração final dos concretos, reduzindo quase 80% no concreto M1 para 100% de substituição, com exceção para um teor de 25% que apresentou uma deformação maior em relação à referência.

#### 4.4.3 Calorimetria

De acordo com o procedimento adotado para avaliação do calor de hidratação, alguns parâmetros foram determinados a fim de caracterizar a influência dos agregados reciclados de construção e demolição nos concretos.

A partir da determinação da temperatura da amostra ( $T_i$ ) foi possível determinar outros parâmetros que ajudaram a análise da influência dos resíduos nos concretos. Através da evolução da temperatura foi possível determinar a variação de temperatura ( $\Delta T_i$ ), capacidade térmica da amostra ( $C_s$ ), calor gerado no tempo ( $Q_i$ ), taxa de calor gerada ( $\Delta Q_i$ ) e o calor acumulado para um tempo de 20 horas ( $Q_{20h}$ ), com ajuda das expressões apresentadas na metodologia.

As figuras 57 e 58 apresentam a evolução da temperatura em função do tempo para as amostras analisadas.



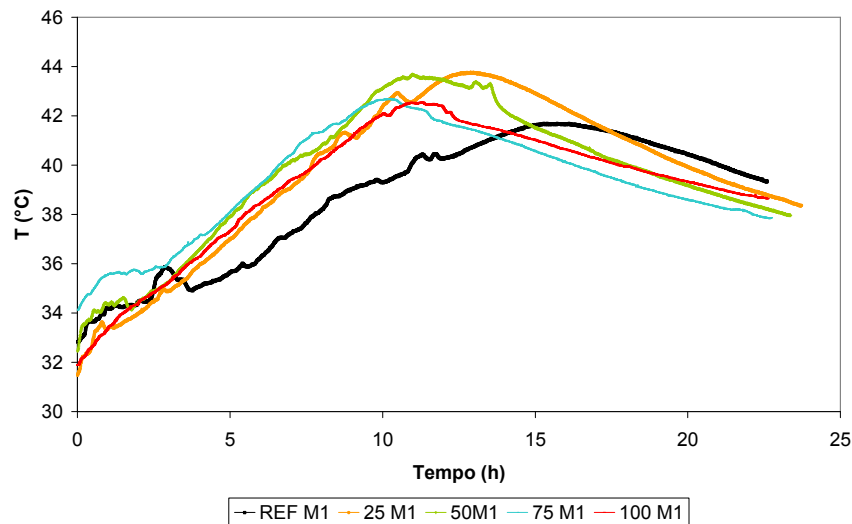


Figura 57 – Evolução da temperatura para o concreto M1

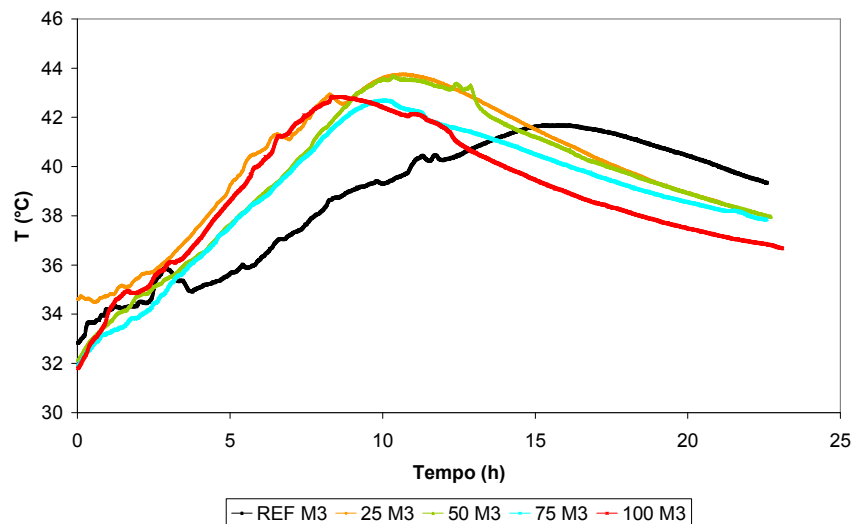


Figura 58 – Evolução da temperatura para o concreto M3

Como observado nas figuras acima, houve uma redução no tempo em que atinge a temperatura máxima para os concretos. Também foi evidenciado um leve aumento na temperatura máxima dos concretos com o aumento do teor de substituição.

A análise e discussões dos resultados, sobre a calorimetria semi-adiabática dos concretos com agregados reciclados de RCD, serão dadas em relação a cada parâmetro apresentado acima para um melhor entendimento.

A tabela 43 apresenta os principais valores das amostras dos concretos produzidos utilizados para os cálculos dos parâmetros referentes ao calor de hidratação das amostras estudadas.

Tabela 43 – Resultados do ensaio de calorimetria dos concretos

Concretos Teor	M1 (c/ RCD bruto)				M3 (c/ RCD Calcinado)			
	$m_{am}^1$ (g)	$V_{am}^2$ ( $cm^3$ )	$m_c^3$ (g)	Cs (J/K)	$m_{am}$ (g)	$V_{am}$ ( $cm^3$ )	$m_c$ (g)	Cs (J/K)
0%	866,7	0,393	150,2	1,004	866,7	0,393	150,2	1,004
25%	792,2	0,364	138,0	0,927	872,9	0,395	152,0	1,022
50%	712,7	0,336	124,7	0,843	862,9	0,394	151,0	1,020
75%	877,1	0,420	154,3	1,047	788,9	0,370	138,8	0,942
100%	776,4	0,386	137,2	0,936	703,7	0,342	124,4	0,955

<sup>1</sup>massa da amostra

<sup>2</sup>volume da amostra

<sup>3</sup>massa de cimento na amostra

Pela análise da tabela 43, nota-se que a capacidade térmica dos concretos foi maior para teores de substituição menores nos concretos M3. Para o concreto M1 não houve uma tendência para os valores da capacidade térmica das amostras.

#### 4.4.3.1 Variação máxima de temperatura $\Delta T$ e tempo para o pico de calor ( $t_{pico}$ )

É importante verificar a influência no tempo decorrido desde o lançamento do ensaio até o pico máximo de calor em relação ao teor de substituição de agregado natural pelo agregado reciclado. As figuras 59 e 60 apresentam o fluxo de calor em relação ao tempo das misturas de concreto analisadas.

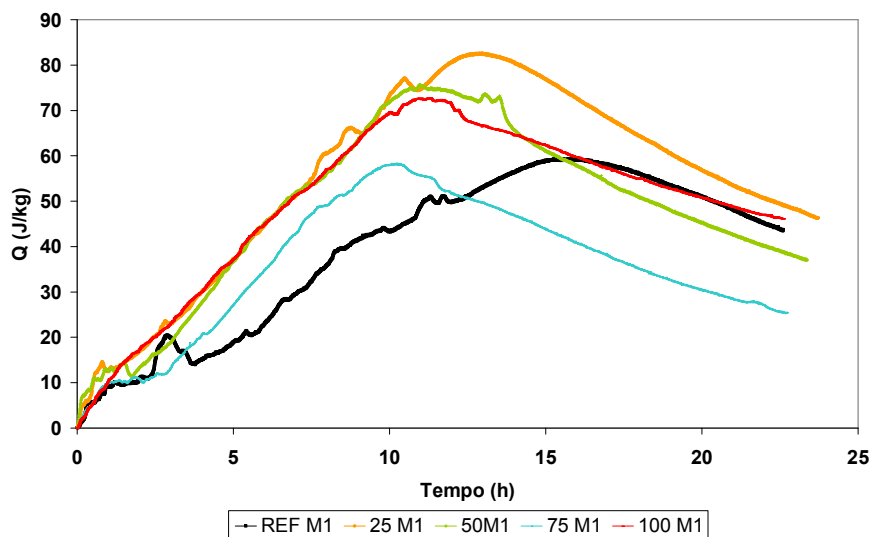


Figura 59 – Evolução do calor de hidratação do concreto M1

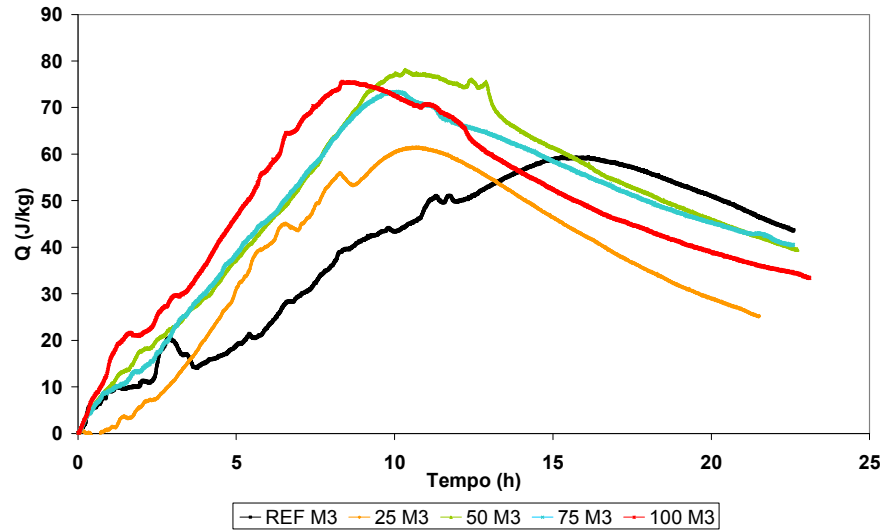


Figura 60 – Evolução do calor de hidratação do concreto M3

Pode-se considerar como fim do tempo de pega o tempo anterior ao ponto de inflexão do evento térmico, ou seja, correspondente ao início da formação do calor máximo de hidratação. A pega foi acelerada para os concretos com substituição do agregado natural pelo agregado reciclado. Para os concretos M1, foram observados os tempos de fim de pega de : 11h48 (REF), 10h48 (25%) , 9h18 (50% e 100%), 8h30 (75%). Já para os concretos M3, os valores alcançados quanto ao fim de pega foram: 11h48 (REF), 8h36 (25%) , 8h54 (50% e 75%) e 6h36 (100%).

Traçadas as curvas de evolução do calor em relação ao tempo, determinou-se o tempo do pico de calor das misturas. A figura 61 apresenta a evolução do tempo do pico de calor e a variação de temperatura máxima em relação ao teor de substituição dos agregados.

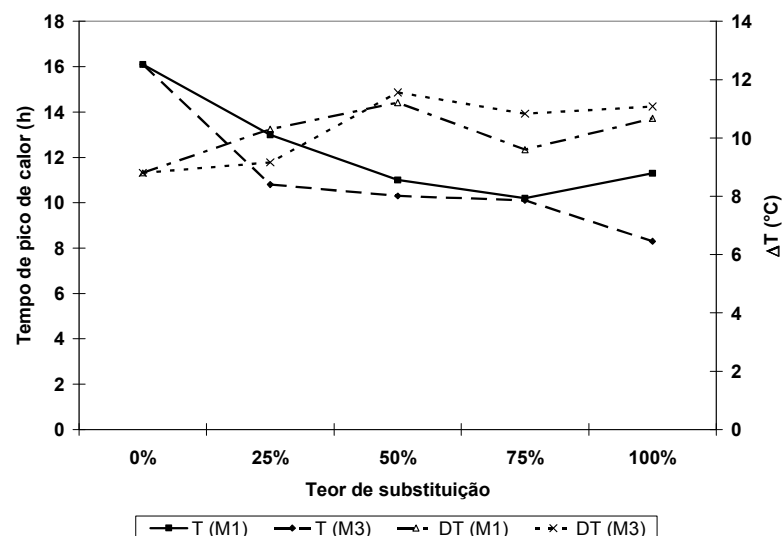


Figura 61 – Tempo de pico de calor e variação máxima de temperatura dos concretos

Pela análise da figura 61, percebe-se que o tempo de pico de calor diminui com o aumento de teor de substituição dos agregados. A redução foi de 30% para a mistura M1 e 50% para a mistura M3 para 100% de substituição. O tempo médio do pico de calor para as misturas foi de 12 horas para a mistura M1 e 11 horas para a mistura M3.

Baseado nos resultados pode-se afirmar que a substituição do agregado reciclado contribuiu para uma aceleração das reações de hidratação do cimento nas misturas de concreto, com maior destaque para os agregados reciclados calcinados, influenciando decisivamente nos valores do calor e taxa de calor envolvidos.

Na análise da variação de temperatura existe uma leve tendência de aumento da variação com o aumento do teor de substituição dos agregados naturais. Após 50% de substituição não houve uma diferença significativa na variação de temperatura para os concretos em estudo. A variação de temperatura pode variar até 20% em relação ao concreto de referência.

Destaca-se também a presença de cromo nos agregados finos que podem ser uma das causas na aceleração da hidratação do cimento segundo STEPHAN, D.; MALLMANN, R.; KNOFEL, D.; HARDTL, R. (1999). O teor de Zinco foi inferior ao estudo por LIMBACHIYA, M.C.; MARROCCHINO, E, KOULOURIS, A. (2007) para agregados reciclados graúdos. De acordo com ARLIGUIE e GRANDEST (1990), alto teor de zinco na composição, pôde retardar a hidratação do cimento.

Em relação à influência no calor de hidratação dos concretos, observou-se que a presença de agregados reciclados nos concretos altera a cinética de hidratação dos concretos, onde teve-se um tempo de pico de calor menor e uma taxa de calor maior com o aumento do teor de substituição dos agregados. A presença de metais pesados nos agregados reciclados como o Cromo pode ter contribuído para essa aceleração na cinética de hidratação dos concretos.

#### **4.4.3.2 Influência no calor gerado no tempo $Q_i$ , na taxa de calor gerado no tempo $\Delta T_i$ e no calor total gerado $Q_{max}$ .**

As figuras 62, 63 e 64 apresentam a variação dos valores do pico de calor ao longo do tempo, da máxima taxa de calor ao longo do tempo e do calor total envolvido ( $Q_{max}$ ) no tempo de 20 horas, respectivamente após contato inicial do cimento e água.

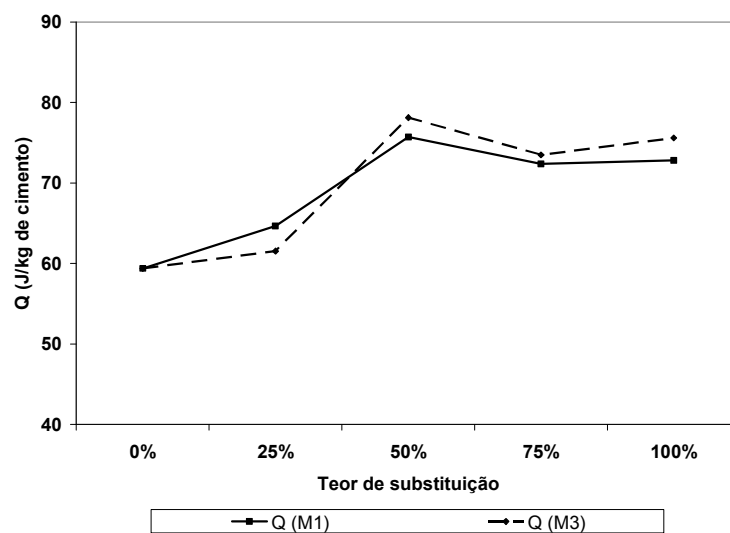


Figura 62 – Evolução do pico de calor dos concretos (Q)

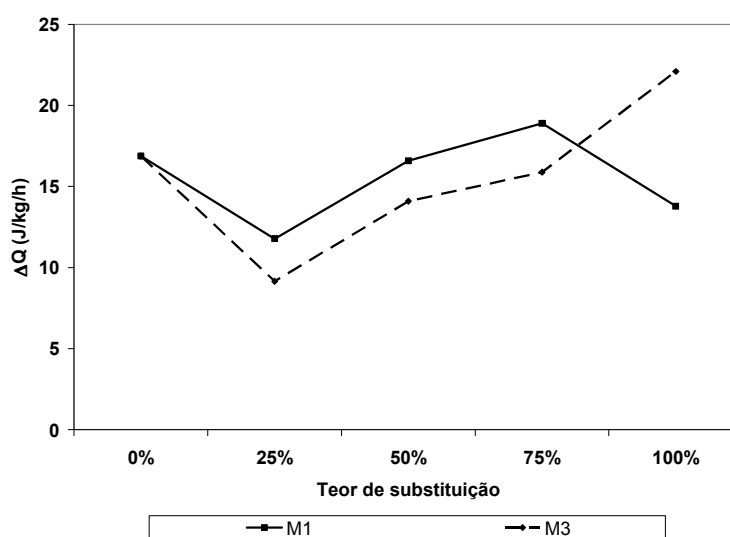


Figura 63 – Evolução da taxa de calor para os concretos ( $\Delta Q$ )

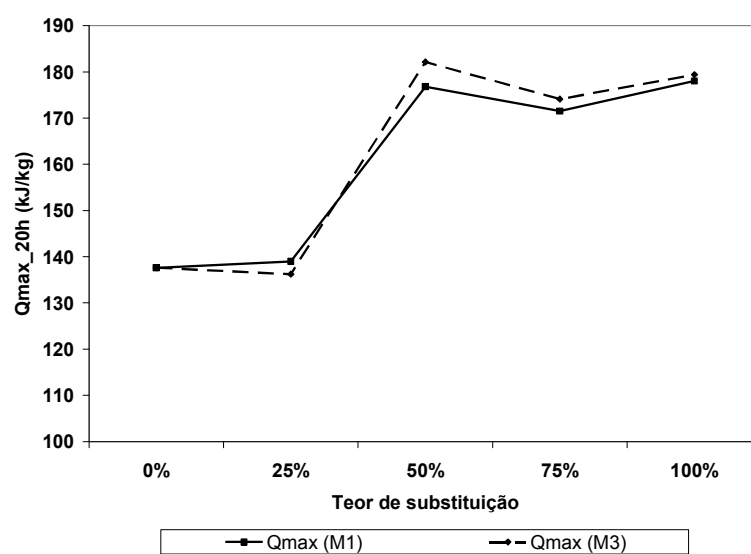


Figura 64 – Evolução do calor máximo para 20 horas dos concretos ( $Q_{max}$ )

Observando o desempenho dos concretos com agregados reciclados de RCD, nota-se que, com o aumento do teor de substituição houve um acréscimo no pico de calor em função do teor de substituição dos agregados. Cabe ressaltar que a presença de fino reciclado calcinado praticamente não afetou no pico de calor gerado para os concretos.

Em relação à taxa de calor, percebe-se que houve uma variação importante somente para teores elevados de substituição dos agregados, variando 20% em relação à referência para 100% de substituição nos concretos M3.

Os resultados da máxima taxa de calor gerado demonstram que houve uma tendência de aumento do calor com o teor de substituição dos agregados naturais, sendo aproximadamente 20% a variação para 100% de substituição em relação à referência. Até 25% de substituição, não foi evidenciado uma variação importante para os dois concretos.

As figuras 65 e 66 apresentam a evolução do pico de calor gerado e calor máximo gerado em 20 horas em relação ao consumo de cimento por  $m^3$  dos concretos em estudo.

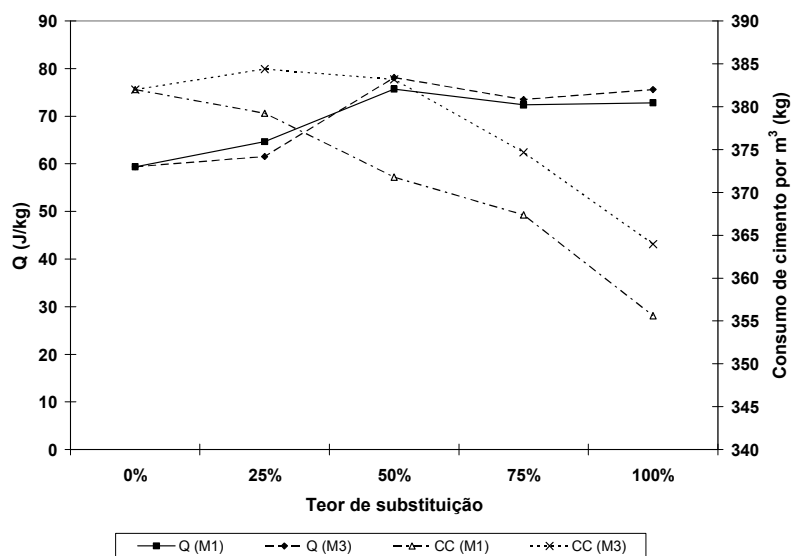


Figura 65 – Evolução do pico de calor em relação ao consumo de cimento por  $m^3$

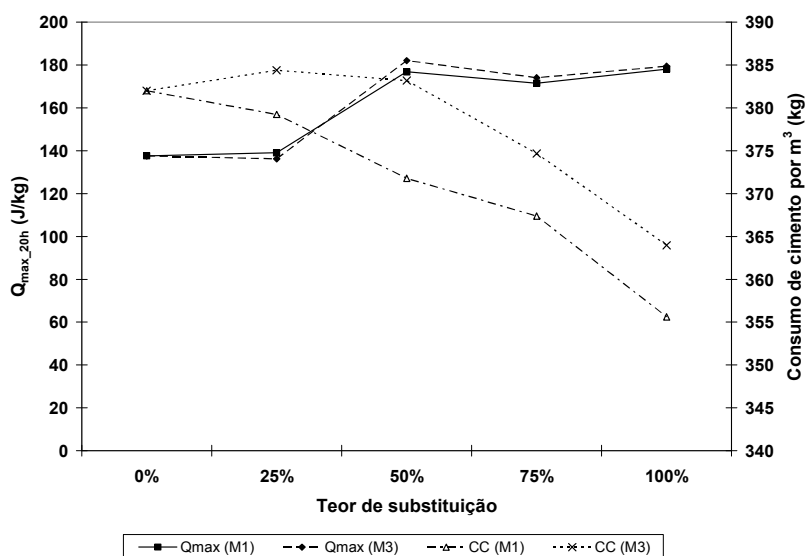


Figura 66 – Evolução do calor máximo em relação ao consumo de cimento por m<sup>3</sup>

Pela análise das figuras 65 e 66, percebe-se que houve um aumento no calor gerado mesmo com a redução do consumo de cimento nos concretos. A tendência foi inesperada, devido a que com maior consumo de cimento maior o calor de hidratação desenvolvido.

Por essas afirmações, pode-se considerar que os resíduos utilizados de RCD influenciaram o comportamento dos concretos estudados em relação à cinética de hidratação, alterando valores de variação de temperatura, pico de calor, calor total e fluxo de calor, permitindo que as reações de hidratação sejam também alteradas.

## 4.5 AVALIAÇÃO DAS MISTURAS NO ESTADO ENDURECIDO

### 4.5.1 Resistência à tração na flexão das argamassas

As figuras 67 e 68 apresentam os resultados para o ensaio da resistência à tração na flexão das argamassas estudadas.

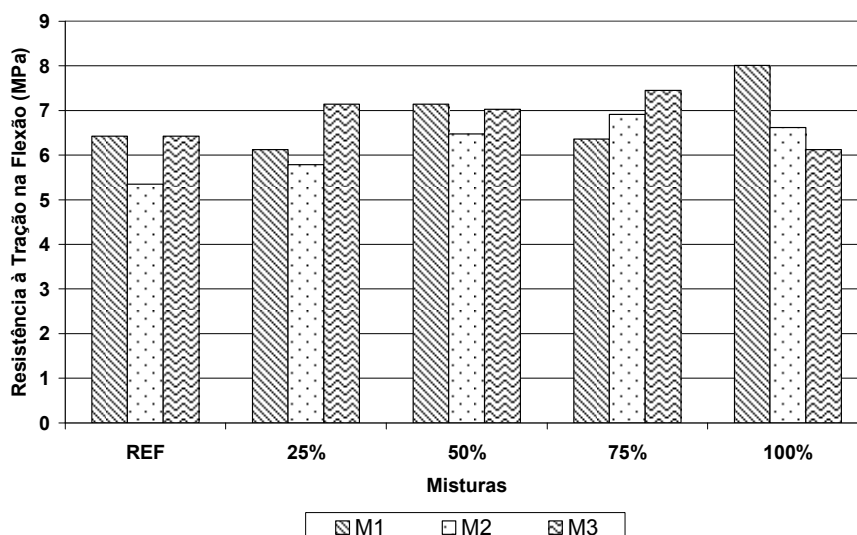


Figura 67 – Evolução da resistência à tração na flexão das argamassas aos 28 dias

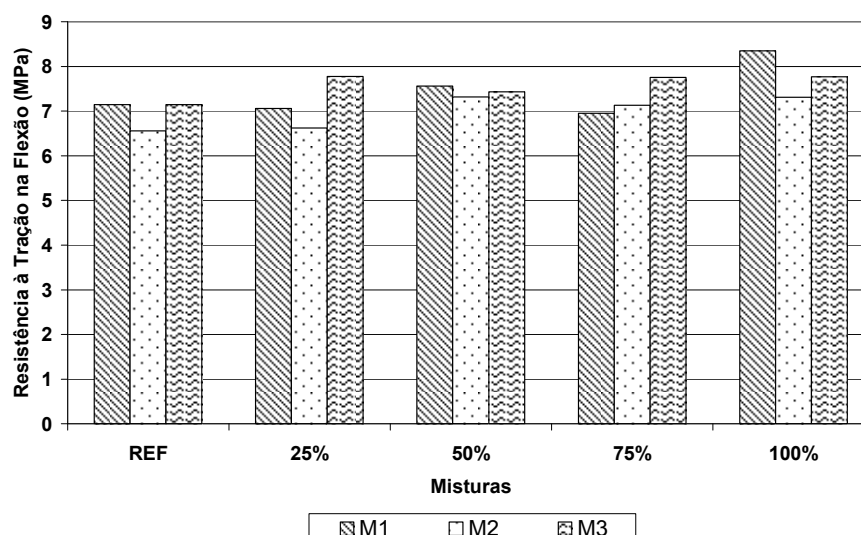


Figura 68 – Evolução da resistência à tração na flexão das argamassas aos 90 dias

Pela análise das figuras 67 e 68, percebe-se que as misturas com finos inferiores a 0,15mm (M1 e M3) apresentam uma resistência à tração na flexão maior em relação à mistura M2. Essa diferença ocorre devido ao maior empacotamento das partículas nas misturas M1 e M3 e também pelo efeito pozolânico dos finos de RCD. Em comparação com a referência, praticamente todas as misturas tiveram uma resistência à flexão maior, devido principalmente a redução da relação a/c livre nas misturas. Para a mistura M3 essa diferença pode chegar a 15% aos 28 dias para uma substituição de 75%.

O processo de calcinação dos finos praticamente não apresentou influência na resistência à tração na flexão das argamassas, encontrando-se praticamente no mesmo patamar em relação aos agregados reciclados brutos.



A tabela 44 apresenta o acréscimo da resistência à tração na flexão das argamassas de 28 dias de idade para 90 dias.

Tabela 44 – Acréscimo da resistência à flexão para as argamassas

Acréscimo da resistência 28 dias → 90 dias					
Argamassa/Teor	0%	25%	50%	75%	100%
<b>M1</b>	11,1	15,3	5,9	9,3	4,2
<b>M2</b>	22,5	14,4	13,0	3,2	10,5
<b>M3</b>	11,1	8,9	5,8	4,0	26,9

Pela análise da tabela 44, nota-se um maior acréscimo da resistência para teores de substituição menores, exceto para uma substituição de 100% na mistura M3 onde se obteve um aumento de aproximadamente 27%. Para os resultados, esperava-se um maior acréscimo na resistência para argamassas com teores de agregados reciclados maiores, onde o efeito da atividade pozolônica poderia ser maior em idades avançadas.

#### 4.5.2 Resistência à compressão das argamassas

Logo após o ensaio de tração na flexão das argamassas, procedeu-se ao ensaio de resistência à compressão das duas partes do prisma ensaiado, assim como estabelece a NBR 13279 (2005). Cada tipo de argamassa (M1, M2 e M3) apresenta uma referência específica para efeito de comparação. As figuras 69 e 70 apresentam os resultados do ensaio de resistência à compressão das argamassas.

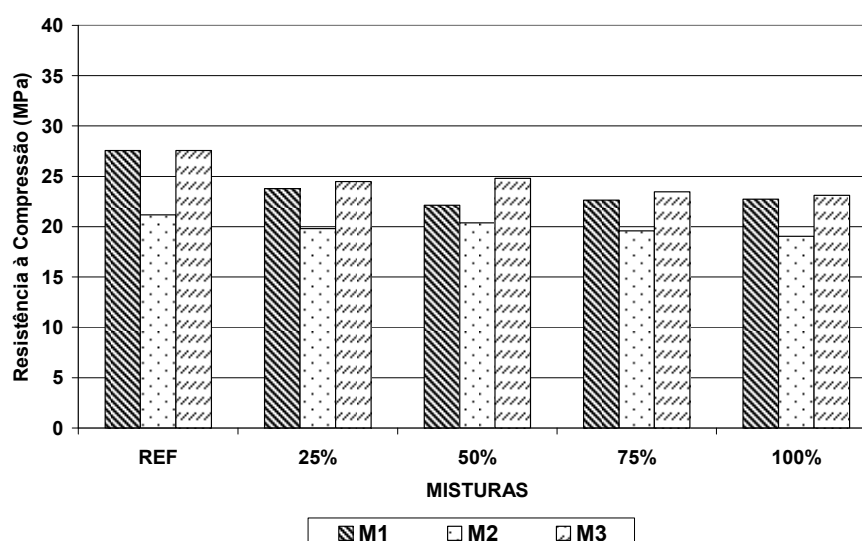


Figura 69 – Resistência à compressão das argamassas aos 28 dias

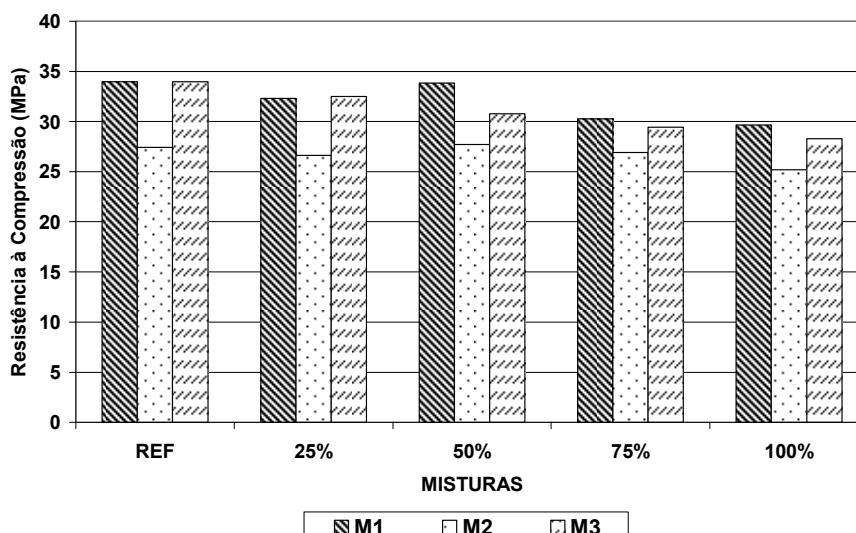


Figura 70 – Resistência à compressão das argamassas aos 90 dias

Como observado nas figuras 69 e 70, houve uma diminuição na resistência à compressão das argamassas com o aumento do teor de substituição dos agregados miúdos reciclados. Essa diferença pode chegar a 18% para M1 e 16% para M3 para uma substituição de 100%. Aos 28 dias, até 50% de substituição houve uma diferença na resistência à compressão na ordem de 20% em relação à referência. A adição de finos calcinados (<math><150\mu\text{m}</math>) não contribuiu com uma melhoria na resistência à compressão das argamassas especialmente em idades avançadas, onde esperava-se um melhor desempenho dos finos calcinados quanto a sua atividade pozolânica. Para teores de substituições elevados (75% e 100%), a mistura M2 apresentou em média uma resistência 15% inferior em relação às outras misturas, devido principalmente ao efeito filler causado pelos finos (<math><150\mu\text{m}</math>).

FARELL *et al*, (2006) analisaram a resistência à compressão com resíduos cerâmicos em um traço bem similar (1:3:0,5) ao utilizado neste trabalho. Os resultados apontaram resistência à compressão maiores em relação ao presente trabalho. O aumento da resistência à compressão das argamassas com resíduo cerâmico em relação à referência foi na ordem de 30% para 28 dias e 20% para 90 dias, para um teor de substituição de 30%, em comparação aos resultados encontrados neste trabalho.

Em comparação ao trabalho apresentado por TOLEDO, R.D *et al*, (2007), a redução da resistência à compressão também foi menor em relação aos valores analisados pelos autores, onde encontraram uma redução de 13% e 35% para relação a/c igual a 0,40 e 0,50 respectivamente, considerando uma substituição de 40%.

A tabela 45 apresenta o acréscimo de resistência à compressão dos prismas de 28 dias para 90 dias.

Tabela 45 – Acréscimo da resistência à compressão das argamassas

Acréscimo da resistência 28 dias → 90 dias					
Argamassa/Teor	0%	25%	50%	75%	100%
M1	23,2	35,8	52,9	33,8	30,4
M2	29,5	34,4	36,0	37,4	32,2
M3	23,2	32,8	24,1	25,4	22,3

Pela análise da tabela 45, observa-se que maiores acréscimos ocorrem para uma substituição de 50% da mistura M1 e 25% para a mistura M3. Para teores elevados de substituição não houve uma variação importante no acréscimo da resistência.

Não foi possível verificar a influência da calcinação dos finos de RCD no acréscimo da resistência à compressão, principalmente em idades avançadas onde a atividade pozolânica é maior.

#### 4.5.3 Absorção capilar das argamassas

Os ensaios de absorção capilar foram inicialmente realizados com água como fluido penetrante. As figuras 71 a 76 apresentam os resultados de absorção capilar das argamassas estudadas para 28 e 90 dias.

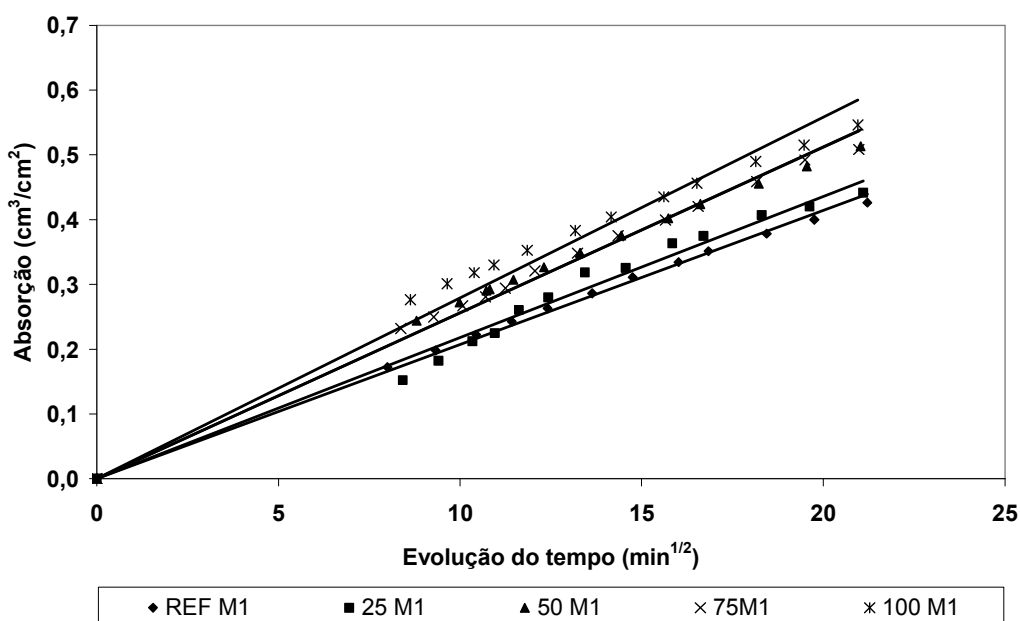


Figura 71 – Absorção de água por capilaridade em função da raiz do tempo aos 28 dias - M1

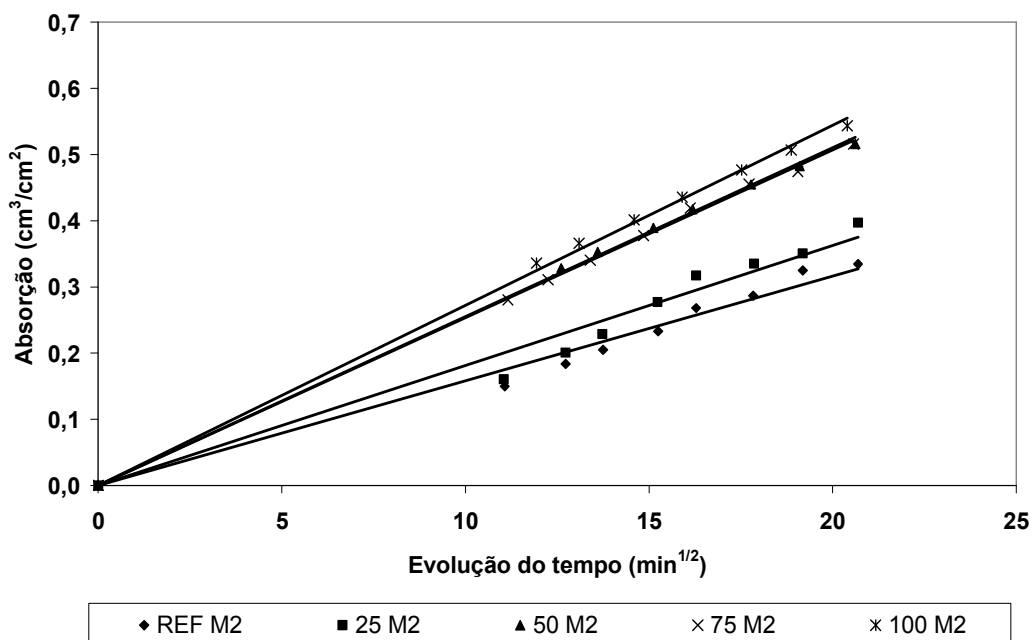


Figura 72 – Absorção de água por capilaridade em função da raiz do tempo aos 28 dias – M2

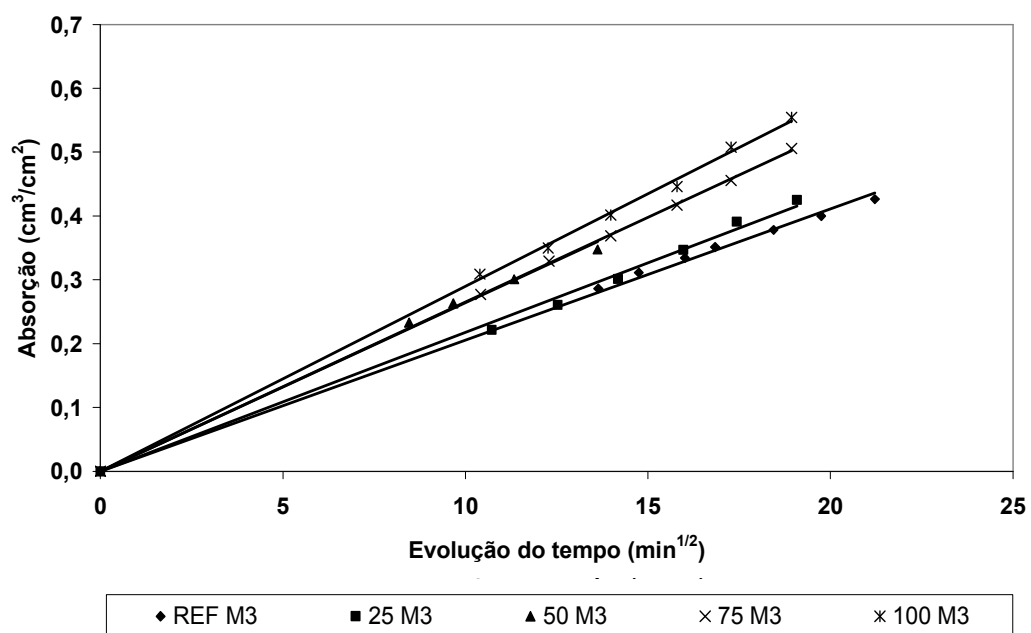


Figura 73 – Absorção de água por capilaridade em função da raiz do tempo aos 28 dias - M3

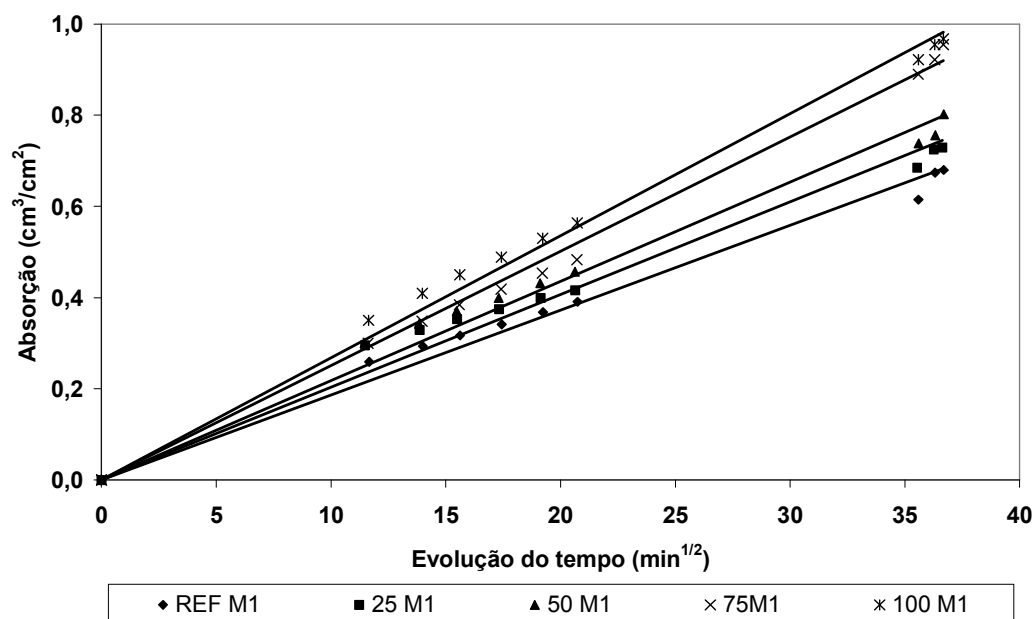


Figura 74 – Absorção de água por capilaridade em função da raiz do tempo aos 90 dias - M1

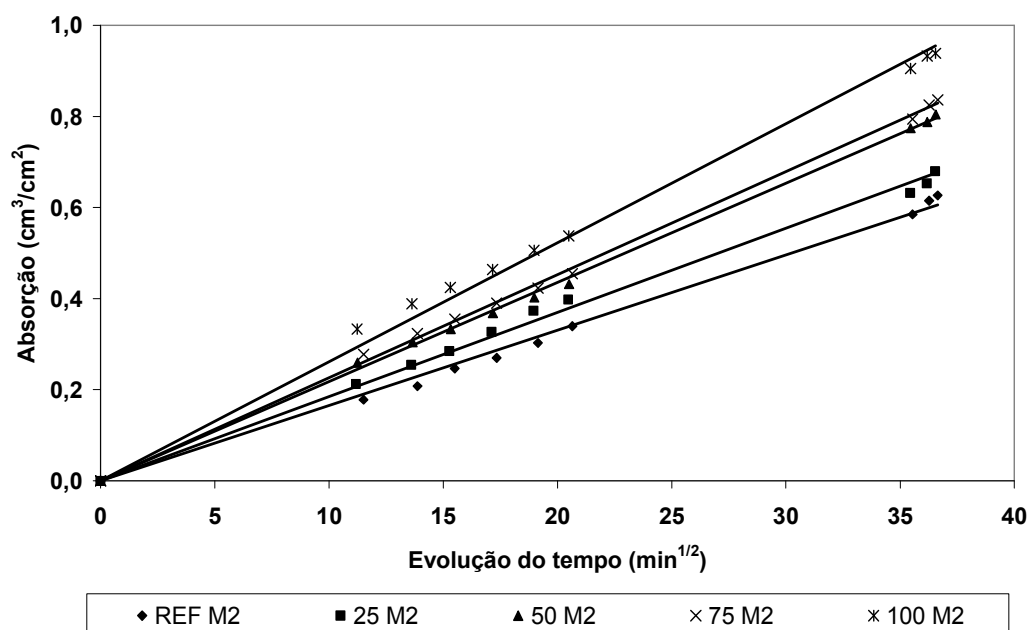


Figura 75 – Absorção de água por capilaridade em função da raiz do tempo aos 90 dias – M2

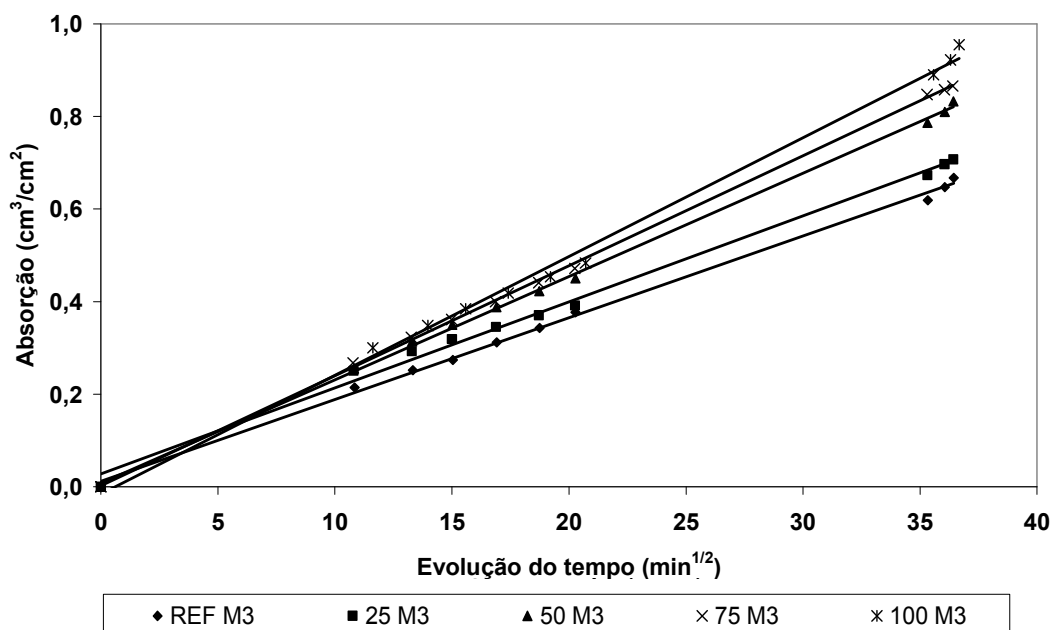


Figura 76 – Absorção de água por capilaridade em função do tempo aos 90 dias - M3

Partiu-se da hipótese que a incorporação dos agregados reciclados influencia na absorção capilar das argamassas. Isto se dá em virtude do próprio agregado reciclado de RCD apresentar um potencial de absorção diferente em relação aos agregados naturais. A água total incorporada tende a formar um sistema na qual parte dessa água estará presente como água livre, e por conseqüência ficará disposta na mistura formando capilares na argamassa.

Na análise das figuras 71 a 76 nota-se um aumento na absorção capilar das argamassas com o acréscimo do teor de substituição do agregado miúdo reciclado na mistura. Até 25% de substituição praticamente não houve variação na absorção de água em relação à argamassa de referência.

Diante do que foi apresentado, não se pode afirmar que o aumento da absorção capilar sofrida pelas argamassas, com agregado miúdo reciclado incorporado em relação à argamassa de referência, foi devido unicamente à presença de agregados reciclados na mistura. O que existiu realmente foi uma mudança na estrutura interna com a adição desses agregados reciclados. Afirmações mais concretas só serão possíveis com mais estudos de microestruturas unidos ao transporte de umidade, como permeabilidade, adsorção, desorção, entre outros.

A tabela 46 e figura 77 apresentam os valores dos coeficientes de sorptividade obtidos a partir das figuras 71 a 76, em função do teor de substituição dos agregados para uma idade de 28 dias.

Tabela 46 – Coeficiente de sorptividade das argamassas com agregado miúdo reciclado aos 28 dias

Tipo de Argamassa	Coeficiente de Sorptividade x 10 <sup>-2</sup> (cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> /min <sup>1/2</sup> )				
	0%	25%	50%	75%	100%
M1	2,07	2,18	2,56	2,57	2,79
M2	1,58	1,81	2,55	2,54	2,72
M3	2,06	2,18	2,64	2,65	2,90

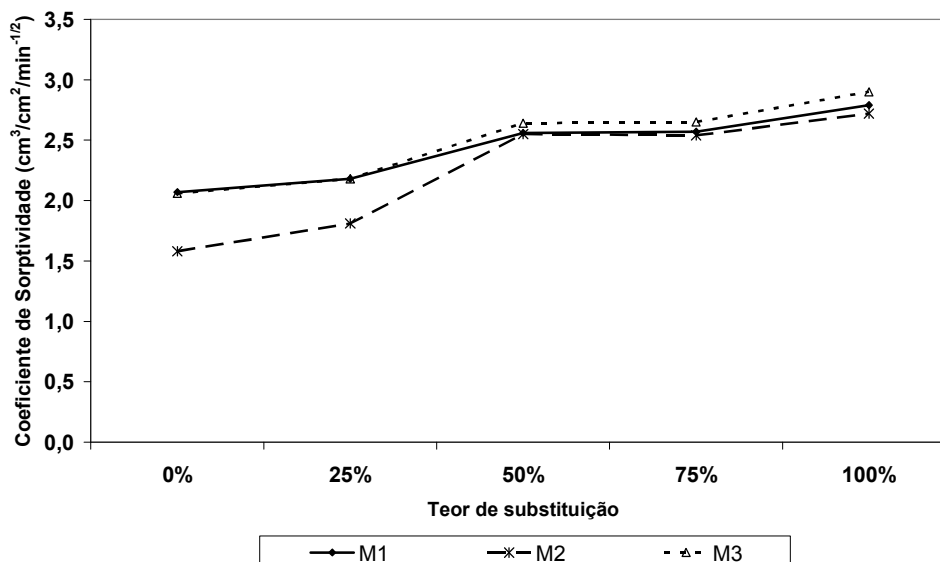


Figura 77 – Coeficiente de Sorptividade em relação ao teor de agregado miúdo de RCD aos 28 dias

Pela análise da tabela 46 e figura 77, nota-se um aumento na sorptividade das argamassas estudadas. A variação da sorptividade pode chegar a 30% para a mistura M3 e 25% para a mistura M1. Acima de 50% a sorptividade não sofreu variação importante na sorptividade para as três misturas estudadas.

A tabela 47 e figura 78 apresentam os valores da sorptividade obtidos em relação ao teor de substituição dos agregados naturais para uma idade de 90 dias.

Tabela 47 – Coeficiente de sorptividade das argamassas com agregado miúdo reciclado aos 90 dias

Tipo de Argamassa	Coeficiente de Sorptividade x 10 <sup>-2</sup> (cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> /min <sup>1/2</sup> )				
	0%	25%	50%	75%	100%
M1	1,86	2,03	2,18	2,51	2,68
M2	1,65	1,85	2,18	2,26	2,61
M3	1,86	1,96	2,26	2,38	2,51

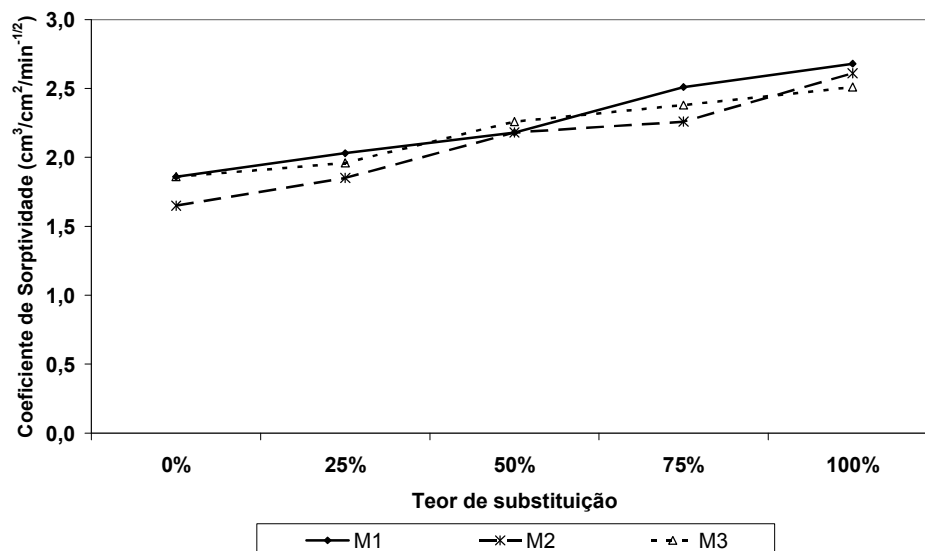


Figura 78 – Coeficiente de Sorptividade em relação ao teor de agregado miúdo de RCD aos 90 dias

Como apresentado pela tabela 47 e figura 78, a sorptividade das argamassas para 90 dias seguiu a mesma tendência em relação à sorptividade aos 28 dias, com o aumento da sorptividade com o acréscimo do teor de substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados.

De acordo com as características dos materiais, os agregados reciclados apresentam maior potencial de absorção dos grãos em relação ao agregado miúdo natural. Quanto maior a quantidade de água, maior o diâmetro dos capilares, conseqüentemente menor a absorção final. Como observado nas figuras 77 e 78 para 28 e 90 dias essa tendência se confirma com o aumento do teor de substituição dos agregados.

Os ensaios de absorção capilar também foram conduzidos por outro líquido molhante que foi o álcool etílico (P.A.). Esse ensaio foi realizado com o objetivo de determinar o ângulo de molhamento aparente nos capilares das argamassas estudadas, já que o álcool pode ser considerado um líquido perfeitamente molhante, ou seja, o ângulo de molhamento é nulo, causando uma diferença de pressão no capilar. Os ensaios de absorção capilar das argamassas com álcool foram realizados somente para uma idade de 90 dias. As figuras 79 a 81 apresentam os resultados para a absorção com álcool em função do tempo das argamassas e a tabela 48 apresenta os valores dos coeficientes de sorptividade para todos os teores utilizados no ensaio.



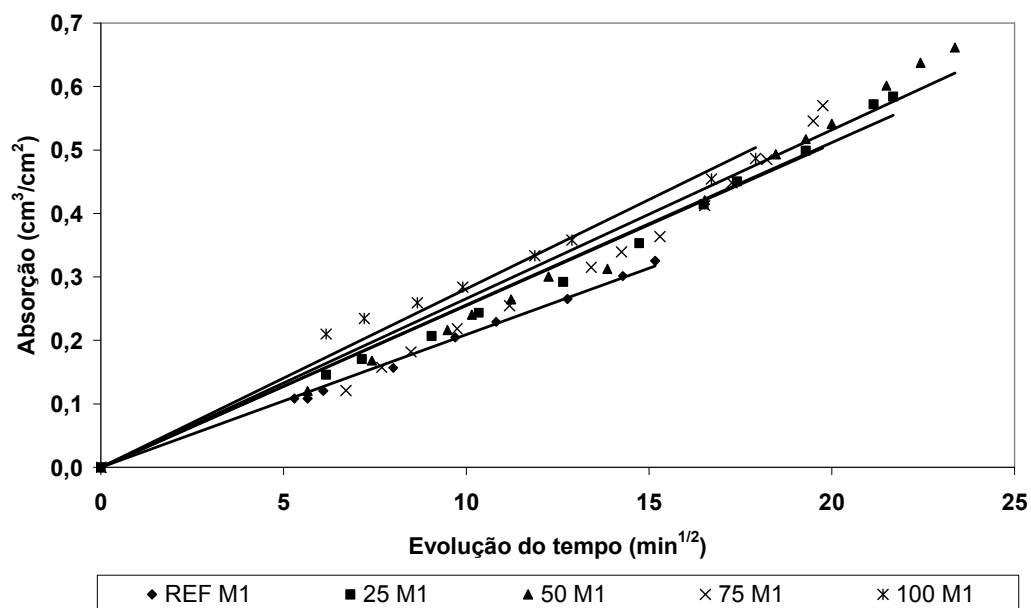


Figura 79 – Absorção de álcool por capilaridade em função da raiz do tempo aos 90 dias - M1

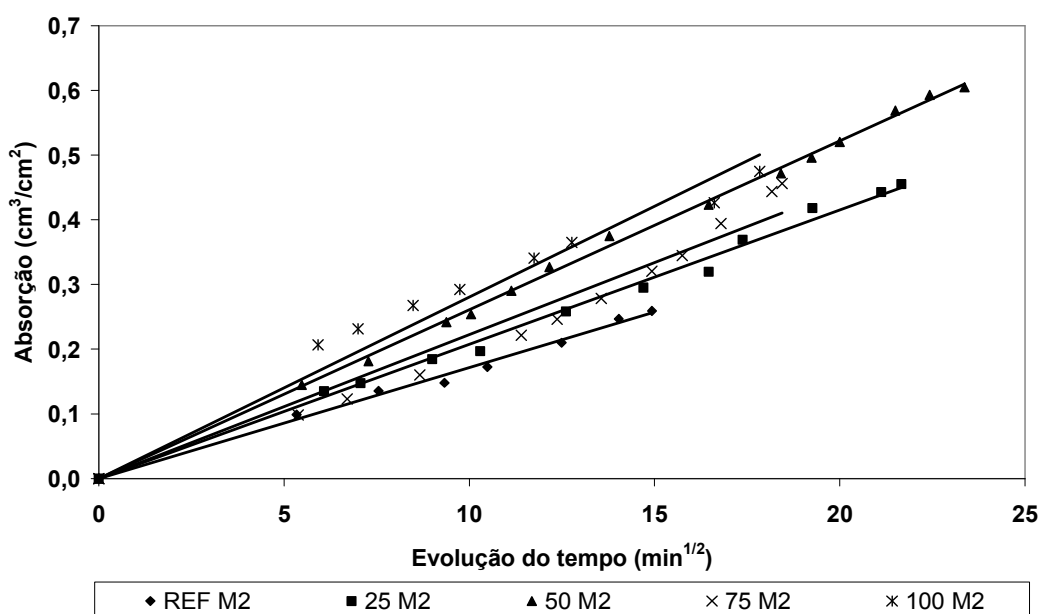


Figura 80 – Absorção de álcool por capilaridade em função da raiz do tempo aos 90 dias – M2

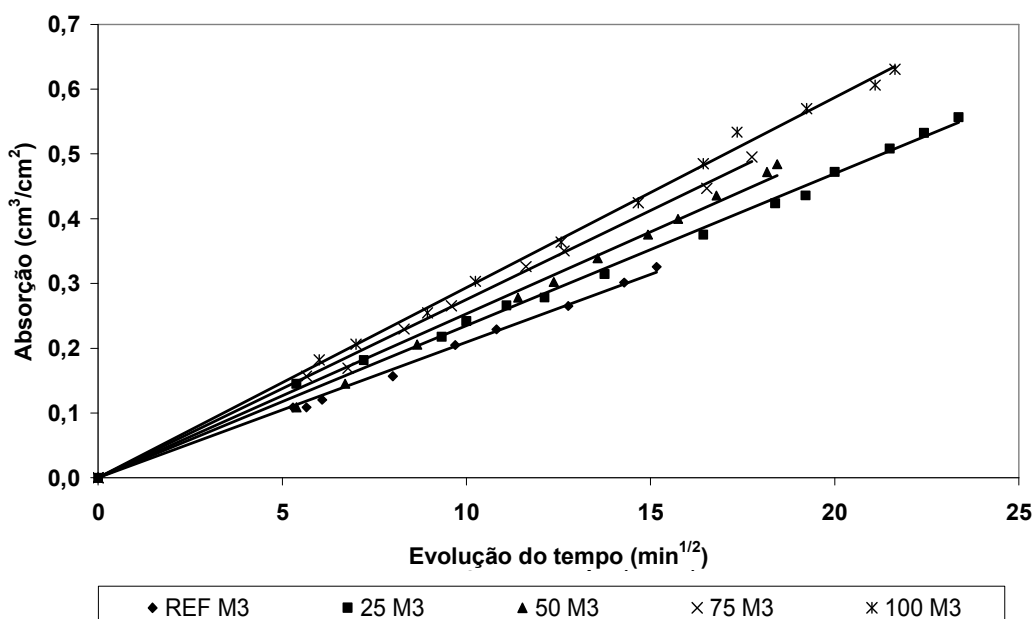


Figura 81 – Absorção de álcool por capilaridade em função da raiz do tempo aos 90 dias - M3

Tabela 48 – Coeficiente de sorptividade com álcool das argamassas com agregado miúdo reciclado aos 90 dias

Tipo de Argamassa	Coeficiente de Sorptividade x 10 <sup>-2</sup> (cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> /min <sup>1/2</sup> )				
	0%	25%	50%	75%	100%
M1	2,09	2,56	2,66	2,55	2,81
M2	1,71	2,08	2,61	2,23	2,81
M3	2,09	2,35	2,53	2,75	2,94

Para o cálculo do ângulo de molhamento aparente foi utilizadas a equação 20 apresentada na metodologia e as constantes da tabela 20. A tabela 49 apresenta os ângulos de molhamentos aparentes calculados para as argamassas aos 90 dias.

Tabela 49 – Ângulo de molhamento aparente para as argamassas com agregado miúdo reciclado aos 90 dias

Tipo de Argamassa	Ângulo de molhamento aparente $\alpha_c$				
	0%	25%	50%	75%	100%
M1	38,94	40,20	39,87	37,55	38,02
M2	37,85	38,94	39,67	37,10	38,39
M3	38,94	39,68	38,89	39,27	39,43

Os ângulos de molhamentos aparentes menores caracterizam uma melhor molhabilidade. Isto significa que as misturas que possuem maiores ângulos de molhamento aparente tendem a ter um tempo de ascendência de franjas capilares maiores; porém possuem uma menor quantidade de líquido infiltrado. Como apresentado na tabela 49, não houve variação importante no ângulo de molhamento aparente com a adição de agregados miúdos reciclados nas argamassas.

As figuras 82 e 83 apresentam a relação da sorptividade das argamassas e o consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  das pastas para a idade de 28 e 90 dias.

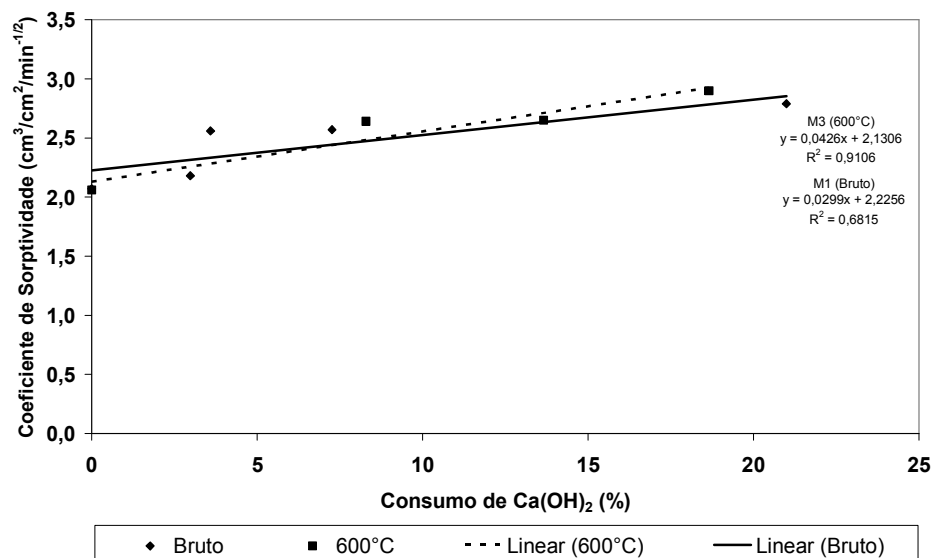


Figura 82 – Relação entre a sorptividade da argamassa e consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  aos 28 dias

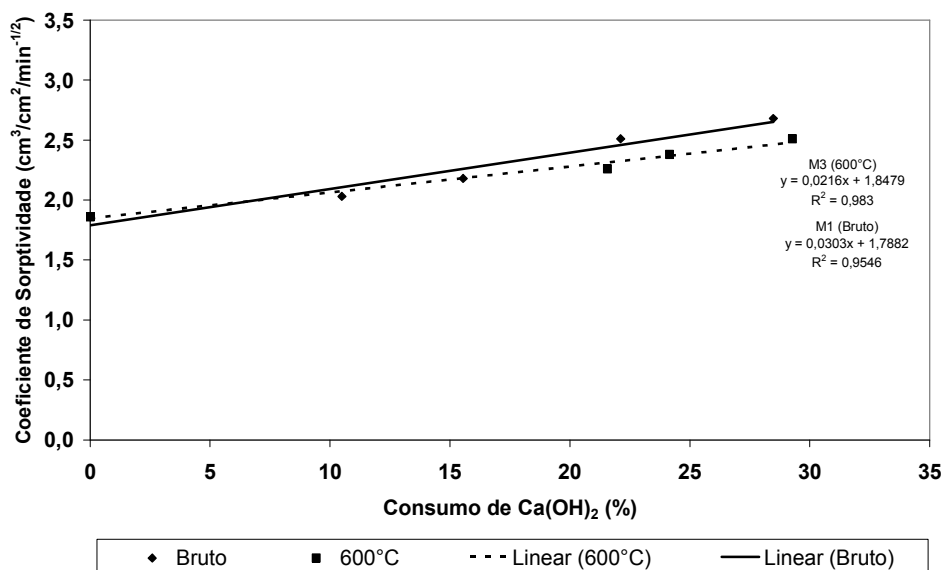


Figura 83 – Relação entre a sorptividade da argamassa e consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  aos 90 dias

Como observado nas figuras 82 e 83, existe uma relação linear entre as sorptividade das argamassas com agregado reciclado, seja bruto ou calcinado, com o consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  das pastas confeccionadas com estes agregados. Isto ocorre devidamente ao refinamento dos poros capilares causados pela adição de finos nas misturas, aumentando assim a sorptividade.

#### 4.5.4 Resistência à compressão dos concretos

A análise da resistência mecânica dos concretos estudados foi realizada em relação aos resultados dos rompimentos dos corpos-de-prova à compressão uniaxial e determinação do módulo de deformação. As tabelas 50 a 52 apresentam os resultados dos rompimentos dos corpos-de-prova dos concretos com agregado miúdo em idades de 7, 28 e 90 dias.

Tabela 50 – Resistência à compressão média dos concretos M1

Idade	7 dias				28 dias				90 dias			
	R.Comp. (MPa)	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)	R.Comp. (MPa)	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)	R.Comp. (MPa)	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
REF M1	23,08	22,65	0,65	2,88	31,43	30,20	1,32	4,38	34,44	34,30	0,57	1,66
	21,90				28,80				33,68			
	22,97				30,37				34,79			
25% M1	21,06	21,21	0,13	0,62	28,09	28,75	0,69	2,40	30,09	31,05	0,86	2,77
	21,25				29,46				31,29			
	21,31				28,70				31,76			
50% M1	22,84	21,31	1,53	7,19	29,28	29,93	0,83	2,77	32,40	32,23	0,29	0,90
	21,31				30,86				32,39			
	19,78				29,64				31,89			
75% M1	24,98	22,86	1,84	8,05	29,28	31,36	2,23	7,11	34,41	34,30	0,50	1,45
	21,71				31,07				33,76			
	21,88				33,72				34,74			
100% M1	17,85	19,91	1,80	9,05	22,56	27,53	4,76	17,2 9	30,54	34,19	3,61	10,5 5
	21,19				27,99				37,75			
	20,70				32,05				34,28			

Tabela 51 – Resistência à compressão média dos concretos M2

Idade	7 dias				28 dias				90 dias			
	R.Comp. (MPa)	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)	R.Comp. (MPa)	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)	R.Comp. (MPa)	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
REF M2	21,35	20,65	1,06	5,13	27,43	26,48	0,83	3,13	32,22	32,26	0,07	0,22
	19,43				26,15				32,34			
	21,16				25,87				32,21			
25% M2	20,24	20,13	0,44	2,19	24,27	25,67	1,53	5,97	29,54	30,43	1,00	3,28
	19,64				27,31				30,25			
	20,50				25,44				31,51			
50% M2	21,21	21,04	0,18	0,83	27,02	26,40	0,61	2,32	32,47	31,52	0,95	3,01
	21,03				25,80				31,51			
	20,86				26,38				30,57			
75% M2	18,59	19,56	0,87	4,44	27,81	26,16	1,47	5,62	33,17	32,53	0,57	1,74
	20,26				25,69				32,35			
	19,84				24,98				32,09			
100% M2	19,00	18,55	0,63	3,39	24,33	24,98	0,91	3,63	31,19	30,36	1,18	3,89
	18,11				25,62				29,52			
	*****				*****				*****			

Tabela 52 – Resistência à compressão média dos concretos M3

Idade	7 dias				28 dias				90 dias			
	R.Comp. (MPa)	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)	R.Comp. (MPa)	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)	R.Comp. (MPa)	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
REF M3	23,08	22,65	0,65	2,88	31,43	30,20	1,32	4,38	34,44	34,30	0,57	1,66
	21,90				28,80				33,68			
	22,97				30,37				34,79			
25% M3	21,39	22,27	1,15	5,16	30,23	30,15	0,60	2,00	32,28	34,07	1,57	4,61
	23,57				30,71				35,24			
	21,85				29,51				34,68			
50% M3	23,29	21,94	1,22	5,56	29,84	29,35	0,43	1,46	33,57	33,93	1,20	3,54
	21,63				29,13				32,95			
	20,91				29,08				35,27			
75% M3	22,13	20,47	1,52	7,40	23,48	26,81	3,22	11,99	32,09	33,21	3,23	9,73
	19,15				29,90				30,69			
	20,14				27,04				36,85			
100% M3	25,67	25,26	0,58	2,28	34,78	34,91	0,18	0,52	35,05	35,99	1,32	3,68
	24,86				35,04				36,92			
	*****				*****				*****			

Para uma melhor visualização dos resultados, as figuras 84 a 86 apresentam a evolução da resistência à compressão em relação aos teores de substituição analisados para as idades de 7, 28 e 90 dias.

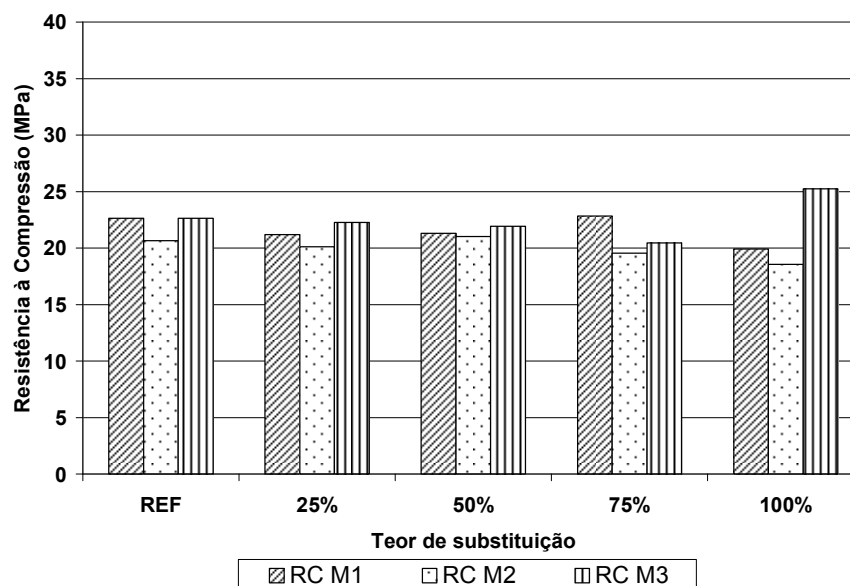


Figura 84 – Resistência à compressão dos concretos com agregado miúdo reciclado aos 7 dias

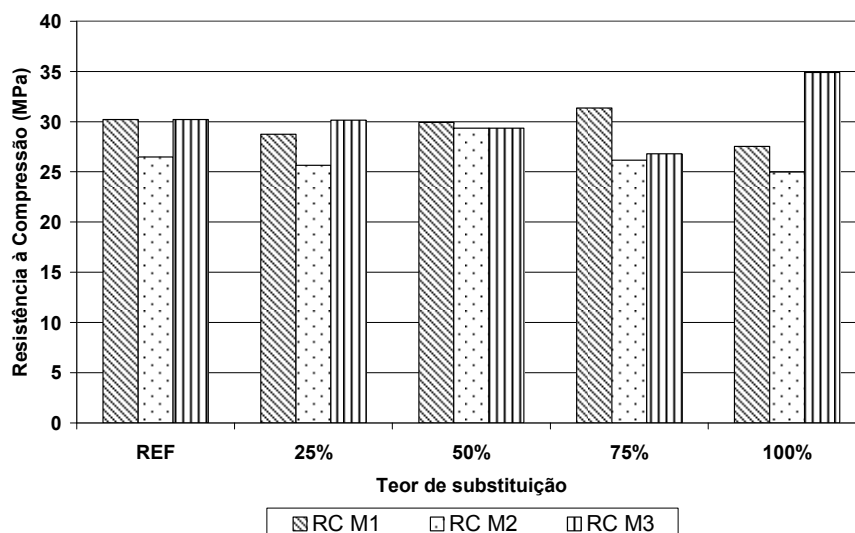


Figura 85 – Resistência à compressão dos concretos com agregado miúdo reciclado aos 28 dias

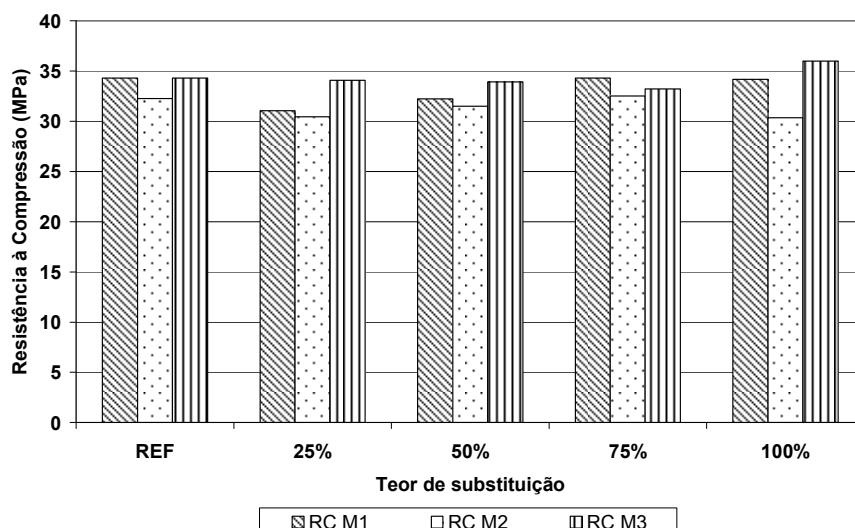


Figura 86 – Resistência à compressão dos concretos com agregado miúdo reciclado aos 90 dias

Pela análise das tabelas 50, 51 e 52 e figuras 84 a 86, percebe-se que praticamente não houve uma variação importante na resistência à compressão dos concretos com a substituição de agregados miúdos naturais pelos agregados miúdos reciclados, encontrando-se valores no mesmo patamar. Em idades avançadas, a diferença em relação à referência diminuiu consideravelmente, apresentando resistências superiores em relação à referência.

O bom desempenho dos concretos com teores elevados, se deve principalmente à redução da relação a/c efetiva, o que leva a resistências maiores. As misturas M2 apresentaram uma resistência 10% menor em relação às outras misturas, principalmente devido ao efeito filler causado pelos finos presentes nas misturas M1 e M3.

A presença de fino calcinado pouco influenciou nas propriedades do estado endurecido dos concretos. A mistura M3 apresentou uma leve tendência de aumento na resistência em relação aos concretos com agregado reciclado bruto, especialmente em idades avançadas. Este ganho na resistência pode ser atribuído à atividade pozolânica dos finos dos agregados reciclados. A fim de avaliar a variação da resistência dos concretos para as misturas com agregado reciclado fino, a tabela 53 apresenta a variação porcentual entre as misturas M1 e M3 para todas as idades, em relação à mistura M1.

Tabela 53 – Comparação das resistências entre os concretos M1 e M3

<b>Varição da resistência entre M1 e M3 (%)</b>			
<b>Idade</b>	<b>7 dias</b>	<b>28 dias</b>	<b>90 dias</b>
<b>25%</b>	5,03	4,87	9,73
<b>50%</b>	2,96	-1,93	5,27
<b>75%</b>	-10,43	-14,51	-3,20
<b>100%</b>	26,86	26,80	5,27

Pela análise da tabela 53, não houve uma variação importante entre os concretos com agregados reciclados brutos e calcinados, exceto para 100% de substituição, onde a diferença chega a 26% para idades de 7 e 28 dias.

Em comparação com o trabalho desenvolvido por KHATIB (2005), onde os concretos apresentaram um desempenho melhor com uma redução de 12% e 5% para 100% e 25% de substituição, respectivamente aos 28 dias. O desenvolvimento da taxa mais elevada de resistência entre 28 e 90 dias de concreto também foi evidenciado pelo autor, que atribuiu esse aumento à reação pozolânica causada pelos teores de sílica e alumina dos agregados cerâmicos com a portlandita produzidas na hidratação do cimento.

Os agregados reciclados graúdos também foram analisados quanto a sua resistência mecânica. Foram analisados os agregados graúdos reciclados sem a parcela inferior a 4,8mm (M4) e com a parcela inferior a 4,8mm (M5), como apresentado na metodologia. As tabelas 54 e 55 e as figuras 87 a 89 apresentam os resultados do ensaio de resistência à compressão dos concretos com agregados graúdos reciclados.

Tabela 54 – Resistência à compressão média dos concretos M4

Idade	7 dias				28 dias				90 dias			
	R. Comp. (MPa)	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)	R. Comp. (MPa)	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)	R. Comp. (MPa)	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
REF M4	17,97	18,75	1,11	5,92	23,77	23,34	0,60	2,57	31,45	30,27	1,67	5,52
	19,54				22,92				29,09			
	*****				*****				*****			
25% M4	18,65	17,60	1,19	6,75	24,58	24,23	0,49	2,01	31,06	29,51	2,10	7,12
	16,31				*****				30,36			
	17,85				23,89				27,12			
50% M4	16,82	16,72	0,12	0,70	23,58	22,61	1,59	7,03	28,23	26,58	2,24	8,41
	16,59				23,48				27,47			
	16,76				20,78				24,03			
75% M4	16,80	16,83	0,05	0,27	20,32	19,80	1,30	6,58	27,81	27,85	0,05	0,19
	16,86				18,32				27,88			
	*****				20,76				*****			
100% M4	14,27	14,22	0,07	0,50	18,98	19,05	0,12	0,64	22,85	22,66	0,27	1,19
	14,17				19,19				22,47			
	*****				18,97				*****			

Tabela 55 – Resistência à compressão média dos concretos M5

Idade	7 dias				28 dias				90 dias			
	R. Comp. (MPa)	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)	R. Comp. (MPa)	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)	R. Comp. (MPa)	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
REF M5	20,07	19,92	0,21	1,05	23,42	24,13	1,01	4,18	30,17	30,39	0,31	1,01
	19,78				24,85				30,61			
	*****				*****				*****			
25% M5	19,49	19,59	0,15	0,78	25,31	25,72	0,58	2,24	28,95	29,85	1,26	4,23
	19,70				26,13				30,74			
	*****				*****				*****			
50% M5	20,35	20,71	0,51	2,44	27,60	26,89	1,00	3,71	33,76	33,70	0,09	0,26
	21,07				26,19				33,63			
	*****				*****				*****			
75% M5	19,38	19,95	0,81	4,05	22,84	22,66	0,25	1,11	28,68	29,17	0,70	2,39
	20,52				22,49				29,67			
	*****				*****				*****			
100% M5	17,92	18,32	0,56	3,05	25,85	23,36	3,52	15,05	30,37	28,65	2,42	8,45
	18,71				20,88				26,94			
	*****				*****				*****			



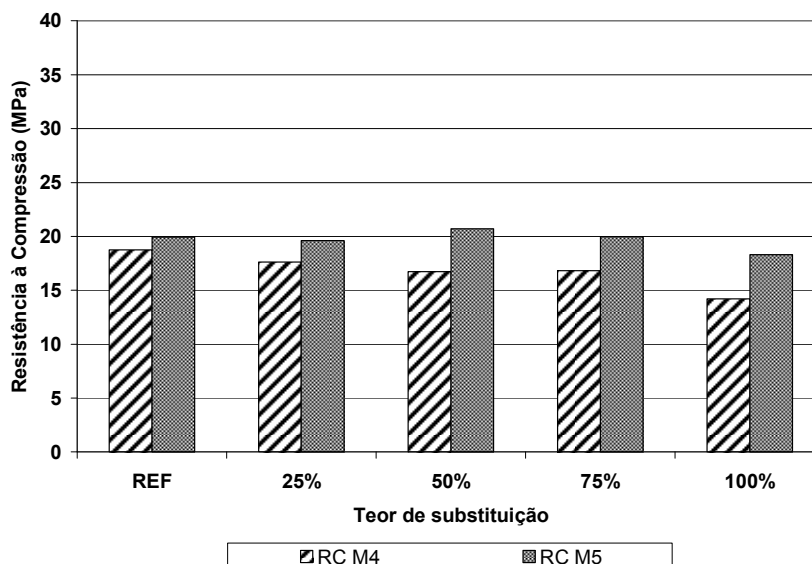


Figura 87 – Resistência à compressão dos concretos com agregado graúdo reciclado aos 7 dias

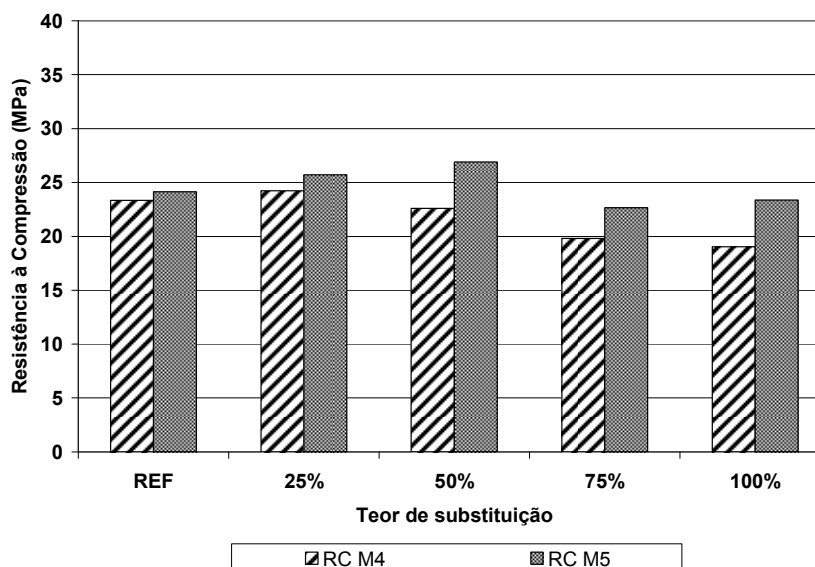


Figura 88 – Resistência à compressão dos concretos com agregado graúdo reciclado aos 28 dias

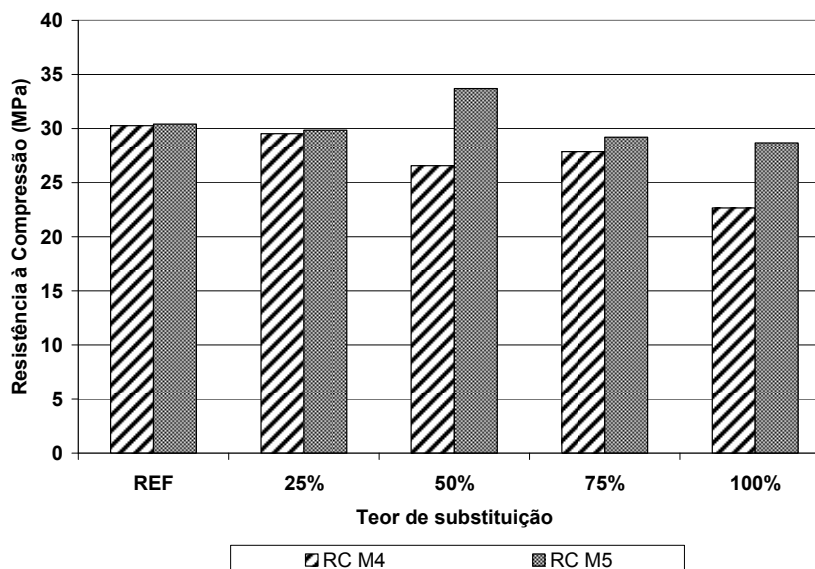


Figura 89 – Resistência à compressão dos concretos com agregado graúdo reciclado aos 90 dias

Para os concretos com agregados graúdos reciclados, pôde-se observar uma redução na resistência à compressão com o aumento do teor de substituição em relação à referência. Essa diferença pode chegar a 20% para teores de substituição até 100%. As misturas de concreto M5 apresentaram resistências à compressão maiores em relação as concretos M4, devido ao maior empacotamento das partículas que causa uma diminuição da porosidade.

Em comparação com trabalhos desenvolvidos por outros autores, os concretos apresentaram um melhor desempenho àqueles estudados por CORREIA, J.R.; BRITO, J.; PEREIRA, A.S. (2006), que obtiveram uma redução de 45% e 22% para uma substituição e 100% e 22% do agregado reciclado, respectivamente. POON, C.S.; KOU, S.C.; LAM, L. (2006) encontraram uma redução de 24% na resistência à compressão utilizando 100% de agregado graúdo reciclado. Essa diferença no comportamento dos concretos, em relação a outras pesquisas, pode ser atribuída a vários fatores como consumo de cimento, relação água/cimento, característica dos agregados reciclados utilizados por outros pesquisadores.

Com respeito aos acréscimos de resistência em relação às idades de ensaio, a tabela 56 apresenta o acréscimo da resistência dos concretos em relação à idade.

Tabela 56 – Acréscimo da resistência dos concretos com agregados reciclados de RCD em função da idade

<b>Acréscimo da resistência à compressão (%)</b>					
<b>Mistura</b>	<b>7 dias → 28 dias</b>	<b>28 dias → 90 dias</b>	<b>Mistura</b>	<b>7 dias → 28 dias</b>	<b>28 dias → 90 dias</b>
<b>REF M1</b>	33,34	13,58	<b>REF M4</b>	24,47	29,67
<b>25% M1</b>	35,57	7,99	<b>25% M4</b>	37,65	21,80
<b>50% M1</b>	40,44	7,69	<b>50% M4</b>	35,24	17,52
<b>75% M1</b>	37,19	9,40	<b>75% M4</b>	17,64	40,65
<b>100% M1</b>	38,27	24,16	<b>100% M4</b>	33,96	19,00
<b>REF M2</b>	28,27	21,80	<b>REF M5</b>	21,11	25,93
<b>25% M2</b>	27,54	18,55	<b>25% M5</b>	31,27	16,05
<b>50% M2</b>	25,50	19,39	<b>50% M5</b>	29,87	25,29
<b>75% M2</b>	33,74	24,36	<b>75% M5</b>	13,58	28,72
<b>100% M2</b>	34,64	21,54	<b>100% M5</b>	27,54	22,66
<b>REF M3</b>	33,34	13,58			
<b>25% M3</b>	35,37	12,99			
<b>50% M3</b>	33,77	15,59			
<b>75% M3</b>	30,94	23,87			
<b>100% M3</b>	38,20	3,08			

Quanto ao ganho de resistência, o acréscimo foi maior de 7 dias para 28 dias devido à hidratação mais acelerada do cimento nas primeiras idades. Em relação aos concretos com agregado miúdo reciclado, os concretos M1 e M3 apresentaram um acréscimo de resistência maior em relação aos concretos M2. De 28 a 90 dias pode-se observar que o ganho na

resistência dos concretos M3 foi maior em relação aos concretos M1, devido à maior atividade pozolânica dos finos calcinados, cujo efeito é maior especialmente em idades avançadas.

Analisando os concretos com agregado reciclado graúdo (M4 e M5), pode-se afirmar que o concreto M4 apresentou uma leve tendência de aumento da resistência em relação ao concreto M5, especialmente nas primeiras idades. Para idades avançadas essa tendência pode mudar, especialmente para altos teores de substituição.

#### 4.5.5 Módulo de Deformação dos concretos

O comportamento à deformação dos corpos-de-prova dos concretos produzidos com agregado miúdo reciclado está ilustrado nas figuras 90 a 95, que apresentam as curvas “Tensão *versus* Deformação” para as dosagens fabricadas em função das idades dos ensaios.

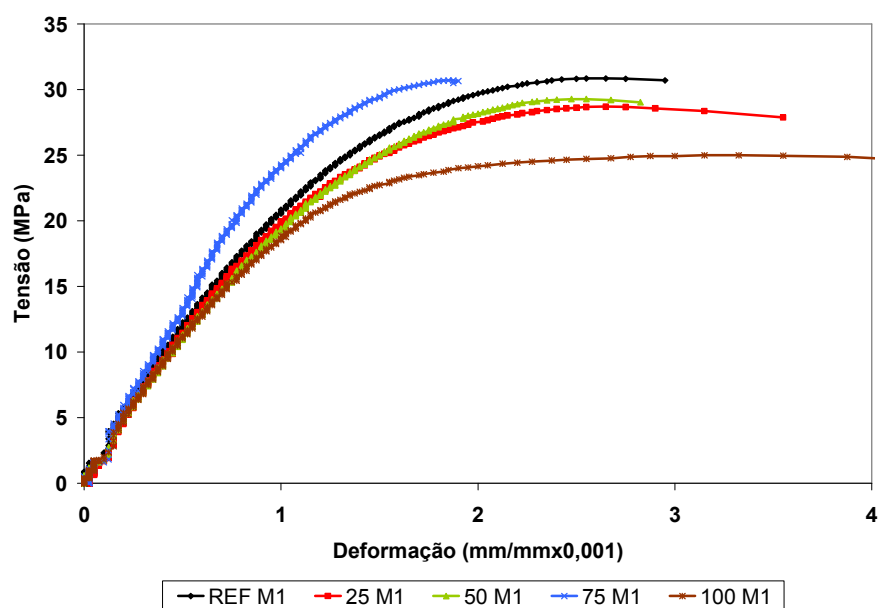
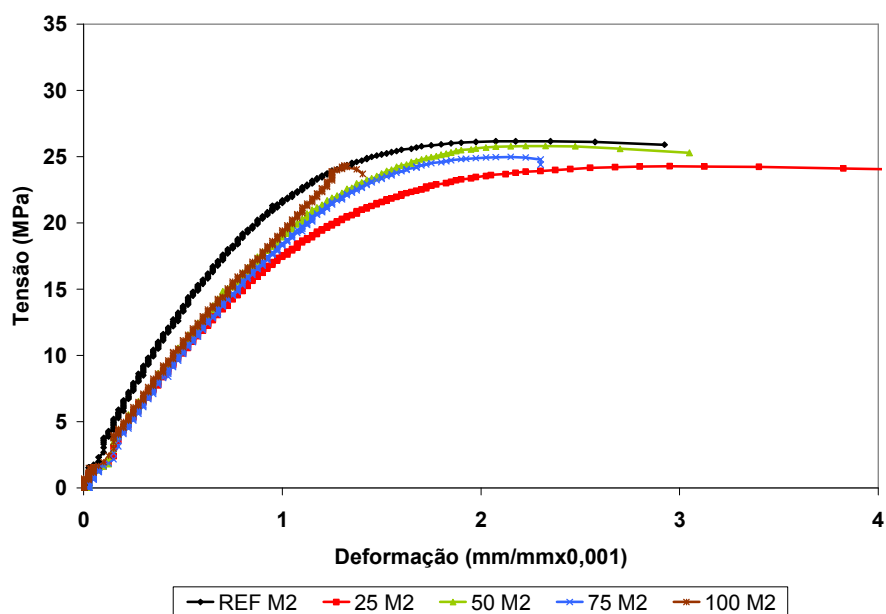
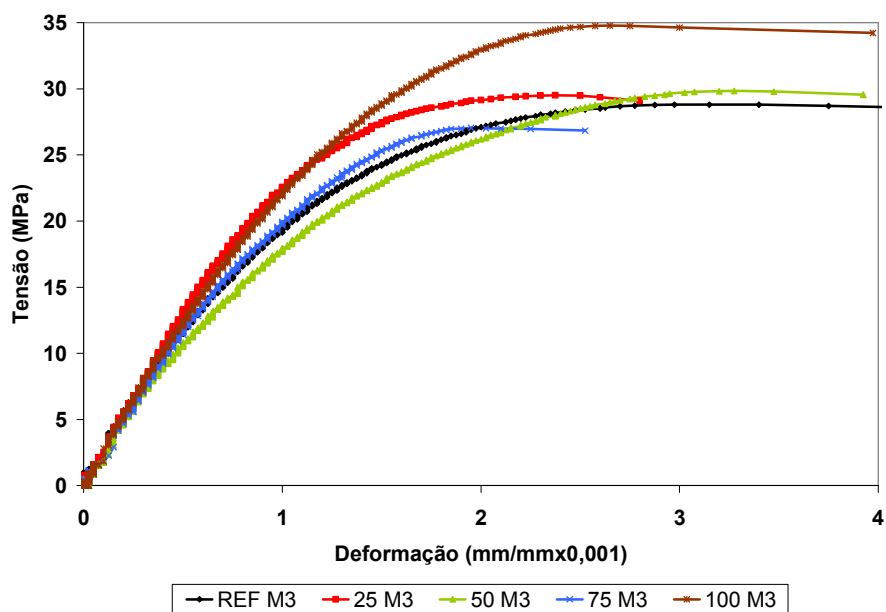


Figura 90 – Curvas Tensão *versus* Deformação dos concretos aos 28 dias - M1

Figura 91 – Curvas Tensão *versus* Deformação dos concretos aos 28 dias – M2Figura 92 – Curvas Tensão *versus* Deformação dos concretos aos 28 dias - M3

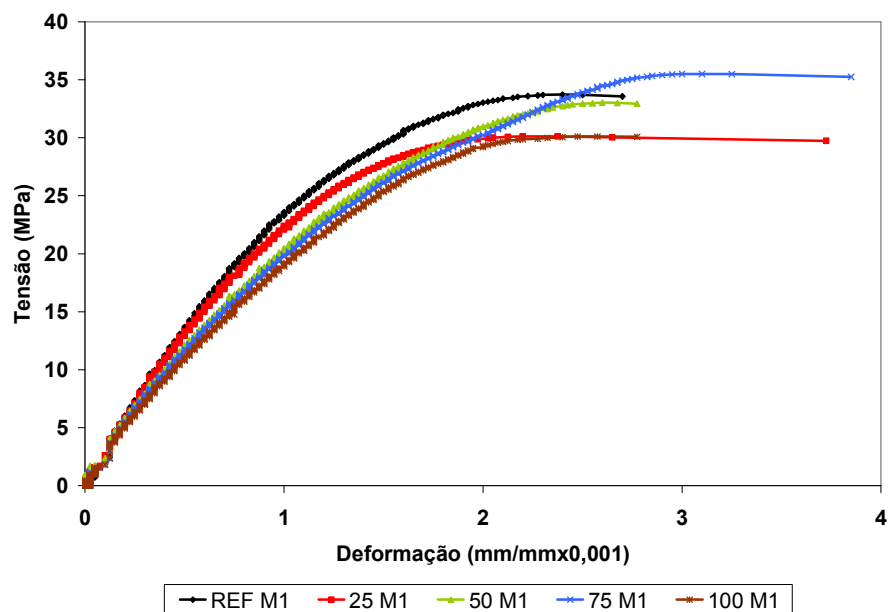


Figura 93 – Curvas Tensão *versus* Deformação dos concretos aos 90 dias – M1

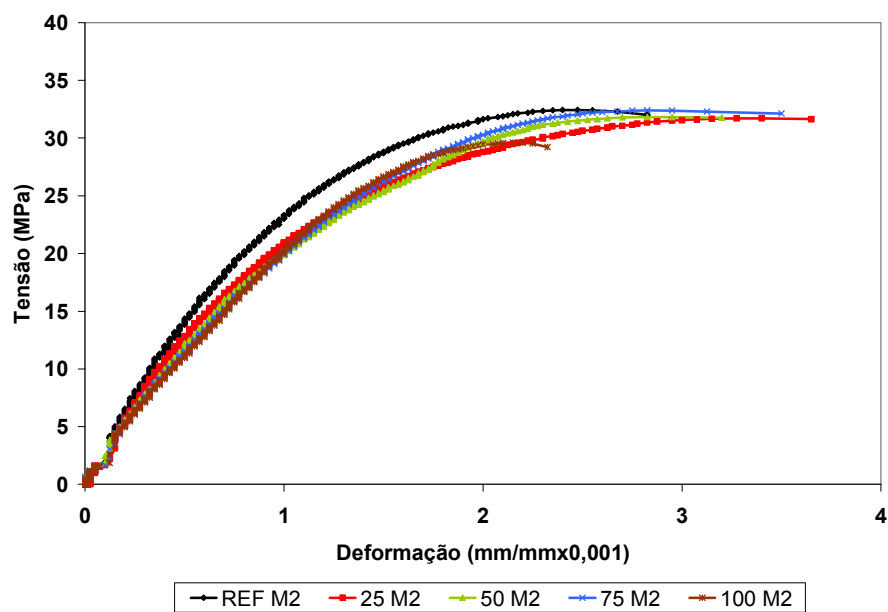


Figura 94 – Curvas Tensão *versus* Deformação dos concretos aos 90 dias – M2

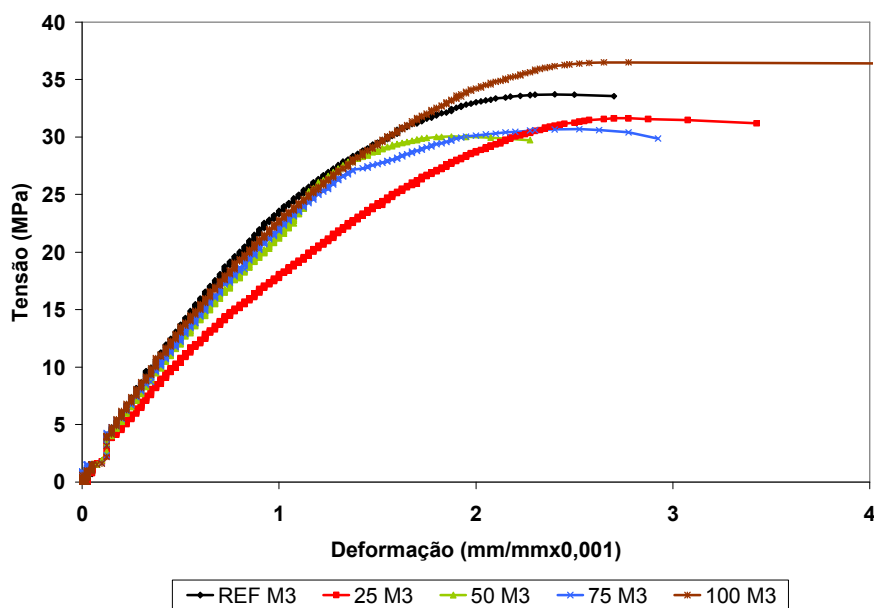


Figura 95 – Curvas Tensão versus Deformação dos concretos aos 90 dias - M3

De acordo com as figuras 90 a 95, observa-se que houve um leve aumento na deformação específica com o aumento do teor de substituição pelos agregados miúdos reciclados. O valor do módulo de deformação variou até 20% e 15% para 28 e 90 dias, respectivamente nos concretos M1 e M2. Para os concretos M3, os valores dos módulos encontram-se no mesmo patamar em relação à referência para 28 e 90 dias. A mistura M2 apresentou uma deformação específica maior em relação aos outros concretos.

Para os concretos com agregado gráúdo reciclado foram considerados a presença de partículas inferiores a 4,8mm nos agregados reciclados, como apresentado na metodologia. As figuras 96 a 99 apresentam as curvas “Tensão *versus* Deformação” para os concretos com agregado gráúdo reciclado.

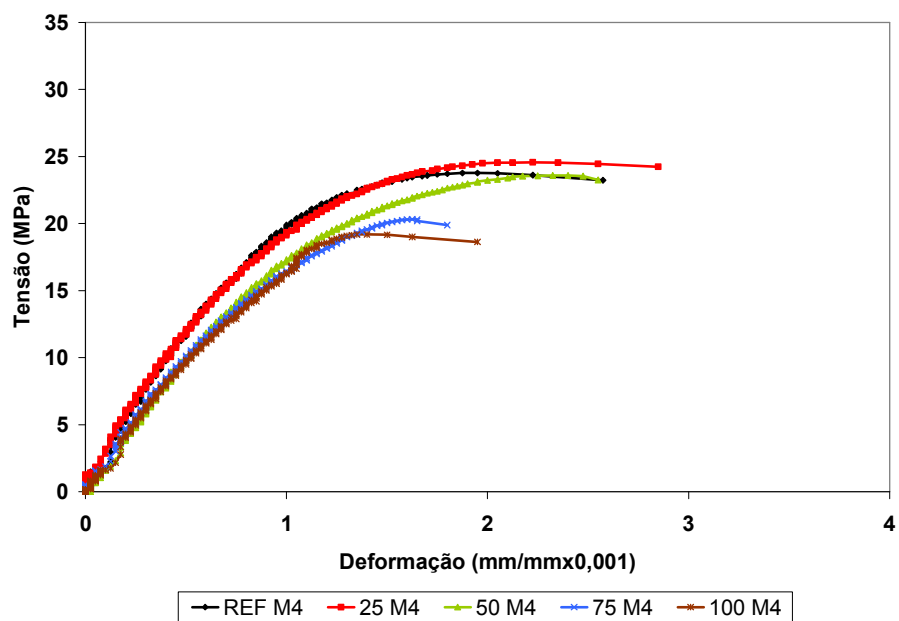


Figura 96 – Curvas Tensão *versus* Deformação dos concretos aos 28 dias - M4

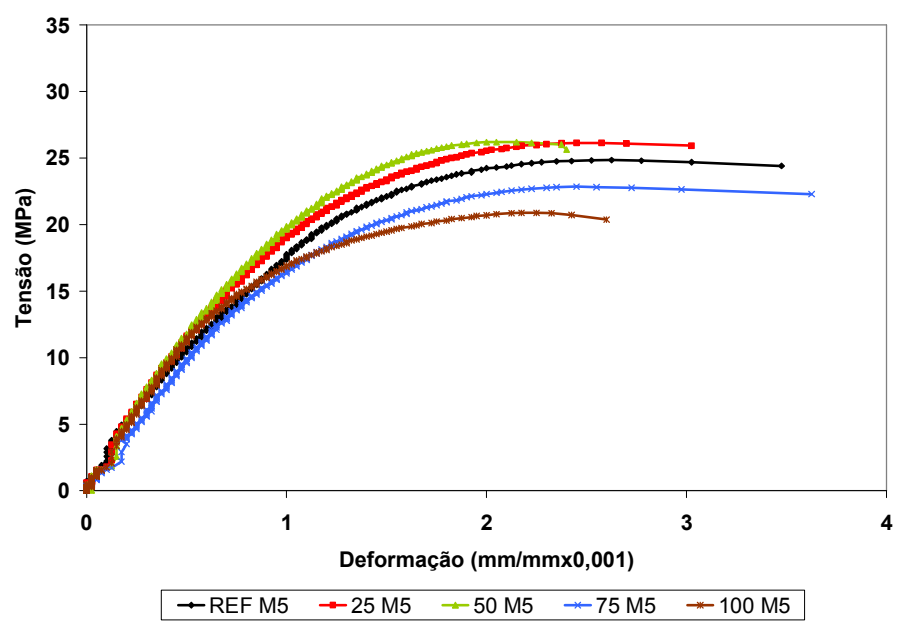


Figura 97 – Curvas Tensão *versus* Deformação dos concretos aos 28 dias - M5

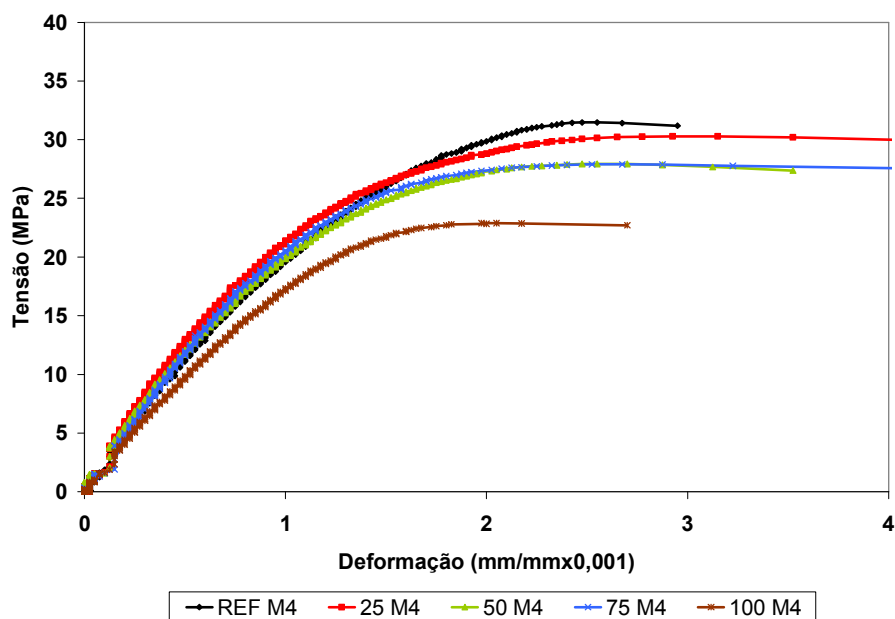


Figura 98 – Curvas Tensão *versus* Deformação dos concretos aos 90 dias - M4

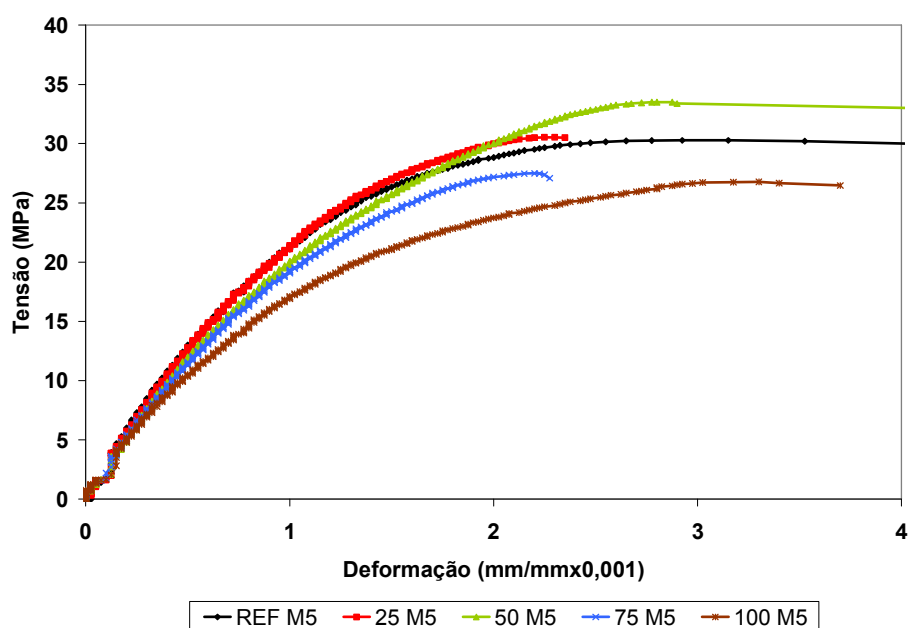


Figura 99 – Curvas Tensão *versus* Deformação dos concretos aos 90 dias - M5

Pela análise das figuras 96 a 99, percebe-se que os concretos M5 apresentaram maior deformação específica em relação ao concreto M4 aos 28 e 90 dias. As tabelas 57 a 61 apresentam os valores dos módulos de deformação obtidos segundo as curvas de “Tensão *versus* Deformação” apresentadas para os concretos.



Tabela 57 – Resultados do Módulo de Deformação dos concretos M1 com agregado miúdo reciclado

Idade	28 dias				90 dias			
	Módulo Def. (GPa)	Média (GPa)	D.P. (GPa)	C.V. (%)	Módulo Def. (GPa)	Média (GPa)	D.P. (GPa)	C.V. (%)
REF M1	24,1	23,8	0,5	2,1	28,1	28,0	0,5	1,9
	23,3				27,5			
	24,2				28,6			
25% M1	22,0	23,0	0,9	4,0	26,3	27,5	1,9	6,7
	23,8				29,7			
	23,2				26,7			
50% M1	23,7	23,1	0,7	2,9	26,4	24,9	1,4	5,5
	23,4				24,6			
	22,4				23,7			
75% M1	24,5	23,7	1,0	4,1	25,0	24,5	1,2	5,0
	24,0				23,1			
	22,6				25,4			
100% M1	18,9	21,6	3,8	17,7	23,1	23,8	1,4	5,8
	*****				22,8			
	24,3				25,4			

Tabela 58 – Resultados do Módulo de Deformação dos concretos M2 com agregado miúdo reciclado

Idade	28 dias				90 dias			
	Módulo Def. (GPa)	Média (GPa)	D.P. (GPa)	C.V. (%)	Módulo Def. (GPa)	Média (GPa)	D.P. (GPa)	C.V. (%)
REF M2	28,1	28,0	1,5	5,3	25,5	28,9	3,0	10,4
	29,4				30,7			
	26,4				30,6			
25% M2	22,6	24,0	1,5	6,4	25,7	25,9	1,5	5,9
	25,6				24,5			
	23,8				27,6			
50% M2	24,1	23,5	1,0	4,4	26,4	25,0	1,3	5,1
	22,3				23,9			
	24,0				24,8			
75% M2	22,4	22,0	0,5	2,1	23,7	23,2	0,4	1,9
	22,2				23,0			
	21,5				22,8			
100% M2	20,9	22,1	1,6	7,4	25,3	24,6	1,0	4,1
	23,2				23,9			
	*****				*****			

Tabela 59 – Resultados do Módulo de Deformação dos concretos M3 com agregado miúdo reciclado

Idade	28 dias				90 dias			
	Módulo Def. (GPa)	Média (GPa)	D.P. (GPa)	C.V. (%)	Módulo Def. (GPa)	Média (GPa)	D.P. (GPa)	C.V. (%)
REF M3	24,1	23,8	0,5	2,1	28,1	28,0	0,5	1,9
	23,3				27,5			
	24,2				28,6			
25% M3	24,5	24,4	0,5	2,0	23,0	26,1	2,8	10,7
	24,8				26,9			
	23,9				28,3			
50% M3	22,5	22,7	0,8	3,4	29,5	27,7	1,5	5,5
	22,0				26,8			
	23,5				26,9			
75% M3	21,8	22,9	2,0	8,7	26,1	26,4	1,7	6,3
	25,2				24,9			
	21,8				28,2			
100% M3	24,8	24,2	0,9	3,7	28,5	27,4	1,5	5,6
	23,6				26,3			
	*****				*****			

Tabela 60 – Resultados do Módulo de Deformação dos concretos M4 com agregado graúdo reciclado

Idade	28 dias				90 dias			
	Módulo Def. (GPa)	Média (GPa)	D.P. (GPa)	C.V. (%)	Módulo Def. (GPa)	Média (GPa)	D.P. (GPa)	C.V. (%)
REF M4	24,1	24,8	1,0	4,0	26,8	26,6	0,4	1,5
	25,5				26,3			
	*****				*****			
25% M4	25,0	23,6	2,0	8,3	27,4	28,1	0,8	2,9
	*****				29,0			
	22,2				27,8			
50% M4	20,2	19,5	0,7	3,4	24,5	24,2	0,5	2,0
	19,1				23,8			
	19,1				*****			
75% M4	22,4	20,5	1,7	8,3	23,9	24,1	0,2	1,0
	20,0				24,2			
	19,1				*****			
100% M4	20,8	20,2	1,0	5,0	21,2	21,5	0,4	2,0
	19,0				21,8			
	20,8				*****			

Tabela 61 – Resultados do Módulo de Deformação dos concretos M5 com agregado graúdo reciclado

Idade	28 dias				90 dias			
	Módulo Def. (GPa)	Média (GPa)	D.P. (GPa)	C.V. (%)	Módulo Def. (GPa)	Média (GPa)	D.P. (GPa)	C.V. (%)
REF M5	23,8	23,1	1,0	4,2	28,0	27,1	1,3	4,9
	22,4				26,1			
	*****				*****			
25% M5	23,6	23,1	0,8	3,3	25,2	26,0	1,1	4,3
	22,6				26,8			
	*****				*****			
50% M5	23,1	23,3	0,3	1,2	25,7	24,8	1,2	4,8
	23,5				24,0			
	*****				*****			
75% M5	19,5	20,2	0,9	4,5	23,2	23,6	0,6	2,5
	20,8				24,0			
	*****				*****			
100% M5	22,3	24,0	2,3	9,7	24,9	24,8	0,1	0,5
	25,6				24,7			
	*****				*****			

Para os concretos com agregado miúdo reciclado, houve uma leve tendência de redução no módulo de deformação com o aumento do teor de substituição. Essa diferença é maior para os concretos aos 28 dias devido a que em idades avançadas existe o efeito pozolânico dos finos que melhora a matriz cimentícia aumentando a resistência frente a esforços externos. Assim, com a redução da porosidade e melhoria da zona de transição pelos produtos da reação pozolânica, os valores dos módulos de deformação terão uma evolução diferente em relação aos outros concretos.

Essa tendência da redução do módulo também foi observada no trabalho desenvolvido por KHATIB (2005), onde o módulo de elasticidade foi menor para os concretos com resíduos cerâmicos em relação aos concretos com resíduo de concretos. No estudo de POON, C.S; CHAN, D. (2006), a redução do módulo de elasticidade do concreto foi de 10% para os concretos com 20% de agregado cerâmico, superior em relação aos 4% encontrados no presente trabalho.

No caso dos concretos com agregado graúdo reciclado, o concreto M5 apresenta valores de módulo de deformação ligeiramente maior em relação ao concreto M4, principalmente em idades avançadas. Isto é devido a que o concreto M5 apresentou maior parcela de partículas inferiores a 4,8mm, que preencheram os vazios entre os grãos, aumentando o empacotamento e a resistência aos esforços. Destaca-se ainda que com 25% de substituição, o valor do módulo de deformação encontrou-se próximo ao valor de referência.

Em relação ao estudo desenvolvido por SENTHAMARAI, R.M.; MONOHARAN, P.D.

(2005), os resultados foram similares onde obtiveram uma redução de 2,4% do módulo de elasticidade para os concretos com agregado reciclado. A tabela 62 apresenta a evolução do aumento do módulo de deformação dos concretos produzidos em função da idade de ensaio.

Tabela 62 – Acréscimo no módulo de deformação dos concretos

<b>Acréscimo no módulo de deformação (%)</b>			
<b>Mistura</b>	<b>28 dias → 90 dias</b>	<b>Mistura</b>	<b>28 dias → 90 dias</b>
<b>REF M1</b>	17,6	<b>REF M4</b>	7,1
<b>25% M1</b>	19,8	<b>25% M4</b>	18,8
<b>50% M1</b>	7,5	<b>50% M4</b>	24,2
<b>75% M1</b>	3,4	<b>75% M4</b>	17,5
<b>100% M1</b>	10,0	<b>100% M4</b>	6,7
<b>REF M2</b>	3,4	<b>REF M5</b>	17,2
<b>25% M2</b>	8,1	<b>25% M5</b>	12,6
<b>50% M2</b>	6,7	<b>50% M5</b>	6,5
<b>75% M2</b>	5,1	<b>75% M5</b>	17,0
<b>100% M2</b>	11,5	<b>100% M5</b>	3,6
<b>REF M3</b>	17,6		
<b>25% M3</b>	6,8		
<b>50% M3</b>	22,3		
<b>75% M3</b>	15,0		
<b>100% M3</b>	13,2		

Os incrementos após 28 dias para os concretos com agregado miúdo reciclado calcinado, foram significativamente superiores em relação aos outros concretos. Isto ocorre devidamente a uma atividade pozolânica maior principalmente em idades avançadas, aumentando sua resistência aos esforços solicitados. O menor incremento ocorreu no concreto M2, sem a parcela de finos inferiores a 0,15mm nos agregados utilizados.

Para os concretos com agregado graúdo reciclado, os concretos M4 e M5 apresentaram um acréscimo no mesmo patamar, para todos os teores analisados.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação dos agregados miúdos reciclados, como material substituinte ao agregado miúdo natural na produção de concretos e argamassas utilizada na pesquisa, possibilitou o estudo de vários parâmetros no estado fresco e endurecido, além de verificar a influência da presença de agregados inferiores a 4,8mm nos agregados graúdos reciclados na produção de concretos.

As partículas de agregado miúdo, quando caracterizadas fisicamente, se apresentam semelhantes aos grãos do agregado natural, porém as diferenças na massa específica, absorção, quantidade de finos, influenciaram as propriedades das misturas, principalmente a dosagem onde a substituição foi feita em volume. A substituição em volume foi um procedimento adotado bastante adequado para a dosagem, devido a que se conseguiu uma melhor distribuição das partículas nas misturas, avaliando melhor a influência dos próprios materiais.

A correção da composição granulometria dos agregados mostrou ser um procedimento bastante satisfatório, devido à que através desse método foi possível obter uma distribuição uniforme para todas as misturas. Além disso, possibilitou uma verificação melhor da influência dos grãos de agregado reciclado em comparação aos agregados naturais.

A presença de metais pesados, como o Cromo e Zinco nos agregados reciclados, serve de alerta para a utilização desses materiais, devido aos efeitos da presença desses elementos na hidratação do cimento e na resistência.

No estudo da atividade pozolânica dos agregados reciclados finos, proposto pela metodologia do laboratório ValoRes da UFSC, constatou-se um aumento significativo na resistência à compressão das pastas elaboradas com  $\text{Ca(OH)}_2$  e agregado reciclado calcinado, assim como, um aumento do consumo do hidróxido de cálcio com o aumento do teor de substituição dos agregados reciclados. A temperatura de calcinação a 600°C apresentou melhor desempenho em comparação à temperatura de 800°C, na resistência à compressão das pastas e consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$ .

A determinação do IAP pelo método proposto pela NBR 5752 (1992), não foi um procedimento adequado na avaliação dos agregados reciclados, devido a grande variação da relação a/mc entre as misturas estudadas, resultando em resistência baixas.

O potencial de absorção de água foi avaliado através de um esquema de ensaio, que visa inicialmente à migração de água para os agregados reciclados numa amostra granular, sem presença de aglomerante, por meio de absorção capilar. Através do ensaio, pôde-se constatar

que os agregados reciclados apresentaram um potencial de absorção maior em relação aos agregados naturais, devido à maior absorção dos grãos dos agregados reciclados, considerando a mesma distribuição granulométrica para os dois agregados. A presença de partículas finas nos agregados causa um refinamento dos poros capilares aumentando a cinética de absorção dos agregados, porém reduz a quantidade de água absorvida final.

O consumo real de cimento por  $m^3$  dos concretos diminuiu com o aumento do teor de substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados, devido principalmente a redução na massa específica dos concretos. Já para as argamassas não foi constatado uma redução importante no consumo de cimento com o aumento do teor de substituição.

As diferentes dosagens de concretos e argamassas permitiram que as substituições fossem melhor percebidas, pois a fixação da relação a/c acarreta uma profunda mudança na cinética de umidade das partículas porosas e na quantidade de água livre, devido a que parte da água de mistura fica no interior dos agregados porosos.

No estado fresco, os agregados reciclados promoveram uma redução na fluidez das argamassas e concretos, devido principalmente à elevada absorção dos grãos. Isto dificultou a aplicação e moldagem das misturas, especialmente para altos teores de substituição. O controle da trabalhabilidade das misturas com agregados reciclados permitiria aumentar a atratividade desses agregados, devido aos bons desempenhos obtidos na resistência mecânica das misturas.

As massas específicas dos concretos e argamassas apresentaram uma redução com o aumento do teor de substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado. O elevado teor de ar incorporado, assim como, os agregados reciclados que possuem uma massa específica menor, interferiram na massa específica da mistura.

Foi constatado um efeito benéfico da utilização dos agregados reciclados de RCD para o controle da retração plástica dos concretos, onde a deformação final foi reduzido com o aumento do teor de substituição. Com isso, foi aceita a hipótese de que os agregados reciclados porosos ajudam no controle da retração dos concretos, atuando como reservatório interno na mistura, servindo como uma cura interna na mistura.

Os parâmetros de calorimetria medidos na amostra em calorímetro semi-adiabático como a determinação da variação de temperatura ( $\Delta T_i$ ), capacidade térmica da amostra ( $C_s$ ), calor gerado no tempo ( $Q_i$ ), taxa de calor gerada ( $\Delta Q_i$ ) e o calor acumulado para um tempo de 20 horas ( $Q_{20h}$ ) foram bons indicadores para avaliar o efeito dos agregados reciclados na hidratação das misturas.

As reduções no tempo de pico de calor com o aumento de teor de substituição dos agregados, mostraram que os agregados reciclados contribuíram para uma redução no tempo de fim de pega para os concretos. A redução foi de 30% para a mistura M1 e 50% para a mistura M3 para 100% de substituição, com tempo médio de calor de 12 horas para M1 e 11 horas para M3.

Em relação ao parâmetro do calor gerado, foi evidenciado um aumento do calor com o acréscimo do teor de substituição, chegando a 15% em relação à referência para 100% de substituição. Em relação à taxa de calor, houve um acréscimo na taxa somente para teores altos de substituição dos agregados, especialmente para agregados reciclados calcinados.

Comparativamente entre os concretos, pode-se afirmar que o processo de calcinação dos finos de RCD não influenciou nos parâmetros de calorimetria em relação aos agregados reciclados brutos. Baseado nos vários resultados obtidos, pode-se considerar que os resíduos utilizados de RCD influenciaram o comportamento dos concretos estudados em relação à cinética de hidratação, alterando os parâmetros envolvidos, permitindo que as reações de hidratação sejam também alteradas.

Na análise no estado endurecido das argamassas, foi evidenciado um efeito de empacotamento importante dos finos inferiores a 0,15mm nas misturas M1 e M3, onde apresentaram resistências à flexão e compressão superiores à mistura M2. Para o ensaio de resistência à compressão das argamassas, foi constatada uma redução da resistência com o aumento do teor de substituição dos agregados miúdos reciclados, chegando a 18% para M1 e 16% para M3 para uma substituição de 100%. O processo de calcinação dos finos não contribuiu para um melhor desempenho mecânico das argamassas, encontrando-se praticamente no mesmo patamar em relação aos agregados reciclados brutos.

Foi constatado um aumento de até 30% no coeficiente de sorptividade das argamassas com água e álcool com o aumento do teor de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado. Em relação aos ângulos de molhamentos aparentes, todas argamassas apresentaram praticamente o mesmo valor do ângulo de molhamento, não havendo diferença importante entre eles. As misturas com maiores ângulos de molhamento aparente tendem a ter um tempo de ascendência de franjas capilares maiores; porém possuem uma menor quantidade de líquido infiltrado.

A resistência à compressão dos concretos não foi influenciada pela adição de agregados miúdos reciclados em substituição aos agregados naturais. Esse bom desempenho se deve basicamente à redução da relação água/cimento efetiva e melhoria da matriz cimentícia na

mistura, que leva a um aumento da resistência à compressão dos concretos.

A avaliação do material fino mostrou que este material apresenta uma atividade pozolânica importante. Isso demonstra que o material argiloso, presente na composição do resíduo de construção e demolição, pôde ter contribuído para o bom desempenho da resistência dos concretos, que apresentaram valores no mesmo patamar o até mesmo superiores em comparação aos concretos com agregados naturais.

Na análise dos concretos com agregados graúdos reciclados, foi possível constatar resistências maiores de até 20% para os concretos com agregados inferiores a 4,8mm, devido principalmente ao efeito filler causado por essas partículas finas.

Os resultados das propriedades mecânicas dos concretos mostraram uma tendência anormal, em razão a que com à redução do consumo de cimento e elevado teor de ar incorporado, provocaria-se reduções importantes na resistência, fato não evidenciado neste estudo.

No ensaio do módulo de deformação dos concretos, observou-se uma leve redução dos valores dos módulos com o aumento do teor de substituição dos agregados. Essa redução foi menor em idades avançadas onde a atividade pozolânica é maior. Para uma substituição de 25% de substituição, os valores dos módulos encontravam-se próximos aos valores de referência.

Apesar do bom comportamento apresentado pelos concretos com agregados reciclados, no tocante às propriedades mecânicas avaliadas, outros estudos devem ser realizados com o objetivo de confirmar os resultados aqui apresentados. Além disso, devem ser consideradas outras propriedades mecânicas como fluência e retração por secagem e ainda os aspectos relativos à durabilidade das misturas de concreto com agregados reciclados.

Diante das discussões da análise dos resultados da incorporação de materiais granulares reciclados de construção e demolição, em substituição ao agregado miúdo natural, tem-se como conclusão geral que a presença desses materiais, em matrizes cimentícias de argamassa e concreto, provocaram alterações no comportamento dos concretos e argamassas nos estados fresco e endurecido e que esses agregados poderiam perfeitamente ser utilizados na substituição de agregados naturais. Por outro lado, existem algumas restrições e cuidados na utilização dos materiais reciclados analisados de acordo com os parâmetros de dosagem e as propriedades das misturas estudadas.

De um modo geral, este trabalho contribuiu para um melhor entendimento do comportamento dos agregados miúdos reciclados nas propriedades de concretos e argamassas, apresentando



um alto potencial de utilização.

Como sugestões para continuidade da pesquisa e, visando contribuir para a melhoria da compreensão dos fenômenos e mudanças ocorridas com a substituição de agregado natural pelo agregado reciclado, propõe-se alguns tópicos listados abaixo:

- Verificar a influência da compactação dos agregados porosos reciclados no ensaio de absorção de água por capilaridade em amostras granulares, assim como a permeabilidade e ganho de umidade dos materiais;
- Estudar a influência de agregados reciclados previamente umedecidos nas propriedades dos concretos;
- Verificar a influência da incorporação de RCD com relações água/cimento diferentes, fixando-se a trabalhabilidade da mistura;
- Verificar a influência dos agregados miúdos reciclados na fluência, retração por secagem e reação álcalis/agregado nos concretos.

## 6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALMUSALLAM, A.A. **Effect of Environmental Conditions on the Properties of Fresh and Hardened Concrete**. Cement and Concrete Composites, volume 23, pages 353 – 361, 2001.

ANDRADE, L.B. **Metodologia de avaliação para uso de cinzas pesadas de termelétricas como agregado natural para concreto**. 268 f.. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

ANDRADE, L.B.; ROCHA, J.C.; CHERIAF, M. **Aspects of moisture kinetics of coal bottom ash in concrete**. Cement and Concrete Research, volume 37, pages 231 – 241, 2007.

ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico dos concretos**. 149 f. Tese de Doutorado - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ARLIGUIE, G.; GRANDET, J. **Influence de la composition d'un ciment Portland sur son hydratation en presence de zinc**. Cement Concrete Research, vol. 20, pages 517– 524, 1990.

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

\_\_\_\_\_. **Agregados para concreto – Especificação: NBR 7211**. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios: NBR NM 45**. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão: NBR 7215**. Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_\_. **Agregados – Determinação do teor de materiais pulverulentos: NBR 7219**. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. **Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água: NBR NM 53**. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”:** NBR NM 51. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente:** NBR NM 52. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **Agregado miúdo – Determinação da absorção de água:** NBR NM 30. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento:** NBR 5752. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova:** NBR 5738. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone:** NBR NM 67. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos:** NBR 5739. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação:** NBR 8522. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **Argamassa e Concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade:** NBR 9779. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão:** NBR 13279. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade:** NBR 13279. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **Lixiviação de resíduos – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado.** NBR 10005 –Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **Solubilização de resíduos – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado.** NBR 10006 –Rio de Janeiro, 2004.

BAGHABRA AL-AMOUDI, O.S.; MASLEHUDDIN, M.; ABIOLA, T.O. **Effect of type and dosage of silica fume on plastic shrinkage in concrete exposed to hot weather.** Construction and Building Materials; volume 18, pages 737 – 743, 2004.

BARRA, M. **Dosagem de concretos com agregados reciclados: aspectos particulares.** In: RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, ALTERNATIVA ECONÔMICA PARA PROTEÇÃO AMBIENTAL. Anais... São Paulo: PCC-USP, 1997, p.39-43.

BAZUCO, R. S. **Utilização de agregados reciclados de concreto para a produção de novos concretos.** 100 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

BATAYNEH, M.; MARIE, I, ASI, I. **Use of selected waste materials in concrete mixes.** Waste Management; article in press, 2006.

BIANCHINI, G.; MARROCCHINO, R.; TASSINARI, R.; VACCARO, C. **Recycling of construction and demolition waste materials: a chemical-mineralogical appraisal.** Waste Management; volume 25, pages 149 – 159, 2005.

BINICI, H. **Effect of crushed ceramic and basaltic pumice as fine aggregates on concrete mortars properties.** Construction and Building Materials (2006), doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.06.002.

BRITO, J. de; PEREIRA, A. S.; CORREIA, J. R. **Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates**. Cement and Concrete Composites; volume 27, pages 429 – 433, 2005.

CARNEIRO, A. P.; CASSA, J. C.; QUADROS, B. E.; COSTA, D. B.; SAMPAIO, T. S.; ALBERTE, E. P. V. **Caracterização do entulho de Salvador visando a produção de agregado reciclado**. In: ENCONTRO NACIONAL DA TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUIDO. 2000. Salvador. Anais... Salvador: ANTAC, 2000.

CHEN, H. J.; YEN, T.; CHEN, K. H. **Use of building rubbles as recycled aggregates**. Cement and Concrete Research; volume 33, pages 125 – 132, 2003.

COHEN, M.D.; OLEK, J.; DOLCH, W. L. **Mechanics of Plastic Shrinkage Cracking in Portland Cement and Portland Cement-Silica Fume Paste and Mortar**. Cement and Concrete Research; volume 20, pages 103 – 119, 1990.

CORREIA, J. R.; BRITO, J. de, PEREIRA, A. S. **Effects on concrete durability of using recycled ceramic aggregates**. Materials and Structures (2006), doi:10.1617/s11527-005-9014-7.

DEBIEB, F.; KENAI, S. **The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete**. Construction and Building Materials (2007), doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.12.013.

DEVENNY, A.; KHALAF, F.M. **The use of crushed brick as coarse aggregate in concrete**. Mansory International, v. 12, n. 3, p.81-84, 1999.

DOLLIMORE, D.; LERDKANCHANAPORN, S.; GUPTA, J. D.; NIPPANI, S. **An examination of recycled Portland cement concrete rich in dolomite and low in calcite obtained from various locations in Ohio**. Thermochemica Acta; pages 311 – 319, 2001.

EUROPEAN COMMISSION (EC). **Management of construction and demolition waste**. Brussels, Belgium: 2000. Disponível em: <<http://europa.eu.int/comm/enterprise/environment>>. Acesso em: 15 fev. 2007. (DG ENV E.3).

GOLÇALVES, J.P.; TAVARES, L.M.; TOLEDO F., R.D.; FAIRBAIRN, E.M.R.; CUNHA, E.R. **Comparison of natural and manufactured fine aggregates in cement mortars**. Cement and Concrete Research, volume 37, pages 924 – 932, 2007.

HAMASSAKI, L. T.; SBRIGHI NETO, C.; FLORINDO, M. C. **Uso de entulho como agregado para argamassas de alvenaria**. In: WORKSHOP SOBRE RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO, 1996, São Paulo. Anais... São Paulo: EPUSP/ANTAC, 1997. 170 p. p.107–115.

HANSEN, T.C. **Recycled of demolished concrete and masonry**. London: Chapman & Hall, 1992. 316p. Part One: Recycled aggregates and recycled aggregate concrete, p. 1-160. (RILEM TC Report 6).

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 102p. Tese (Livre Docência) – Departamento de Engenharia de Construção Civil – Escola Politécnica de Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

KATZ, A. **Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete.** Cement and Concrete Research, volume 33, pages 703 – 711, 2003.

KHATIB, J. M. **Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate.** Cement and Concrete Research; volume 35, pages 763 – 769, 2005.

LEA, F.M. **The Chemistry of Cement and Concrete.** Third edition. Editora Edward Arnold. 727 p. 1970.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedade mecânicas de concretos produzidos com agregados de resíduos de construção e demolição.** Tese de Doutorado. UFRGS. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2001.

LEVY, S. M. **Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos.** 147p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria.** 184 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

LEVY, S. M.; HELENE, P. **Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development.** Cement and Concrete Research, volume 34, pages 1975–1980, 2004.

LIMA, J. A. R. **Proposição de diretrizes para a produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassa e concretos.** 240 p. Dissertação de Mestrado. EESC. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

LIMBACHIYA, M.C.; MARROCCHINO, E, KOULOURIS, A.; **Chemical – mineralogical characterization of coarse recycled concrete aggregate.** Waste Management; volume 27, pages 201-208, 2007.

MEHTA, P. K. & MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo, Ed. PINI, 1994.

MIRANDA, L. F. R. **Estudo dos fatores que influem na fissuração de revestimentos de argamassa com entulho reciclado.** 172p. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

MIRANDA, LFR; SELMO, SMS. **CDW recycled aggregate renderings: Part I – Analysis of the effect of materials finer than 75µm on mortar properties.** Construction and Building Materials; volume 20, pages 615-624, 2006.

MIRANDA, LFR; SELMO, SMS. **Part II – Analysis of the effect of materials finer than 75µm under accelerated aging performance.** Construction and Building Materials; volume 20, pages 625-633, 2006.

MOLLAH, M.Y.A.; TSAI, Y.-N.; HESS, T.R.; COCKE, L.; FTIR. **An FTIR, SEM and EDS investigation of solidification/stabilization of chromium using Portland cement Type V and Type IP.** J. Hazard. Mater. Volume 30, pages 273– 283, 1992.

NEVILLE, Adam Mathew. **Propriedades do Concreto**. Tradução: Salvador E. Giamusso, 2 ed. rev. Atual, São Paulo: Ed. PINI, 1997.

NOCURI-WCZELIK, W.; MALOLEPSZY, J. **Application of calorimetry in studies of the immobilization of heavy metals in cementitious materials**. *Thermochimica Acta* 269/270, pages 613-619, (1995)

OLMO, I. F.; CHACON, E.; IRABIEN, A. **Influence of lead, zinc, iron (III) and chromium (III) oxides on the setting time and strength development of Portland cement**. *Cement and Concrete Research*, volume 31, pages 1213–1219, 2001.

PINTO, TARCISIO DE PAULA. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. Tese de doutorado defendida no PCC – USP. São Paulo, 1999.

PINTO, TARCISIO DE PAULA. **Utilização de resíduos de construção – estudo do uso em argamassas**. Dissertação de Mestrado defendida no PCC – USP. São Paulo, 1989.

PINTO, T. P. **Entulho de construção: problema urbano que pode gerar soluções**. *Construção São Paulo*, n. 2325, p. 11-12, ago. 1992.

POON; C.S.; KOU, S.C., LAM, L. **Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks**. *Construction and Building Materials*; volume 16, pages 281-289, 2002.

POON, C. S.; CHAN, D. **The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong**. *Resources, Conservation and Recycling*; article in press, 2006.

POON, C. S.; KOU, S.C., LAM, L. **Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete**. *Materials and Structures* (2006), DOI 10.1617/s11527-006-9192-y.

POON; C.S.; CHAN, D. **Effect of contaminants on the properties of concrete paving blocks prepared with recycled concrete aggregates**. *Construction and Building Materials*, volume 21, pages 164–175, 2007.

POON; C.S.; YU, Ann T.W.; Ng, L.H. **On-site sorting of construction and demolition waste in Hong Kong**. *Resources, Conservation and Recycling*, volume 32, pages 157 – 172, 2001.

POON, C.S.; SHUI, Z.H.; LAM, L.; FOK, H.; KOU, S.C. **Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete**. *Cement and Concrete Research*, volume 34, pages 31 – 36, 2004.

RAO, A.; JHA, K.N.; MISRA, S. **Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete**. *Resources, Conservation and Recycling*, volume 50, pages 71 – 81, 2007.

RILEM Recommendation: **Specifications for concrete with recycled aggregates**. *Materials and Structures*, v. 27, p. 557-559, 1994.

RILEM TC 119-TCE **Avoidance of thermal cracking in concrete at early ages**. *Materials and Structures*, v. 30, p. 451-464, 1997.

ROSCZCYNIALSKI, W. **Determination of Pozzolanic activity of Materials by thermal analysis.** Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, volume. 70, pages 387 – 392, 2002.

SANTOS, F.I.G. **Avaliação das propriedades higrotérmicas das argamassas: estudo de caso com as cinzas pesadas.** 186f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2006.

SARDÁ, MARCIA CRISTINA. **Diagnóstico do Resíduo da Construção Civil gerado no município de Blumenau – SC. Potencialidades de Uso em obras públicas.** 129p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFSC. Florianópolis, 2003.

SCHAEFER, C.O. **Avaliação dos metais pesados presentes nos agregados reciclados de resíduos da construção e demolição (RCD) e influência no potencial de lixiviação de matrizes cimentícias.** 174f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2007.

SENTHAMARAI, R. M.; MANOHARAN, P. D. **Concrete with ceramic waste aggregate.** Cement and Concrete Composites; volume 27, pages 910 – 913, 2005.

STEPHAN, D.; MALLMANN, R.; KNOFEL, D.; HARDTL, R. **High intakes of Cr, Ni, and Zn in clinker Part II. Influence on the hydration properties.** Cement and Concrete Research, volume 29, pages 1959–1967, 1999.

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; article in press, 2006.

TASHIRO, C. OBA, J. **The effects of  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ,  $\text{ZnO}$  and  $\text{PbO}$  on the compressive strength and the hydrates of the hardened  $\text{C}_3\text{A}$  paste.** Cement Concrete Research, volume 9, pages 253– 258, 1979.

TASHIRO, C. OBA, J., AKAMA, K. **The effects of several heavy metal oxides on the formation of ettringite and the microstructure of hardened ettringite.** Cement Concrete Research, volume 9, pages 303– 308, 1979.

TAYLOR, H.F.W. **Cement Chemistry.** Academic Press. London. 475 p. 1969.

TOLEDO F., R.D.; GONÇALVES, J.P.; AMERICANO, B.B.; FAIRBAIRN, E.M.R. **Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil.** Cement and Concrete Research, volume 37, pages 1357 – 1365, 2007.

TOPÇU, I.B., SENDEL, S. **Properties of concretes produced with waste concrete aggregate.** Cement and Concrete Research, volume 34(8), pages 1307–12, 2004.

UCHIKAWA, H.; HANEHARA, S.; HIRAO, H. **Influence of microstructure on the physical properties of concrete prepared by substituting mineral powder for part of fine aggregate.** Cement and Concrete Research; volume 26, pages 101 – 111, 1996.

WINKLER, A.; MÜELLER, H. A. **Recycling of fine processed building rubble materials.** In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate. London: Thomas Telford Pub., 1998. p. 157-168.

XAVIER, LUCIANA LOPES. **Diagnóstico do Resíduo da Construção Civil na cidade de Florianópolis.** 156p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFSC. Florianópolis, 2001.

ZACARIA, M.; CABRERA, J.G.; **Performance and durability of concrete made with demolition waste and artificial fly ash – clay aggregates.** Waste Management; volume 16, pages 151-158, 1996.

ZORDAN, S. E. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto.** 140p. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Civil, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1997.



**ANEXOS - TABELAS**

Tabela T1- Composição granulométrica BH – AGR FINO

<b>COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA BH - AGR FINO</b>							
<b>Peneira (mm)</b>	<b>Amostra 1</b>			<b>Amostra 2</b>			<b>Média</b>
	<b>Massa Ret. (g)</b>	<b>% Retida</b>	<b>% Ret. acum.</b>	<b>Massa Ret. (g)</b>	<b>% Retida</b>	<b>% Ret. acum.</b>	<b>% Ret. acum.</b>
9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2,4	36,3	7,3	7,3	35,5	7,1	7,1	7,2
1,2	79,8	16,0	23,2	75,8	15,2	22,3	22,7
0,6	110,3	22,1	45,3	104,7	20,9	43,2	44,2
0,3	118,8	23,7	69,0	118,3	23,7	66,9	67,9
0,15	71,3	14,3	83,3	75,2	15,0	81,9	82,6
0,075	37,0	7,4	90,7	41,2	8,2	90,1	90,4
Fundo	46,6	9,3	100,0	49,3	9,9	100,0	100,0
<b>TOTAL</b>	<b>500,0</b>			<b>500,0</b>			

Tabela T2- Composição granulométrica da Areia Natural

<b>COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA - AREIA NATURAL</b>							
<b>Peneiras (mm)</b>	<b>Amostra 1</b>			<b>Amostra 2</b>			<b>Média</b>
	<b>Massa Ret. (g)</b>	<b>% Retida</b>	<b>% Ret. Acum.</b>	<b>Massa Ret. (g)</b>	<b>% Retida</b>	<b>% Ret. Acum.</b>	<b>% Ret. Acum.</b>
9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0
6,3	0,0	0,0	0,0	0,9	0,26	0,3	0,1
4,8	7,2	2,1	2,1	3,4	0,97	1,2	1,6
2,4	40,5	11,5	13,6	37,7	10,76	12,0	12,8
1,2	100,2	28,6	42,2	98,6	28,13	40,1	41,1
0,6	113,1	32,2	74,4	115,2	32,87	73,0	73,7
0,3	57,4	16,4	90,8	61,6	17,57	90,6	90,7
0,15	21,7	6,2	97,0	22,6	6,45	97,0	97,0
Fundo	10,6	3,0	100,0	10,5	3,00	100,0	100,0
<b>TOTAL</b>	<b>350,7</b>			<b>350,5</b>			

Tabela T3 – Composição granulométrica do agregado graúdo natural

<b>COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA – AGREGADO GRAÚDO NATURAL</b>							
<b>Peneiras (mm)</b>	<b>Amostra 1</b>			<b>Amostra 2</b>			<b>Média</b>
	<b>Massa Ret. (g)</b>	<b>% Retida</b>	<b>% Ret. Acum.</b>	<b>Massa Ret. (g)</b>	<b>% Retida</b>	<b>% Ret. Acum.</b>	<b>% Ret. Acum.</b>
12,7	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0
9,5	48,9	2,5	2,5	38,1	1,9	1,9	2,2
6,3	812,9	40,9	43,3	824,2	41,3	43,3	43,3
4,8	665,6	33,5	76,8	645,1	32,4	75,6	76,2
2,4	287,0	14,4	91,2	283,9	14,2	89,9	90,5
1,2	69,6	3,5	94,7	72,6	3,6	93,5	94,1
0,6	26,4	1,3	96,0	33,6	1,7	95,2	95,6
0,3	10,0	0,5	96,5	16,5	0,8	96,0	96,3
0,15	10,5	0,5	97,0	13,5	0,7	96,7	96,9
Fundo	58,8	3,0	100,0	66,1	3,3	100,0	100,0
<b>TOTAL</b>	<b>1989,7</b>			<b>1993,6</b>			

Tabela T4 – Composição granulométrica do agregado graúdo reciclado

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA – AGREGADO GRAÚDO RECICLADO							
	Amostra 1			Amostra 2			Média
Peneiras (mm)	Massa Ret. (g)	% Retida	% Ret. Acum.	Massa Ret. (g)	% Retida	% Ret. Acum.	% Ret. Acum.
12,7	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0
9,5	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0
6,3	675,6	32,1	32,1	544,4	25,8	25,8	28,9
4,8	599,5	28,4	60,5	737,5	35,0	60,8	60,6
2,4	626,4	29,7	90,2	630,9	29,9	90,7	90,5
1,2	64,6	3,1	93,3	68,4	3,2	93,9	93,6
0,6	32,2	1,5	94,8	29,2	1,4	95,3	95,1
0,3	27,9	1,3	96,1	23,1	1,1	96,4	96,3
0,15	24,1	1,1	97,3	20,1	1,0	97,4	97,3
Fundo	57,6	2,7	100,0	55,2	2,6	100,0	100,0
<b>TOTAL</b>	<b>2107,9</b>			<b>2108,8</b>			

Tabela T5 – Resultados da absorção capilar granular de RCD Bruto (4,8/fundo)

Tempo (seg)	h (cm)	$\Delta h$ (cm)	$\Delta h$ acum (cm)	Raiz (t) ( $s^{-1/2}$ )	Vol ( $cm^3$ )	Abs ( $cm^3/cm^2$ )	$\Delta V$ ( $cm^3$ )	$\Delta T$ (seg)	$\Delta V/\Delta T$ ( $cm^3/s$ )
0	22,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
30	18,40	4,50	4,50	5,48	22,09	0,27	22,09	30,00	0,74
60	15,30	3,10	7,60	7,75	37,31	0,46	15,22	30,00	0,51
90	13,00	2,30	9,90	9,49	48,60	0,59	11,29	30,00	0,38
120	10,90	2,10	12,00	10,95	58,90	0,72	10,31	30,00	0,34
150	8,90	2,00	14,00	12,25	68,72	0,84	9,82	30,00	0,33
180	7,20	1,70	15,70	13,42	77,07	0,94	8,34	30,00	0,28
210	5,50	1,70	17,40	14,49	85,41	1,05	8,34	30,00	0,28
210	25,80								
240	24,10	1,70	19,10	15,49	93,76	1,15	8,34	30,00	0,28
270	22,85	1,25	20,35	16,43	99,89	1,22	6,14	30,00	0,20
300	21,65	1,20	21,55	17,32	105,78	1,29	5,89	30,00	0,20
330	20,60	1,05	22,60	18,17	110,94	1,36	5,15	30,00	0,17
360	19,80	0,80	23,40	18,97	114,86	1,41	3,93	30,00	0,13
390	18,85	0,95	24,35	19,75	119,53	1,46	4,66	30,00	0,16
420	18,20	0,65	25,00	20,49	122,72	1,50	3,19	30,00	0,11
450	17,70	0,50	25,50	21,21	125,17	1,53	2,45	30,00	0,08
480	17,35	0,35	25,85	21,91	126,89	1,55	1,72	30,00	0,06
510	17,00	0,35	26,20	22,58	128,61	1,57	1,72	30,00	0,06
540	16,80	0,20	26,40	23,24	129,59	1,59	0,98	30,00	0,03
570	16,65	0,15	26,55	23,87	130,33	1,59	0,74	30,00	0,02
600	16,55	0,10	26,65	24,49	130,82	1,60	0,49	30,00	0,02
630	16,45	0,10	26,75	25,10	131,31	1,61	0,49	30,00	0,02
660	16,40	0,05	26,80	25,69	131,55	1,61	0,25	30,00	0,01
690	16,35	0,05	26,85	26,27	131,80	1,61	0,25	30,00	0,01
720	16,30	0,05	26,90	26,83	132,05	1,62	0,25	30,00	0,01
750	16,25	0,05	26,95	27,39	132,29	1,62	0,25	30,00	0,01

Tabela T6 – Resultados da absorção capilar granular de RCD 600°C (4,8/fundo)

Tempo (seg)	h (cm)	$\Delta h$ (cm)	$\Delta h$ acum (cm)	Raiz (t) ( $s^{-1/2}$ )	Vol ( $cm^3$ )	Abs ( $cm^3/cm^2$ )	$\Delta V$ ( $cm^3$ )	$\Delta T$ (seg)	$\Delta V/\Delta T$ ( $cm^3/s$ )
0	27,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
30	22,20	4,92	4,92	5,48	24,15	0,30	24,15	30,00	0,81
60	18,75	3,45	8,37	7,75	41,09	0,50	16,94	30,00	0,56
90	15,90	2,85	11,22	9,49	55,08	0,67	13,99	30,00	0,47
120	13,40	2,50	13,72	10,95	67,35	0,82	12,27	30,00	0,41
150	11,30	2,10	15,82	12,25	77,66	0,95	10,31	30,00	0,34
180	9,20	2,10	17,92	13,42	87,96	1,08	10,31	30,00	0,34
210	7,25	1,95	19,87	14,49	97,54	1,19	9,57	30,00	0,32
240	5,40	1,85	21,72	15,49	106,62	1,30	9,08	30,00	0,30
270	3,80	1,60	23,32	16,43	114,47	1,40	7,85	30,00	0,26
270	26,20								
300	25,15	1,05	24,37	17,32	119,63	1,46	5,15	30,00	0,17
330	24,50	0,65	25,02	18,17	122,82	1,50	3,19	30,00	0,11
360	24,00	0,50	25,52	18,97	125,27	1,53	2,45	30,00	0,08
390	23,70	0,30	25,82	19,75	126,74	1,55	1,47	30,00	0,05
420	23,60	0,10	25,92	20,49	127,23	1,56	0,49	30,00	0,02
450	23,50	0,10	26,02	21,21	127,73	1,56	0,49	30,00	0,02
480	23,35	0,15	26,17	21,91	128,46	1,57	0,74	30,00	0,02
510	23,30	0,05	26,22	22,58	128,71	1,58	0,25	30,00	0,01
540	23,30	0,00	26,22	23,24	128,71	1,58	0,00	30,00	0,00
570	23,25	0,05	26,27	23,87	128,95	1,58	0,25	30,00	0,01
600	23,25	0,00	26,27	24,49	128,95	1,58	0,00	30,00	0,00
630	23,25	0,00	26,27	25,10	128,95	1,58	0,00	30,00	0,00
660	23,20	0,05	26,32	25,69	129,20	1,58	0,25	30,00	0,01
690	23,15	0,05	26,37	26,27	129,44	1,58	0,25	30,00	0,01
720	23,15	0,00	26,37	26,83	129,44	1,58	0,00	30,00	0,00
750	23,10	0,05	26,42	27,39	129,69	1,59	0,25	30,00	0,01
780	23,10	0,00	26,42	27,93	129,69	1,59	0,00	30,00	0,00
810	23,10	0,00	26,42	28,46	129,69	1,59	0,00	30,00	0,00
840	23,10	0,00	26,42	28,98	129,69	1,59	0,00	30,00	0,00
870	23,10	0,00	26,42	29,50	129,69	1,59	0,00	30,00	0,00
900	23,05	0,05	26,47	30,00	129,93	1,59	0,25	30,00	0,01
930	23,05	0,00	26,47	30,50	129,93	1,59	0,00	30,00	0,00
960	23,05	0,00	26,47	30,98	129,93	1,59	0,00	30,00	0,00
990	23,05	0,00	26,47	31,46	129,93	1,59	0,00	30,00	0,00

Tabela T7 – Resultados da absorção capilar granular de RCD 800°C (4,8/fundo)

Tempo (seg)	h (cm)	$\Delta h$ (cm)	$\Delta h$ acum (cm)	Raiz (t) ( $s^{-1/2}$ )	Vol ( $cm^3$ )	Abs ( $cm^3/cm^2$ )	$\Delta V$ ( $cm^3$ )	$\Delta T$ (seg)	$\Delta V/\Delta T$ ( $cm^3/s$ )
0	27,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
30	22,00	5,00	5,00	5,48	24,54	0,30	24,54	30,00	0,82
60	18,70	3,30	8,30	7,75	40,74	0,50	16,20	30,00	0,54
90	15,30	3,40	11,70	9,49	57,43	0,70	16,69	30,00	0,56
120	12,30	3,00	14,70	10,95	72,16	0,88	14,73	30,00	0,49
150	9,40	2,90	17,60	12,25	86,39	1,06	14,24	30,00	0,47
180	6,70	2,70	20,30	13,42	99,65	1,22	13,25	30,00	0,44
180	25,65								
210	22,30	3,35	23,65	14,49	116,09	1,42	16,44	30,00	0,55
240	20,30	2,00	25,65	15,49	125,91	1,54	9,82	30,00	0,33
270	18,95	1,35	27,00	16,43	132,54	1,62	6,63	30,00	0,22
300	18,20	0,75	27,75	17,32	136,22	1,67	3,68	30,00	0,12
330	18,00	0,20	27,95	18,17	137,20	1,68	0,98	30,00	0,03
360	17,80	0,20	28,15	18,97	138,18	1,69	0,98	30,00	0,03
390	17,75	0,05	28,20	19,75	138,43	1,69	0,25	30,00	0,01
420	17,70	0,05	28,25	20,49	138,67	1,70	0,25	30,00	0,01
450	17,65	0,05	28,30	21,21	138,92	1,70	0,25	30,00	0,01
480	17,60	0,05	28,35	21,91	139,16	1,70	0,25	30,00	0,01
510	17,60	0,00	28,35	22,58	139,16	1,70	0,00	30,00	0,00
540	17,60	0,00	28,35	23,24	139,16	1,70	0,00	30,00	0,00
570	17,60	0,00	28,35	23,87	139,16	1,70	0,00	30,00	0,00
600	17,55	0,05	28,40	24,49	139,41	1,71	0,25	30,00	0,01

Tabela T8 – Resultados da absorção capilar granular de AN (4,8/fundo)

Tempo (seg)	h (cm)	$\Delta h$ (cm)	$\Delta h$ acum (cm)	Raiz (t) ( $s^{-1/2}$ )	Vol ( $cm^3$ )	Abs ( $cm^3/cm^2$ )	$\Delta V$ ( $cm^3$ )	$\Delta T$ (seg)	$\Delta V/\Delta T$ ( $cm^3/s$ )
0	26,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
15	24,50	2,30	2,30	3,87	11,29	0,14	11,29	15,00	0,75
30	22,70	1,80	4,10	5,48	20,13	0,25	8,84	15,00	0,59
45	20,80	1,90	6,00	6,71	29,45	0,36	9,33	15,00	0,62
60	19,50	1,30	7,30	7,75	35,83	0,44	6,38	15,00	0,43
75	17,90	1,60	8,90	8,66	43,69	0,53	7,85	15,00	0,52
90	16,55	1,35	10,25	9,49	50,31	0,62	6,63	15,00	0,44
120	14,40	2,15	12,40	10,95	60,87	0,74	10,55	30,00	0,35
150	12,40	2,00	14,40	12,25	70,69	0,87	9,82	30,00	0,33
180	10,75	1,65	16,05	13,42	78,79	0,96	8,10	30,00	0,27
210	9,10	1,65	17,70	14,49	86,88	1,06	8,10	30,00	0,27
240	7,85	1,25	18,95	15,49	93,02	1,14	6,14	30,00	0,20
270	6,85	1,00	19,95	16,43	97,93	1,20	4,91	30,00	0,16
300	6,20	0,65	20,60	17,32	101,12	1,24	3,19	30,00	0,11
330	5,80	0,40	21,00	18,17	103,08	1,26	1,96	30,00	0,07
360	5,50	0,30	21,30	18,97	104,56	1,28	1,47	30,00	0,05
390	5,35	0,15	21,45	19,75	105,29	1,29	0,74	30,00	0,02
420	5,15	0,20	21,65	20,49	106,27	1,30	0,98	30,00	0,03
450	5,10	0,05	21,70	21,21	106,52	1,30	0,25	30,00	0,01
480	5,00	0,10	21,80	21,91	107,01	1,31	0,49	30,00	0,02
510	5,00	0,00	21,80	22,58	107,01	1,31	0,00	30,00	0,00

Tabela T9 – Resultados da absorção capilar granular de RCD Bruto (4,8/0,075)

Tempo (seg)	h (cm)	$\Delta h$ (cm)	$\Delta h$ acum (cm)	Raiz (t) ( $s^{-1/2}$ )	Vol ( $cm^3$ )	Abs ( $cm^3/cm^2$ )	$\Delta V$ ( $cm^3$ )	$\Delta T$ (seg)	$\Delta V/\Delta T$ ( $cm^3/s$ )
0	26,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
30	21,00	5,90	5,90	5,48	28,96	0,35	28,96	30,00	0,97
60	16,40	4,60	10,50	7,75	51,54	0,63	22,58	30,00	0,75
90	12,50	3,90	14,40	9,49	70,69	0,87	19,14	30,00	0,64
120	9,10	3,40	17,80	10,95	87,38	1,07	16,69	30,00	0,56
150	6,50	2,60	20,40	12,25	100,14	1,23	12,76	30,00	0,43
150	25,50								
180	24,20	1,30	21,70	13,42	106,52	1,30	6,38	30,00	0,21
210	23,35	0,85	22,55	14,49	110,69	1,35	4,17	30,00	0,14
240	22,85	0,50	23,05	15,49	113,15	1,38	2,45	30,00	0,08
270	22,50	0,35	23,40	16,43	114,86	1,41	1,72	30,00	0,06
300	22,35	0,15	23,55	17,32	115,60	1,41	0,74	30,00	0,02
330	22,25	0,10	23,65	18,17	116,09	1,42	0,49	30,00	0,02
360	22,15	0,10	23,75	18,97	116,58	1,43	0,49	30,00	0,02
390	22,10	0,05	23,80	19,75	116,83	1,43	0,25	30,00	0,01
420	22,05	0,05	23,85	20,49	117,07	1,43	0,25	30,00	0,01
450	22,00	0,05	23,90	21,21	117,32	1,44	0,25	30,00	0,01
480	22,00	0,00	23,90	21,91	117,32	1,44	0,00	30,00	0,00
510	21,95	0,05	23,95	22,58	117,56	1,44	0,25	30,00	0,01
540	21,90	0,05	24,00	23,24	117,81	1,44	0,25	30,00	0,01
570	21,90	0,00	24,00	23,87	117,81	1,44	0,00	30,00	0,00
600	21,85	0,05	24,05	24,49	118,06	1,44	0,25	30,00	0,01
630	21,85	0,00	24,05	25,10	118,06	1,44	0,00	30,00	0,00
660	21,85	0,00	24,05	25,69	118,06	1,44	0,00	30,00	0,00
690	21,85	0,00	24,05	26,27	118,06	1,44	0,00	30,00	0,00
720	21,80	0,05	24,10	26,83	118,30	1,45	0,25	30,00	0,01
750	21,80	0,00	24,10	27,39	118,30	1,45	0,00	30,00	0,00
780	21,80	0,00	24,10	27,93	118,30	1,45	0,00	30,00	0,00
810	21,75	0,05	24,15	28,46	118,55	1,45	0,25	30,00	0,01
840	21,75	0,00	24,15	28,98	118,55	1,45	0,00	30,00	0,00
870	21,75	0,00	24,15	29,50	118,55	1,45	0,00	30,00	0,00

Tabela T10 – Resultados da absorção capilar granular de RCD 800°C (4,8/0,075)

Tempo (seg)	h (cm)	$\Delta h$ (cm)	$\Delta h$ acum (cm)	Raiz (t) ( $s^{-1/2}$ )	Vol ( $cm^3$ )	Abs ( $cm^3/cm^2$ )	$\Delta V$ ( $cm^3$ )	$\Delta T$ (seg)	$\Delta V/\Delta T$ ( $cm^3/s$ )
0	27,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
30	20,50	6,60	6,60	5,48	32,40	0,40	32,40	30,00	1,08
60	14,80	5,70	12,30	7,75	60,38	0,74	27,98	30,00	0,93
90	9,70	5,10	17,40	9,49	85,41	1,05	25,03	30,00	0,83
120	5,60	4,10	21,50	10,95	105,54	1,29	20,13	30,00	0,67
120	20,00								
150	17,80	2,20	23,70	12,25	116,34	1,42	10,80	30,00	0,36
180	16,40	1,40	25,10	13,42	123,21	1,51	6,87	30,00	0,23
210	15,85	0,55	25,65	14,49	125,91	1,54	2,70	30,00	0,09
240	15,60	0,25	25,90	15,49	127,14	1,56	1,23	30,00	0,04
270	15,50	0,10	26,00	16,43	127,63	1,56	0,49	30,00	0,02
300	15,40	0,10	26,10	17,32	128,12	1,57	0,49	30,00	0,02
330	15,35	0,05	26,15	18,17	128,36	1,57	0,25	30,00	0,01
360	15,25	0,10	26,25	18,97	128,85	1,58	0,49	30,00	0,02
390	15,25	0,00	26,25	19,75	128,85	1,58	0,00	30,00	0,00
420	15,20	0,05	26,30	20,49	129,10	1,58	0,25	30,00	0,01
450	15,20	0,00	26,30	21,21	129,10	1,58	0,00	30,00	0,00
480	15,20	0,00	26,30	21,91	129,10	1,58	0,00	30,00	0,00

Tabela T11 – Resultados da absorção capilar granular de RCD 600°C (4,8/0,075)

Tempo (seg)	h (cm)	$\Delta h$ (cm)	$\Delta h$ acum (cm)	Raiz (t) ( $s^{-1/2}$ )	Vol ( $cm^3$ )	Abs ( $cm^3/cm^2$ )	$\Delta V$ ( $cm^3$ )	$\Delta T$ (seg)	$\Delta V/\Delta T$ ( $cm^3/s$ )
0	27,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
30	21,10	5,90	5,90	5,48	28,96	0,35	28,96	30,00	0,97
60	16,40	4,70	10,60	7,75	52,03	0,64	23,07	30,00	0,77
90	12,90	3,50	14,10	9,49	69,21	0,85	17,18	30,00	0,57
120	9,75	3,15	17,25	10,95	84,68	1,04	15,46	30,00	0,52
150	6,75	3,00	20,25	12,25	99,40	1,22	14,73	30,00	0,49
180	4,60	2,15	22,40	13,42	109,96	1,35	10,55	30,00	0,35
180	25,50								
210	24,35	1,15	23,55	14,49	115,60	1,41	5,65	30,00	0,19
240	23,60	0,75	24,30	15,49	119,28	1,46	3,68	30,00	0,12
270	23,30	0,30	24,60	16,43	120,75	1,48	1,47	30,00	0,05
300	23,10	0,20	24,80	17,32	121,74	1,49	0,98	30,00	0,03
330	22,95	0,15	24,95	18,17	122,47	1,50	0,74	30,00	0,02
360	22,80	0,15	25,10	18,97	123,21	1,51	0,74	30,00	0,02
390	22,70	0,10	25,20	19,75	123,70	1,51	0,49	30,00	0,02
420	22,60	0,10	25,30	20,49	124,19	1,52	0,49	30,00	0,02
450	22,50	0,10	25,40	21,21	124,68	1,53	0,49	30,00	0,02
480	22,45	0,05	25,45	21,91	124,93	1,53	0,25	30,00	0,01
510	22,45	0,00	25,45	22,58	124,93	1,53	0,00	30,00	0,00
540	22,40	0,05	25,50	23,24	125,17	1,53	0,25	30,00	0,01
570	22,35	0,05	25,55	23,87	125,42	1,53	0,25	30,00	0,01
600	22,35	0,00	25,55	24,49	125,42	1,53	0,00	30,00	0,00

Tabela T12 – Resultados da absorção capilar granular de AN (4,8/0,075)

Tempo (seg)	h (cm)	$\Delta h$ (cm)	$\Delta h$ acum (cm)	Raiz (t) ( $s^{-1/2}$ )	Vol ( $cm^3$ )	Abs ( $cm^3/cm^2$ )	$\Delta V$ ( $cm^3$ )	$\Delta T$ (seg)	$\Delta V/\Delta T$ ( $cm^3/s$ )
0	27,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
15	25,30	1,70	1,70	3,87	8,34	0,10	8,34	15,00	0,56
30	22,90	2,40	4,10	5,48	20,13	0,25	11,78	15,00	0,79
45	20,50	2,40	6,50	6,71	31,91	0,39	11,78	15,00	0,79
60	18,10	2,40	8,90	7,75	43,69	0,53	11,78	15,00	0,79
75	15,70	2,40	11,30	8,66	55,47	0,68	11,78	15,00	0,79
90	13,40	2,30	13,60	9,49	66,76	0,82	11,29	15,00	0,75
120	9,75	3,65	17,25	10,95	84,68	1,04	17,92	30,00	0,60
150	7,30	2,45	19,70	12,25	96,70	1,18	12,03	30,00	0,40
180	5,90	1,40	21,10	13,42	103,57	1,27	6,87	30,00	0,23
210	5,25	0,65	21,75	14,49	106,77	1,31	3,19	30,00	0,11
240	4,90	0,35	22,10	15,49	108,48	1,33	1,72	30,00	0,06
270	4,70	0,20	22,30	16,43	109,46	1,34	0,98	30,00	0,03
300	4,60	0,10	22,40	17,32	109,96	1,35	0,49	30,00	0,02
330	4,50	0,10	22,50	18,17	110,45	1,35	0,49	30,00	0,02
360	4,45	0,05	22,55	18,97	110,69	1,35	0,25	30,00	0,01
390	4,45	0,00	22,55	19,75	110,69	1,35	0,00	30,00	0,00
420	4,45	0,00	22,55	20,49	110,69	1,35	0,00	30,00	0,00
450	4,45	0,00	22,55	21,21	110,69	1,35	0,00	30,00	0,00

Tabela T13 – Resultados da absorção capilar granular de RCD Bruto (4,8/0,15)

Tempo (seg)	h (cm)	$\Delta h$ (cm)	$\Delta h$ acum (cm)	Raiz (t) ( $s^{-1/2}$ )	Vol ( $cm^3$ )	Abs ( $cm^3/cm^2$ )	$\Delta V$ ( $cm^3$ )	$\Delta T$ (seg)	$\Delta V/\Delta T$ ( $cm^3/s$ )
0	26,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
30	21,70	4,80	4,80	5,48	23,56	0,29	23,56	30,00	0,79
60	17,40	4,30	9,10	7,75	44,67	0,55	21,11	30,00	0,70
90	13,50	3,90	13,00	9,49	63,81	0,78	19,14	30,00	0,64
120	10,20	3,30	16,30	10,95	80,01	0,98	16,20	30,00	0,54
150	7,40	2,80	19,10	12,25	93,76	1,15	13,74	30,00	0,46
180	5,10	2,30	21,40	13,42	105,05	1,29	11,29	30,00	0,38
180	26,85								
210	25,40	1,45	22,85	14,49	112,16	1,37	7,12	30,00	0,24
240	24,40	1,00	23,85	15,49	117,07	1,43	4,91	30,00	0,16
270	23,80	0,60	24,45	16,43	120,02	1,47	2,95	30,00	0,10
300	23,50	0,30	24,75	17,32	121,49	1,49	1,47	30,00	0,05
330	23,20	0,30	25,05	18,17	122,96	1,50	1,47	30,00	0,05
360	23,00	0,20	25,25	18,97	123,95	1,52	0,98	30,00	0,03
390	22,85	0,15	25,40	19,75	124,68	1,53	0,74	30,00	0,02
420	22,75	0,10	25,50	20,49	125,17	1,53	0,49	30,00	0,02
450	22,65	0,10	25,60	21,21	125,66	1,54	0,49	30,00	0,02
480	22,60	0,05	25,65	21,91	125,91	1,54	0,25	30,00	0,01
510	22,55	0,05	25,70	22,58	126,15	1,54	0,25	30,00	0,01
540	22,50	0,05	25,75	23,24	126,40	1,55	0,25	30,00	0,01
570	22,50	0,00	25,75	23,87	126,40	1,55	0,00	30,00	0,00
600	22,50	0,00	25,75	24,49	126,40	1,55	0,00	30,00	0,00
630	22,45	0,05	25,80	25,10	126,65	1,55	0,25	30,00	0,01
660	22,45	0,00	25,80	25,69	126,65	1,55	0,00	30,00	0,00
690	22,40	0,05	25,85	26,27	126,89	1,55	0,25	30,00	0,01
720	22,40	0,00	25,85	26,83	126,89	1,55	0,00	30,00	0,00
750	22,40	0,00	25,85	27,39	126,89	1,55	0,00	30,00	0,00
780	22,35	0,05	25,90	27,93	127,14	1,56	0,25	30,00	0,01
810	22,35	0,00	25,90	28,46	127,14	1,56	0,00	30,00	0,00
840	22,35	0,00	25,90	28,98	127,14	1,56	0,00	30,00	0,00
870	22,35	0,00	25,90	29,50	127,14	1,56	0,00	30,00	0,00
900	22,35	0,00	25,90	30,00	127,14	1,56	0,00	30,00	0,00

Tabela T14 – Resultados da absorção capilar granular de AN (4,8/0,15)

Tempo (seg)	h (cm)	$\Delta h$ (cm)	$\Delta h$ acum (cm)	Raiz (t) ( $s^{-1/2}$ )	Vol ( $cm^3$ )	Abs ( $cm^3/cm^2$ )	$\Delta V$ ( $cm^3$ )	$\Delta T$ (seg)	$\Delta V/\Delta T$ ( $cm^3/s$ )
0	26,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
15	25,40	0,70	0,70	3,87	3,44	0,04	3,44	15,00	0,23
30	24,50	0,90	1,60	5,48	7,85	0,10	4,42	15,00	0,29
45	23,45	1,05	2,65	6,71	13,01	0,16	5,15	15,00	0,34
60	22,10	1,35	4,00	7,75	19,63	0,24	6,63	15,00	0,44
75	20,50	1,60	5,60	8,66	27,49	0,34	7,85	15,00	0,52
90	18,90	1,60	7,20	9,49	35,34	0,43	7,85	15,00	0,52
120	15,20	3,70	10,90	10,95	53,51	0,65	18,16	30,00	0,61
150	11,80	3,40	14,30	12,25	70,19	0,86	16,69	30,00	0,56
180	8,90	2,90	17,20	13,42	84,43	1,03	14,24	30,00	0,47
210	7,00	1,90	19,10	14,49	93,76	1,15	9,33	30,00	0,31
240	5,85	1,15	20,25	15,49	99,40	1,22	5,65	30,00	0,19
240	18,00								
270	16,70	1,30	21,55	16,43	105,78	1,29	6,38	30,00	0,21
300	15,80	0,90	22,45	17,32	110,20	1,35	4,42	30,00	0,15
330	15,30	0,50	22,95	18,17	112,66	1,38	2,45	30,00	0,08
360	15,00	0,30	23,25	18,97	114,13	1,40	1,47	30,00	0,05
390	14,70	0,30	23,55	19,75	115,60	1,41	1,47	30,00	0,05
420	14,60	0,10	23,65	20,49	116,09	1,42	0,49	30,00	0,02
450	14,50	0,10	23,75	21,21	116,58	1,43	0,49	30,00	0,02
480	14,40	0,10	23,85	21,91	117,07	1,43	0,49	30,00	0,02
510	14,35	0,05	23,90	22,58	117,32	1,44	0,25	30,00	0,01
540	14,30	0,05	23,95	23,24	117,56	1,44	0,25	30,00	0,01
570	14,30	0,00	23,95	23,87	117,56	1,44	0,00	30,00	0,00

Tabela T15 – Resultados do ensaio de ATD – RCD Bruto

Pozolanicidade BH - AGR FINO BRUTO							
Idade	%	Area (u.A.)	% Ca(OH) <sub>2</sub>	Area Rel.	% Cons. Ca(OH) <sub>2</sub>	Tempo Def. (min)	PF (%)
3 dias	REF	0,2665	50,0	1,0000	0,00	17,666	11,84
	25	0,2574	50,0	0,9657	3,43	15,135	13,57
	50	0,2496	50,0	0,9366	6,34	14,167	14,70
	75	0,2443	50,0	0,9167	8,33	12,666	15,75
	100	0,2242	50,0	0,8413	15,87	12,833	17,85
7 dias	REF	0,2664	50,0	1,0000	0,00	14,167	10,48
	25	0,2525	50,0	0,9478	5,22	12,086	12,62
	50	0,2473	50,0	0,9283	7,17	11,333	11,81
	75	0,2282	50,0	0,8566	14,34	11,000	12,80
	100	0,2260	50,0	0,8483	15,17	10,166	15,41
28 dias	REF	0,2506	50,0	1,0000	0,00	13,00	10,83
	25	0,2431	50,0	0,9702	2,98	11,68	11,52
	50	0,2416	50,0	0,9641	3,59	10,83	10,60
	75	0,2324	50,0	0,9274	7,26	10,67	11,36
	100	0,1980	50,0	0,7901	20,99	10,00	15,00
90 dias	REF	0,2546	50,0	1,0000	0,00	11,33	9,88
	25	0,2279	50,0	0,8951	10,49	10,33	11,67
	50	0,2150	50,0	0,8445	15,55	10,50	9,05
	75	0,1983	50,0	0,7789	22,11	9,83	10,81
	100	0,1821	50,0	0,7152	28,48	9,50	14,75



Tabela T16 – Resultados do ensaio de ATD – RCD 800°C

<b>Pozolanidade BH - AGR FINO_CALCINADO_800°C</b>							
<b>Idade</b>	<b>%</b>	<b>Area (u.A.)</b>	<b>% Ca(OH)<sub>2</sub></b>	<b>Area Rel.</b>	<b>% Cons. Ca(OH)<sub>2</sub></b>	<b>Tempo Def. (min)</b>	<b>PF (%)</b>
<b>3 dias</b>	REF	0,2665	50,0	1,0000	0,00	16,666	11,84
	50	0,2457	50,0	0,9220	7,80	16,833	14,53
	75	0,2453	50,0	0,9205	7,95	14,500	14,52
	100	0,2364	50,0	0,8871	11,29	12,333	15,79
<b>7 dias</b>	REF	0,2664	50,0	1,0000	0,00	13,167	14,48
	50	0,2374	50,0	0,8911	10,89	11,167	13,41
	75	0,2352	50,0	0,8829	11,71	13,000	18,75
	100	0,2271	50,0	0,8525	14,75	11,166	19,76
<b>28 dias</b>	REF	0,2506	50,0	1,0000	0,00	12,00	8,83
	50	0,2344	50,0	0,9354	6,46	11,17	11,33
	75	0,2202	50,0	0,8787	12,13	11,50	14,35
	100	0,2104	50,0	0,8396	16,04	10,50	14,97
<b>90 dias</b>	REF	0,2546	50,0	1,0000	0,00	10,33	10,88
	50	0,2032	50,0	0,7981	20,19	9,50	10,63
	75	0,1968	50,0	0,7730	22,70	9,00	13,00
	100	0,1870	50,0	0,7345	26,55	8,67	11,00

Tabela T17 – Resultados do ensaio de ATD – RCD 600°C

<b>Pozolanidade BH - AGR FINO_CALCINADO_600°C</b>							
<b>Idade</b>	<b>%</b>	<b>Area (u.A.)</b>	<b>% Ca(OH)<sub>2</sub></b>	<b>Area Rel.</b>	<b>% Cons. Ca(OH)<sub>2</sub></b>	<b>Tempo Def. (min)</b>	<b>PF (%)</b>
<b>3 dias</b>	REF	0,2550	50,0	1,0000	0,00	16,000	12,45
	50	0,2536	50,0	0,9945	0,55	13,333	15,51
	75	0,2516	50,0	0,9867	1,33	13,333	16,37
	100	0,2497	50,0	0,9792	2,08	12,833	17,40
<b>7 dias</b>	REF	0,2417	50,0	1,0000	0,00	12,500	10,45
	50	0,2251	50,0	0,9313	6,87	10,334	15,90
	75	0,2137	50,0	0,8842	11,58	10,000	14,18
	100	0,2082	50,0	0,8614	13,86	10,667	15,32
<b>28 dias</b>	REF	0,2402	50,0	1,0000	0,00	11,667	12,80
	50	0,2203	50,0	0,9172	8,28	10,334	14,18
	75	0,2074	50,0	0,8634	13,66	9,333	15,90
	100	0,1954	50,0	0,8135	18,65	8,500	15,28
<b>90 dias</b>	REF	0,2476	50,0	1,0000	0,00	10,958	11,95
	50	0,1942	50,0	0,7843	21,57	9,864	14,10
	75	0,1878	50,0	0,7585	24,15	8,768	15,30
	100	0,1751	50,0	0,7072	29,28	8,214	15,54

Tabela T18 – Resistência à compressão das pastas – RCD Bruto

<b>%</b>	<b>Resistência à Compressão (MPa)</b>			
	<b>3 dias</b>	<b>7 dias</b>	<b>28 dias</b>	<b>90 dias</b>
<b>REF</b>	0,29	0,29	0,30	0,42
<b>25</b>	0,32	0,35	0,48	0,57
<b>50</b>	0,37	0,28	0,64	0,72
<b>75</b>	0,37	0,48	0,89	1,58
<b>100</b>	0,38	0,55	1,84	2,07

Tabela T19 – Resistência à compressão das pastas – RCD 800°C

<b>%</b>	<b>Resistência à Compressão (MPa)</b>			
	<b>3 dias</b>	<b>7 dias</b>	<b>28 dias</b>	<b>90 dias</b>
<b>REF</b>	0,29	0,16	0,33	0,42
<b>50</b>	0,41	0,34	0,93	1,71
<b>75</b>	0,70	0,56	1,66	2,58
<b>100</b>	0,54	1,13	2,74	4,73

Tabela T20 – Resistência à compressão das pastas – RCD 600°C

%	Resistência à Compressão (MPa)			
	3 dias	7 dias	28 dias	90 dias
<b>REF</b>	0,29	0,42	0,26	0,37
<b>50</b>	0,38	0,95	2,43	3,58
<b>75</b>	0,71	1,40	3,60	5,17
<b>100</b>	0,60	1,80	5,08	6,95

Tabela T21 – Resistência relativa à compressão das pastas – RCD Bruto

%	Resistência relativa à Compressão			
	3 dias	7 dias	28 dias	90 dias
<b>REF</b>	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>25</b>	1,10	1,21	1,61	1,36
<b>50</b>	1,26	0,96	2,16	1,71
<b>75</b>	1,26	1,67	2,98	3,78
<b>100</b>	1,31	1,89	6,20	4,96

Tabela T22 – Resistência relativa à compressão das pastas – 800°C

%	Resistência relativa à Compressão			
	3 dias	7 dias	28 dias	90 dias
<b>REF</b>	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>50</b>	1,42	2,13	2,77	4,10
<b>75</b>	2,42	3,55	4,95	6,16
<b>100</b>	1,85	7,12	8,19	11,31

Tabela T23 – Resistência relativa à compressão das pastas – 600°C

%	Resistência relativa à Compressão			
	3 dias	7 dias	28 dias	90 dias
<b>REF</b>	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>50</b>	1,30	2,25	9,35	9,62
<b>75</b>	2,41	3,33	13,86	13,88
<b>100</b>	2,03	4,28	19,55	18,68

Tabela T24 – Evolução da consistência das argamassas

Golpes	0			5			15			30		
	D1 (mm)	D2 (mm)	Média (mm)	D1 (mm)	D2 (mm)	Média (mm)	D1 (mm)	D2 (mm)	Média (mm)	D1 (mm)	D2 (mm)	Média (mm)
<b>REF M1</b>	129,0	128,5	128,8	192,0	192,1	192,1	266,2	265,0	265,6	309,1	310,5	309,8
<b>25% M1</b>	128,0	128,4	128,2	169,2	170,6	169,9	231,4	233,3	232,4	248,4	259,4	253,9
<b>50% M1</b>	127,4	127,2	127,3	157,6	158,5	158,1	210,9	207,5	209,2	232,3	236,8	234,6
<b>75% M1</b>	126,5	126,3	126,4	142,0	142,5	142,3	187,6	189,5	188,6	218,4	216,7	217,6
<b>100% M1</b>	125,1	125,0	125,1	137,1	134,8	136,0	165,7	171,5	168,6	204,7	209,0	206,9
<b>REF M2</b>	129,5	130,4	130,0	207,8	209,4	208,6	275,0	275,6	275,3	328,0	330,4	329,2
<b>25% M2</b>	128,2	126,7	127,5	200,4	201,2	200,8	272,9	274,7	273,8	326,5	322,7	324,6
<b>50% M2</b>	126,5	125,5	126,0	175,1	178,6	176,9	260,6	260,2	260,4	307,1	307,5	307,3
<b>75% M2</b>	125,3	125,8	125,6	162,6	167,3	165,0	235,9	225,2	230,6	261,5	276,1	268,8
<b>100% M2</b>	123,0	121,6	122,3	142,3	146,9	144,6	213,0	217,2	215,1	232,0	237,8	234,9
<b>REF M3</b>	129,0	128,5	128,8	192,0	192,1	192,1	266,2	265,0	265,6	309,1	310,5	309,8
<b>25% M3</b>	127,2	127,1	127,2	160,8	167,0	163,9	222,1	229,4	225,8	245,4	252,2	248,8
<b>50% M3</b>	126,6	126,3	126,5	145,1	148,0	146,6	204,5	201,7	203,1	228,5	224,8	226,7
<b>75% M3</b>	122,3	123,5	122,9	134,2	130,8	132,5	182,4	181,8	182,1	202,0	207,5	204,8
<b>100% M3</b>	119,2	118,1	118,7	128,0	128,5	128,3	147,3	152,1	149,7	180,0	186,1	183,1

D: diâmetro de espalhamento (mm)

Tabela T25 – Resultados da resistência à tração na flexão das argamassas

Misturas	28 Dias		90 Dias	
	Resist. à Flexão (MPa)	Resist. Rel.*	Resist. à Flexão (MPa)	Resist. Rel.*
REF M1	6,43	1,00	7,14	1,00
25% M1	6,12	0,95	7,06	0,81
50% M1	7,14	1,11	7,56	1,06
75% M1	6,36	0,99	6,95	0,97
100% M1	8,01	1,25	8,35	1,17
REF M2	5,35	1,00	6,56	1,00
25% M2	5,79	1,08	6,62	1,01
50% M2	6,48	1,21	7,32	1,12
75% M2	6,91	1,29	7,13	1,04
100% M2	6,62	1,24	7,31	1,11
REF M3	6,43	1,00	7,14	1,00
25% M3	7,14	1,11	7,78	1,09
50% M3	7,03	1,09	7,43	1,04
75% M3	7,45	1,16	7,75	1,09
100% M3	6,12	0,95	7,77	1,09

\* Resistência relativa em relação à amostra de referência

Tabela T26 – Resultados da resistência à compressão das argamassas

Misturas	28 Dias		90 Dias	
	Resist. à Compressão (MPa)	Resist. Rel.*	Resist. à Compressão (MPa)	Resist. Rel.*
REF M1	27,56	1,00	33,96	1,00
25% M1	23,78	0,86	32,29	0,95
50% M1	22,13	0,80	33,82	1,00
75% M1	22,63	0,82	30,27	0,89
100% M1	22,73	0,82	29,64	0,87
REF M2	21,18	1,00	27,42	1,00
25% M2	19,82	0,94	26,63	0,97
50% M2	20,36	0,96	27,69	1,01
75% M2	19,58	0,92	26,90	0,98
100% M2	19,04	0,90	25,17	0,92
REF M3	27,56	1,00	33,96	1,00
25% M3	24,49	0,89	32,51	0,96
50% M3	24,79	0,90	30,75	0,91
75% M3	23,45	0,85	29,41	0,87
100% M3	23,10	0,84	28,26	0,83

\* Resistência relativa em relação à amostra de referência

Tabela T27 – Resultados do ensaio de Slump Test para os concretos

Slump Test			
Mistura	Valor (mm)	Mistura	Valor (mm)
REF M1	65	REF M4	85
25% M1	48	25% M4	65
50% M1	15	50% M4	38
75% M1	3	75% M4	25
100% M1	0	100% M4	13
REF M2	75	REF M5	70
25% M2	53	25% M5	45
50% M2	32	50% M5	15
75% M2	26	75% M5	10
100% M2	14	100% M5	0
REF M3	65		
25% M3	35		
50% M3	8		
75% M3	0		
100% M3	0		

Tabela T28 – Massa específica dos concretos no estado fresco

Mistura	Massa (kg)	M.E. (kg/dm <sup>3</sup> )	M.E. (kg/m <sup>3</sup> )	Mistura	Massa (kg)	M.E. (kg/dm <sup>3</sup> )	M.E. (kg/m <sup>3</sup> )
REF M1	17,97	2,20	2204	REF M4	18,06	2,23	2231
25% M1	17,88	2,18	2178	25% M4	17,88	2,18	2178
50% M1	17,70	2,12	2124	50% M4	17,60	2,09	2095
75% M1	17,58	2,09	2089	75% M4	17,26	1,99	1994
100% M1	17,32	2,01	2012	100% M4	17,14	1,96	1959
REF M2	18,00	2,21	2213	REF M5	17,94	2,20	2195
25% M2	17,88	2,18	2178	25% M5	17,92	2,19	2189
50% M2	17,69	2,12	2121	50% M5	17,74	2,14	2136
75% M2	17,48	2,06	2059	75% M5	17,48	2,06	2059
100% M2	17,26	1,99	1994	100% M5	17,19	1,97	1973
REF M3	17,97	2,20	2204				
25% M3	17,98	2,21	2207				
50% M3	17,92	2,19	2189				
75% M3	17,72	2,13	2130				
100% M3	17,48	2,06	2059				

Tabela T29 – Tempo do pico de calor dos concretos

Tempo do pico de calor (t <sub>pico</sub> ) (h)					
Misturas/Teor	0%	25%	50%	75%	100%
M1	16,1	13	11	10,2	11,3
M3		10,8	10,3	10,1	8,3

Tabela T30 – Variação na temperatura máxima dos concretos

Variação de Temperatura máxima (ΔT) (°C)					
Misturas/Teor	0%	25%	50%	75%	100%
M1	8,8	10,3	11,21	9,6	10,67
M3		9,16	11,56	10,83	11,08

Tabela T31 – Calor máximo gerado dos concretos

Calor gerado (Q) (J/kg)					
Misturas/Teor	0%	25%	50%	75%	100%
M1	59,39	64,67	75,72	72,38	72,8
M3		61,54	78,12	73,5	75,6

Tabela T32 – Taxa de calor máxima dos concretos

Taxa de Calor gerado (ΔQ) (J/kg/h)					
Misturas/Teor	0%	25%	50%	75%	100%
M1	16,87	11,78	16,58	18,89	13,79
M3		9,15	14,09	15,88	22,1

Tabela T33 – Calor máximo acumulado em 20 horas dos concretos

Calor acumulado em 20 horas (Q <sub>max</sub> ) (kJ/kg)					
Misturas/Teor	0%	25%	50%	75%	100%
M1	137,6	139	176,8	171,5	178
M3		136,2	182,1	174,1	179,4

**ANEXO - FIGURAS**

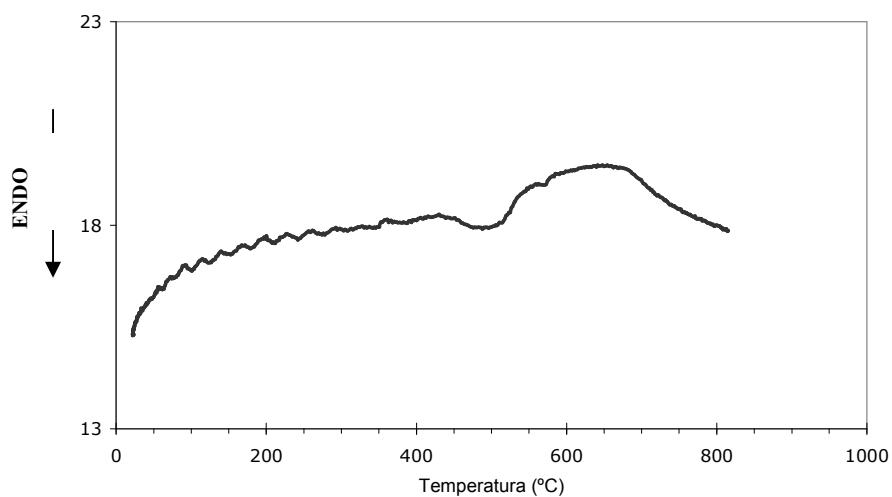


Figura F1 – Resultados ATD material calcinado 800°C

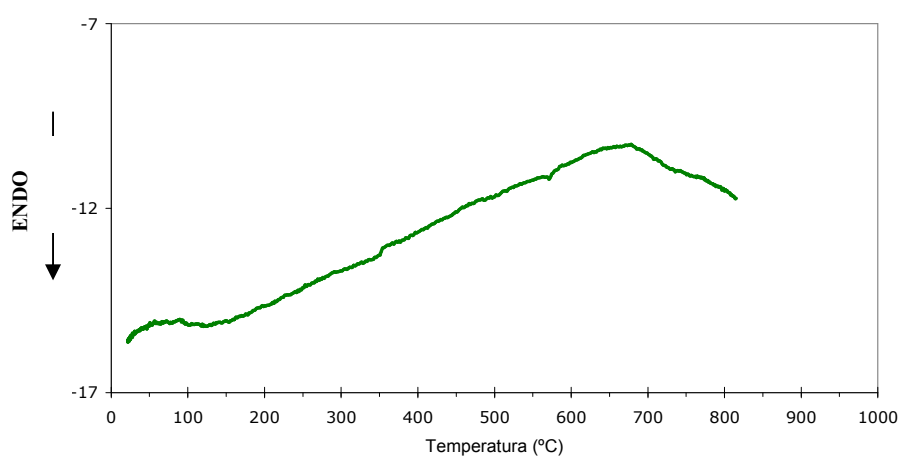


Figura F2 – Resultados ATD material calcinado 600°C

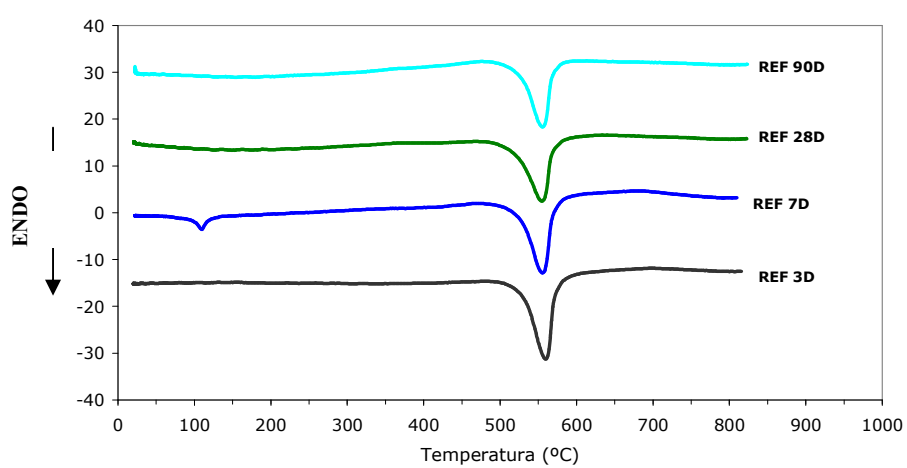


Figura F3 – Resultados ATD das pastas – REF

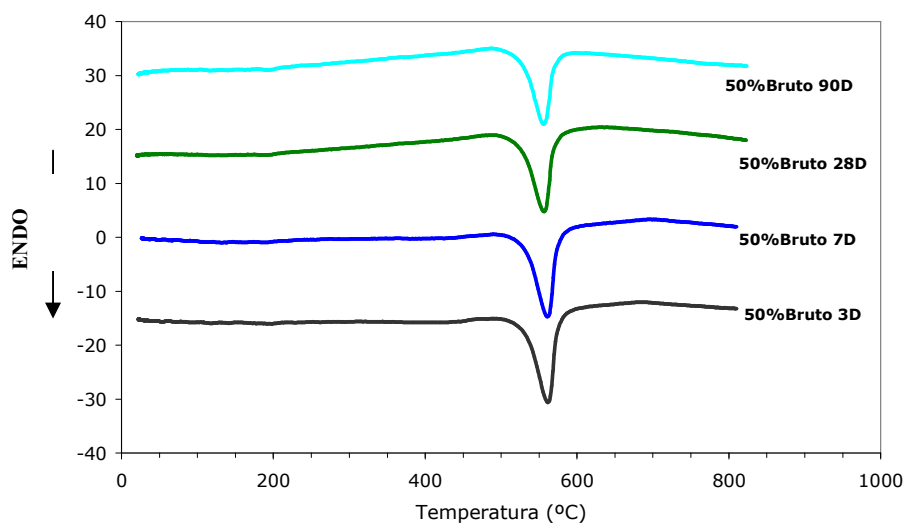


Figura F4 – Resultados ATD – 50% Bruto

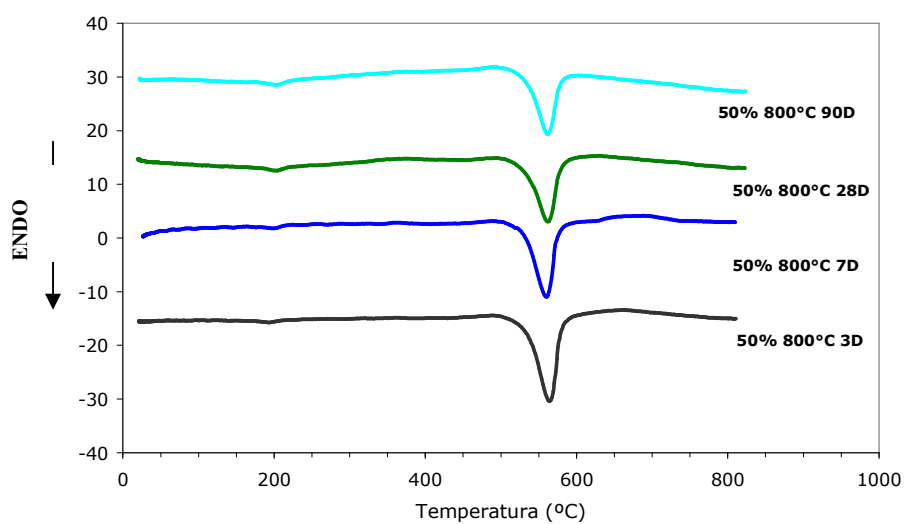


Figura F5 – Resultados ATD – 50% 800°C

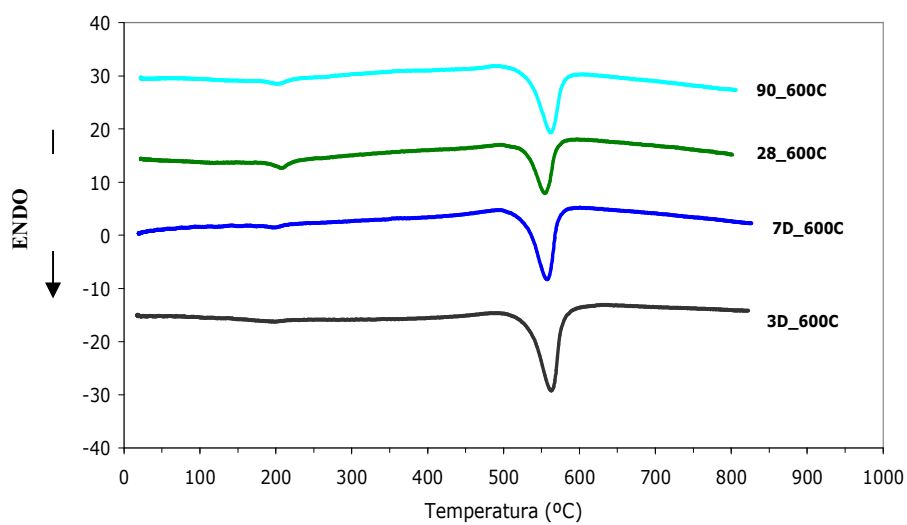


Figura F6 – Resultados ATD – 50% 600°C

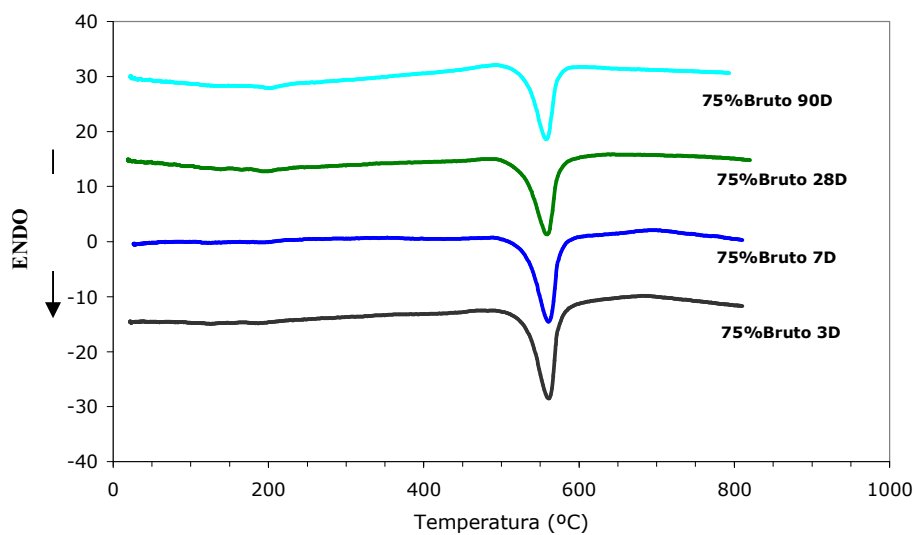


Figura F7 – Resultados ATD – 75% Bruto

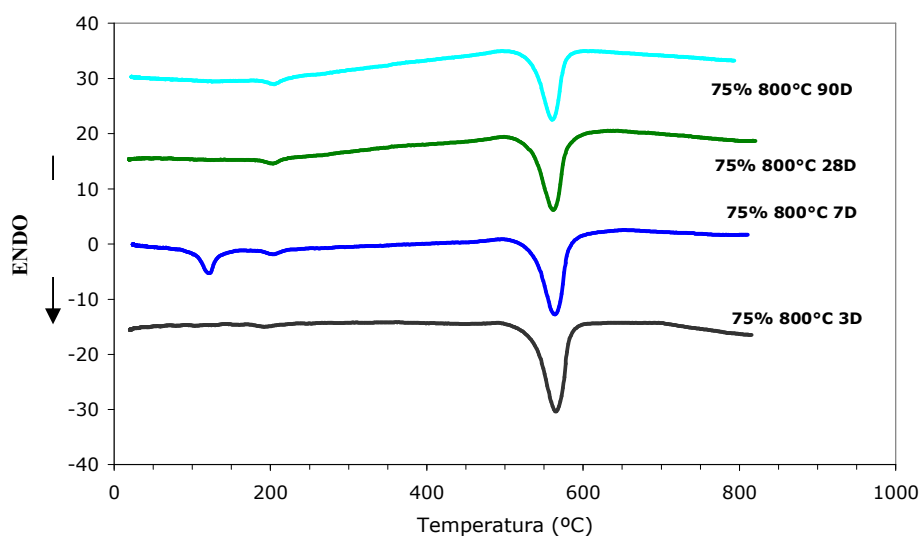


Figura F8 – Resultados ATD – 75% 800°C

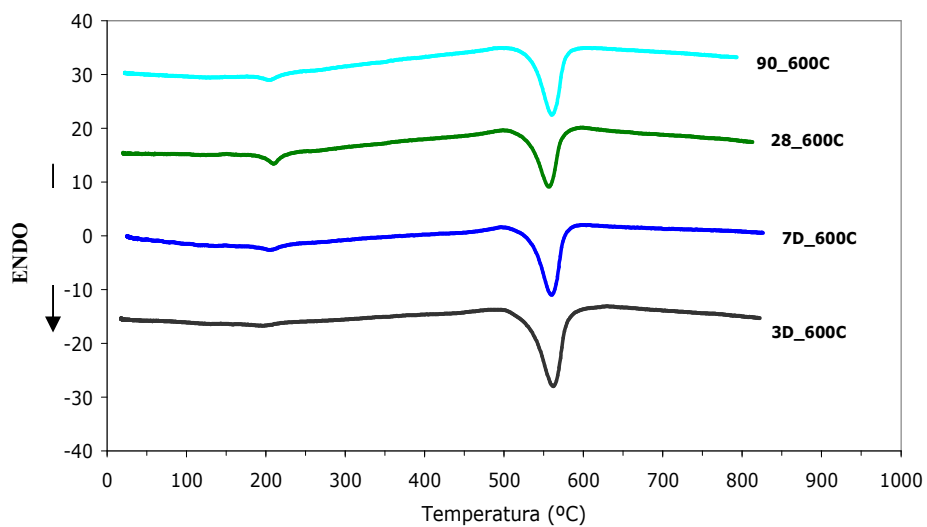


Figura F9 – Resultados ATD – 75% 600°C



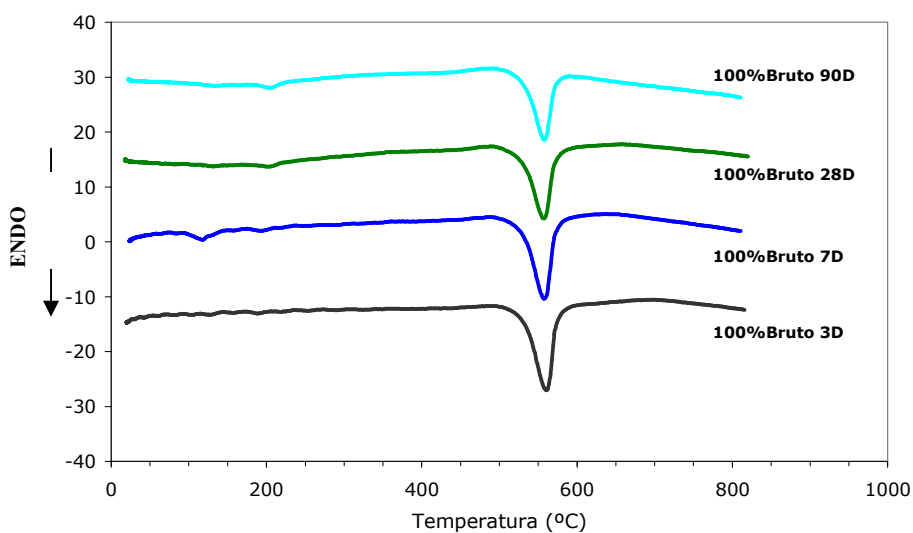


Figura F10 – Resultados ATD – 100% Bruto

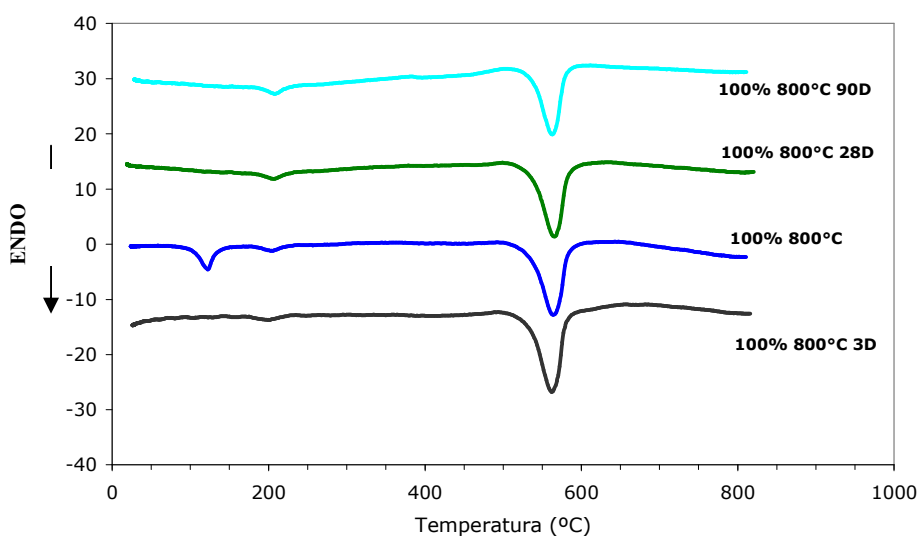


Figura F11 – Resultados ATD – 100% 800°C

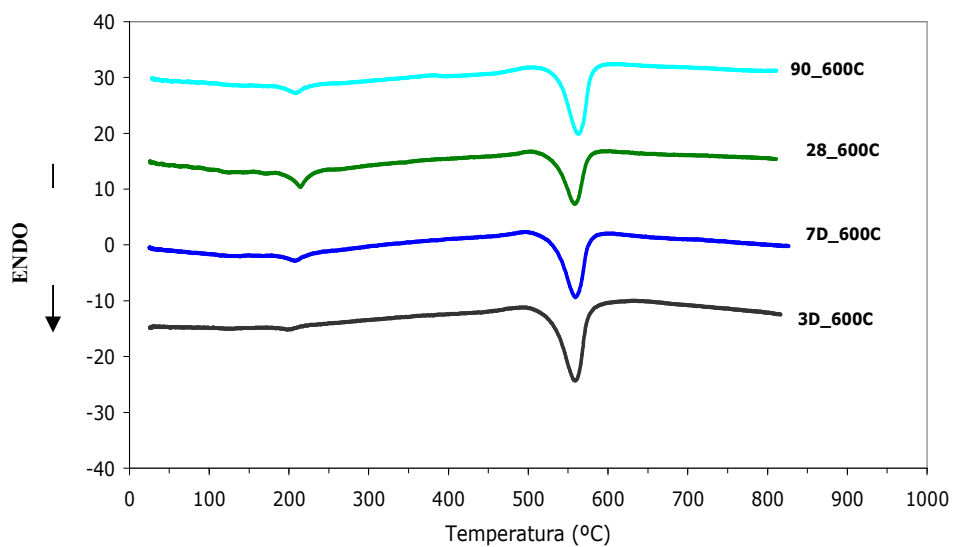


Figura F12 – Resultados ATD – 100% 600°C

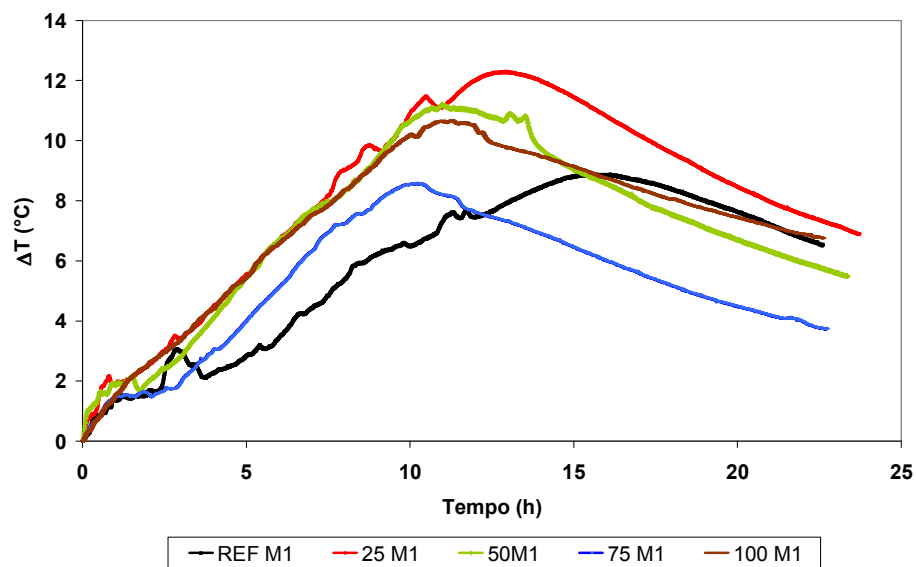


Figura F13 – Evolução da  $\Delta T$  dos concretos – M1

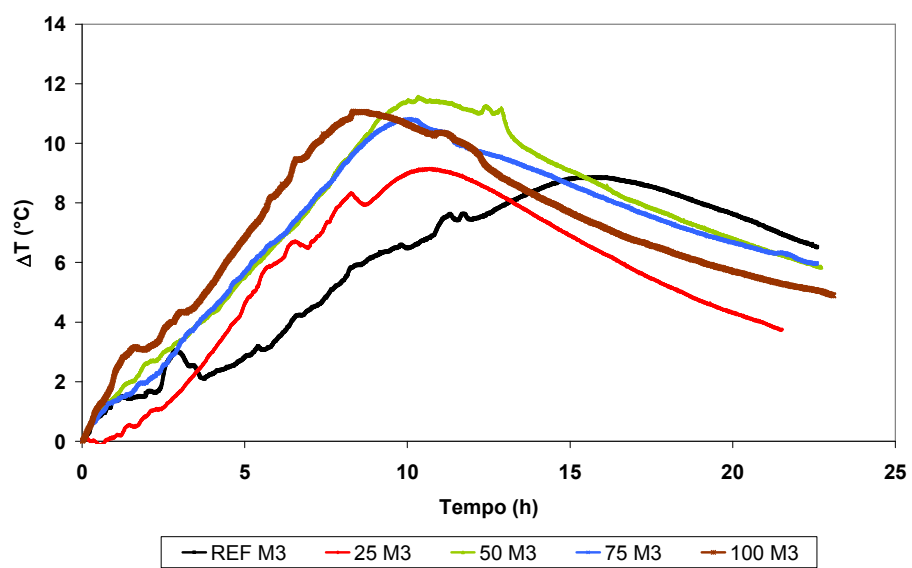


Figura F14 – Evolução da  $\Delta T$  dos concretos – M3