

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

**INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE AGREGA-
DOS RECICLADOS SOBRE A RETRAÇÃO POR SECAGEM EM
CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL**

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.

**Florianópolis / SC
Dezembro/2009**

INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE AGREGADOS RECICLADOS SOBRE A RETRAÇÃO POR SECAGEM EM CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL

GUSTAVO RODOLFO PERIUS

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^a. Dr^a. Ing. Janaíde Cavalcante Rocha – ECV/UFSC
(Coordenadora do PPGEC e orientadora)

Prof. Dr. Ing. Malik Cheriaf – ECV/UFSC
(Coorientador)

Comissão examinadora:

Prof. Dr. Cláudio de Souza Kazmierczak - UNISINOS

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

Prof. Dr. Narbal Ataliba Marcellino – ECV/UFSC

“O que eu espero dos senhores, é que depois de uma longa discussão, todos saiam daqui concordando comigo.”

Winston Churchill

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a minha mãe, dona Leda, a qual sempre me serviu como exemplo de caráter, dedicação e seriedade, me incentivando e sendo muitas vezes meu norte nos mais difíceis momentos.

A meu pai, Celso, que infelizmente nos deixou ao final desta jornada.

À minha noiva, Ana Paula, pelo seu amor, carinho, incentivo e compreensão pelos momentos de ausência.

À minha orientadora, professora Janaíde Cavalcante Rocha, pela oportunidade e confiança depositada em meu trabalho, e ao professor Malik Cheriaf, pela co-orientação e importante ajuda no desenvolvimento do equipamento de retração.

Aos colegas do grupo Valores: Cecília, Caroline, Daiane, Eliz, Giovanna, Jefferson, João, Leonardo, Lígia, Luíza e Rubén, pelo apoio e convivência.

Aos técnicos do laboratório de materiais de construção civil – LMCC: Luiz Henrique e Renato Lapa.

Ao funcionário do LMCC, Roque Medeiros, pela ajuda e pelos momentos de descontração que aliviavam as longas horas passadas no laboratório.

Aos meus grandes amigos, Celião, Jumes, Volney e Weskley, eu agradeço pela sincera amizade, pelas risadas, pelas festas e pelas discussões filosóficas de final de noite sem objetivo algum.

Aos amigos do PPGEC, Rafael e Vinicius pela amizade, e pelos momentos de estudos e descontração.

Aos professores, Luiz Roberto Prudêncio Júnior e Narbal Ataliba Marcellino pela disponibilidade em sanar dúvidas pertinentes à pesquisa.

Às empresas: Urbem Tecnologia Ambiental, Itambé Cimentos, Protensul Pré-moldados, BASF Chemical Construction, Rheoset Aditivos e Prefabricar Construções, pela contribuição na doação das matérias-primas utilizadas neste trabalho.

Ao CNPq pela bolsa de mestrado e ao FINEP pelo apoio financeiro.

E a todos que passaram em minha vida durante esse período, e que contribuíram não só neste trabalho, mas em minha formação como pessoa.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE TABELAS.....	11
RESUMO.....	12
1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	15
2.1 Objetivos gerais	15
2.2 Objetivos específicos.....	15
3. JUSTIFICATIVA	16
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
4.1 Resíduo de construção e demolição (RCD)	17
4.2 Concreto auto-adensável	22
4.2.1 Propriedades do concreto auto-adensável	23
4.2.2 Vantagens e desvantagens do concreto auto-adensável.....	25
4.3 Materiais para concreto auto-adensável.....	26
4.3.1 Cimento	26
4.3.2 Agregados	27
4.3.3 Adições	28
4.3.4 Aditivos	32
4.3.4.1 Agentes modificadores de viscosidade	34
5.4 Propriedades do concreto no estado fresco	36
5.4.1 Trabalhabilidade	36
5.4.2 Exsudação	37
5.4.3 Segregação	37
5.5 Propriedades no estado endurecido.....	38
5.5.2 Resistência à compressão	38
5.5.4 Retração por secagem	39
5.7 Absorção capilar	43
6. CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO	45
7. MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
7.1 Materiais	51
7.1.1 Aglomerante	51
7.1.2 Agregados.....	52
7.1.3 Agregado Reciclado de RCD	53
7.1.4 Aditivos químicos	55
7.1.5 Adições minerais	56
7.1.6 Agente promotor de viscosidade	56
7.2 Métodos	56
8. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	61
9. ENSAIOS EM MATERIAL GRANULAR	62

9.1 Ensaio de demanda de água em material granular	62
9.3 Absorção de água (condição saturada, superfície seca) ...	63
10. ENSAIO EM PASTA	64
10.1 Ensaio de teor de saturação de aditivo (Cone de Marsh).....	64
10.2 Ensaio de calorimetria	65
11. ENSAIOS EM ARGAMASSA	67
11.1 Ensaio de espalhamento (<i>flow table</i>)	67
12. ENSAIOS EM CONCRETO	68
12.1 Ensaio de espalhamento (<i>Slump Flow</i>)	68
12.3 Ensaio de segregação (ROLS <i>et al.</i> , 1999)	69
12.4 Ensaio de absorção capilar (NBR 9779/95)	69
12.5 Ensaio de resistência à compressão	71
12.7 Ensaio de retração por secagem (PÉRA e AMBRÓISE, 2004)	71
13. RESULTADOS E ANÁLISES	74
13.1 Resultados da Caracterização física dos materiais	74
13.2 Resultados da caracterização química dos materiais	79
13.3 Resultados do ensaio em material granular	81
13.3 Resultados dos ensaios em pasta	84
13.3.1 Ensaio de saturação de aditivo e perda de fluidez	84
13.3.2 Ensaio de calorimetria semi-adiabática	87
13.4 Resultados dos ensaios em argamassa	90
13.4.1 Mini-slump flow	90
13.4.2 Ensaio de resistência à compressão	92
13.5 Resultados dos ensaios em concreto	93
13.5.1 Ensaios no estado fresco	93
13.5.2 Ensaio de resistência à compressão	96
13.5.3 Ensaio de absorção capilar	98
13.5.4 Ensaio de retração por secagem	103
14. CONSIDERAÇÕES FINAIS	111
14.1 Sugestões para trabalhos futuros	117
15. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	118

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
 a/c – Relação água/cimento
 AGR – Agregado reciclado
 AGRg – Agregado reciclado graúdo
 AGRm – Agregado reciclado miúdo
 AMV – Agente modificador de viscosidade
 CAA – Concreto auto-adensável
 CAN – Concreto auto-nivelante
 CP I – Cimento Portland Comum
 CP II F – Cimento Portland composto com filer calcário
 CSA – Cimento Aluminoso
 EFNARC – *The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems*
 EPS – Poli-estireno expandido
fck – Resistência característica à compressão
fc_m – Resistência média característica
 INSA - *Institut National des Sciences Appliquées*
 M – massa molecular da água (g/mol);
 NPC – Núcleo de pesquisa em construção
 R – constante universal dos gases (J/(mol.K));
 R_c – raio crítico (m);
 RCD – Resíduo de construção e demolição
 S – Desvio-padrão
 T – temperatura (°C);
 UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
 UR – Umidade relativa do ar (%)
 ValoRes – Laboratório de Valorização e Reciclagem de Resíduos Industriais na Construção Civil
 σ – tensão superficial da água (N/m);
 α – ângulo de contato entre a água e a superfície do poro (rad);
 ρ_1 – densidade da água (kg/m³);

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	43
Equação 2	59
Equação 3	59
Equação 4	63
Equação 5	63
Equação 6	63
Equação 7	63
Equação 8	63
Equação 14	65
Equação 15	66
Equação 16	66
Equação 17	66
Equação 18	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Percentual de material inerte e não-inerte no RCD (adaptado de POON <i>et al.</i> , 2001).....	19
Figura 2 – Mecanismo de resistência ao bloqueio (Adaptado de OKAMURA; OUCHI, 2003).....	25
Figura 3 – MEV de amostra de filer calcário (ARTELT e GARCIA, 2008).....	30
Figura 4 – distribuição do tamanho das partículas de cimento e fillers (Poppe e Schutter, 2005).....	31
Figura 5 – Monômero de um policarboxilato	34
Figura 6 – Exemplo de cadeia de metilcelulose.....	36
Figura 7 – Empenamento (<i>curling</i>) de placa (PÉRA e AMBRÓISE, 2004).....	43
Figura 8 – composição da retenção de água de agregados porosos (adaptado de Kasemchaisiri e Tangtermsirikul, 2007)	44
Figura 9 – Gráfico da taxa de liberação de calor/tempo	47
Figura 10 – Fluxograma de atividades da metodologia proposta.....	49
Figura 11 – Fluxograma de produção, coleta e preparação do AGR	53
Figura 12 – <i>layout</i> da produção na usina de reciclagem	55
Figura 13 – Ensaio de espalhamento (slump flow): (a) concreto; (b) argamassa (NUNES, 2001, <i>apud</i> MELO, 2005).....	68
Figura 14 – equipamento utilizado para mensurar a segregação (Adaptado de ROLS <i>et al.</i> , 1999)	69
Figura 15 – Equipamento de ensaio de absorção por capilaridade em concretos – vista superior (ANDRADE, 2004)	70
Figura 16 - Equipamento de ensaio de absorção por capilaridade em concretos – vista lateral (ANDRADE, 2004).....	71
Figura 17 – Corte esquemático do equipamento para medir a retração das placas de concreto.....	72
Figura 18 – Equipamento para ensaio de retração por secagem	73
Figura 19 – Curva granulométrica dos agregados miúdos (natural e reciclado)	75
Figura 20 – Curva granulométrica dos agregados graúdos (natural e reciclado)	76
Figura 21 – Imagens microscópio óptico (50x): (a) AGR; (b) Areia natural	76
Figura 22 – Composição granulométrica dos fillers (granulometria à <i>laser</i>).....	77
Figura 23 – Imagens microscópio óptico (50x): (a) filer de AGR; (b) filer calcário	78
Figura 24 – Demanda de água nos agregados miúdos	82

Figura 25 – Demanda de água dos fílers	83
Figura 26 – Esquema da possível interação entre os finos de calcário e de AGR	84
Figura 27 – Resultados do ensaio de saturação de aditivo e perda de eficiência	85
Figura 28 – Gráfico de perda de trabalhabilidade (CP IIF + SP)	86
Figura 29 - Gráfico de perda de trabalhabilidade (CP IIF + FC + SP)..	86
Figura 30 - Gráfico de perda de trabalhabilidade (CP IIF + FAGR + SP)	87
Figura 31 – Evolução da temperatura para as amostras de pasta de cimento.....	88
Figura 32 – Percentual de teor de aditivo com relação à incorporação de AGR	90
Figura 33 – Massa específica das argamassas com relação à incorporação de AGR.....	92
Figura 34 – Resultados de resistência à compressão em argamassa	92
Figura 35 – Teores de aditivos para concreto auto-adensável com incorporação de AGR.....	94
Figura 36 – Resultados do ensaio de segregação em concreto.....	95
Figura 37 – Resultados de massa específica dos concretos.....	96
Figura 38 – Resistência à compressão dos concretos.....	97
Figura 39 – Resultados do ensaio de absorção capilar em concretos....	98
Figura 40 – Absorção capilar das amostras com fíler calcário durante a primeira hora	99
Figura 41 – absorção capilar das amostras com fíler de AGR, durante a primeira hora	100
Figura 42 – Sorptividade das amostras de concreto com fíler calcário	101
Figura 43 – Sorptividade das amostras de concreto com fíler de AGR	102
Figura 44 – Relação entre a sorptividade e a resistência à compressão	103
Figura 45 – Perda de massa das amostras com fíler calcário	104
Figura 46 – Perda de massa das amostras com fíler de AGR.....	105
Figura 47 – Taxa de exsudação das amostras com fíler calcário.....	105
Figura 48 – Taxa de exsudação das amostras com fíler de AGR	106
Figura 49 – Retração por secagem: amostras com fíler calcário.....	107
Figura 50 – Retração por secagem: amostras com fíler de AGR	107
Figura 51 – Empenamento médio das amostras contendo fíler calcário	108
Figura 52 – Empenamento médio das amostras contendo fíler de AGR	109

Figura 54 – Correlação: perda de massa x retração (amostras com fíler calcário) 110

Figura 55 – Correlação: perda de massa x retração (amostras com fíler de AGR)..... 110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição dos resíduos de construção e demolição (adaptado de Poon <i>et al</i> , 2001).....	20
Tabela 2 – Propriedades dos agregados basálticos e dos agregados de concreto reciclado (Adaptado de Crentsil <i>et al.</i> , 2001).....	21
Tabela 3 – Composição química do clínquer e fillers (Mnahoncakova <i>et</i> <i>al.</i> , 2008).....	32
Tabela 4 – Descrição das etapas, objetivos e ensaios.....	50
Tabela 5 – Propriedades físicas do CP II F – 32	51
Tabela 6 – Propriedades químicas do CP II F – 32	52
Tabela 7 – Propriedades dos aditivos superplastificantes	55
Tabela 8 – teores de substituição de materiais nos concretos e argamassas	59
Tabela 9 – Critérios de conformidade (adaptado de EFNARC, 2005)..	60
Tabela 10 – Quantidade de materiais utilizados por m ³ e os limites recomendados.....	60
Tabela 11 – Ensaios de caracterização das matérias-primas	61
Tabela 12 – Composições e percentuais para ensaio de demanda de água	62
Tabela 13 – Calores específicos considerados para o ensaio de calorimetria	67
Tabela 14 – Tolerância de tempo para ensaio de compressão em função da idade de ruptura (NBR 5739/1994).....	71
Tabela 15 – Características dos agregados.....	74
Tabela 16 – Dados do ensaio de absorção da areia natural pelo método do picnômetro	78
Tabela 17 – Dados do ensaio de absorção do AGR pelo método do picnômetro	79
Tabela 18 – Propriedades químicas e físicas do cimento, do filler calcário e do fíler de AGR.....	80
Tabela 19 – resultados do ensaio de demanda de água em material granular	81
Tabela 20 – Dosagem das misturas de pastas para calorimetria.....	88
Tabela 21 – Características dos concretos no estado fresco.....	93
Tabela 22 – Resultados do ensaio de segregação.....	95
Tabela 23 – Resultados de resistência à compressão em concretos	97
Tabela 24 – Resultados do ensaio de absorção capilar.....	101
Tabela 25 – Equações e R ² das retas de sortividade.....	102

RESUMO

Embora a utilização de materiais secundários, ou subprodutos, venha ganhando espaço no desenvolvimento de materiais cimentícios de alto desempenho, o emprego de resíduo de construção e demolição (RCD), na forma de agregado reciclado (AGR), em concreto auto-adensável (CAA) ainda é um tema pouco explorado.

A retração por secagem no CAA, o qual possui um alto teor de pasta de cimento, tem se tornado um obstáculo para a indústria, principalmente no caso de peças com alta relação área superficial/volume.

Neste trabalho, analisou-se a influência da substituição de areia natural por agregado reciclado miúdo sobre as propriedades no estado fresco e no estado endurecido de concreto auto-adensável, entre elas a retração por secagem de placas de concreto, e o efeito de empenamento dos cantos causado pela retração diferencial.

Foram efetuadas misturas com teores de substituição de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% de agregado miúdo natural por agregado reciclado. Analisou-se também, a incorporação de fíler calcário e fíler de AGR, como adição mineral como controle das propriedades do concreto no estado fresco (exsudação e segregação).

Manteve-se constante o teor de argamassa, a relação água/cimento, o teor de fíler e a relação água/materiais secos. Foi realizada a equivalência das granulometrias, diminuindo o efeito da diferença destas sobre o concreto, assim como foi medida a absorção dos agregados, prevendo a água complementar demandada por estes. O ensaio de retração foi executado em ambiente climatizado sob temperatura e umidade relativa com variações fixadas em curto intervalo.

Os resultados demonstram que o fíler de AGR possui maior capacidade de manter a estabilidade das misturas do que o fíler calcário. O aumento do teor de AGR não apresentou linearidade com os resultados de massa específica e resistência à compressão. O efeito de empenamento de placas foi reduzido quando utilizado o fíler de AGR.

Palavras chave: agregado reciclado, concreto auto-adensável, retração por secagem.

ABSTRACT

Although the use of secondary materials, or sub-products, will gain space in the development of high-performance cementitious materials, the use of construction and demolition waste (CDW) in the form of recycled aggregate (RA), specifically self-compacting concrete is a relatively unexplored subject.

The drying shrinkage on these materials, which have high content of cement paste has become an obstacle for the industry, particularly in the case of parts with high relation surface area/volume.

This paper analyzed the influence of recycled aggregate on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete, including drying shrinkage of concrete slabs and the effect of curling on the corners caused by differential shrinkage.

Mixtures were made with replacement levels of 0%, 25%, 50%, 75% and 100% of natural sand by recycled aggregates. Also analyzed the addition of limestone filler and recycled aggregate filler as a mineral addition for control the fresh properties concrete.

Have been kept constant, the mortar content, the relationship water/cement, the filler content and the water/dry material. It was carried out the particle size distribution equivalence, reducing the effect of these differences on the concrete, as well as the absorption of the aggregates, providing additional water demand for these. The shrinkage test was performed in a controlled ambient.

The results show that the fillers of recycled aggregates have a greater capacity to maintain the stability of mixtures than limestone filler. The enhanced content recycled aggregate did not show linearity with results of density and compressive strength. The effect of curling was reduced when used filler of recycled aggregate.

Keywords: recycled aggregate, self-compacting concrete, drying shrinkage.

1. INTRODUÇÃO

A procura por um desenvolvimento sustentável tem levado a sociedade à investigação de meios de produção que visem à geração minimizada de resíduos, seja por meio da otimização da produção na base de sua cadeia produtiva ou por meio do reaproveitamento dos resíduos produzidos minimizando assim os impactos ambientais.

A partir deste cenário, podemos destacar os resíduos gerados pela indústria da construção civil, tanto na etapa de produção quanto na etapa de demolição (RCD), podendo afirmar que o aumento contínuo da geração destes, dentro de uma esfera global, tem causado sérios problemas de disposição de subprodutos.

Ao mesmo tempo em que a quantidade disponível de matéria-prima natural para a produção argamassas e concretos diminui (principalmente de agregado miúdo natural), uma enorme quantidade de estruturas deterioradas e obsoletas gera um sério problema ambiental.

Uma das formas abordadas de minimizar esse impacto é a reutilização dos resíduos de construção e demolição na forma de agregado reciclado (AGR) atuando como componente em novos concretos e/ou argamassas, sendo essa, provavelmente, uma alternativa viável para diminuir o consumo de matérias-primas naturais e reduzir a quantidade de resíduos dispostos.

Todavia, ainda existem diversos obstáculos para a disseminação do uso do AGR. Dentre estes, sobressaltam-se a sua composição heterogênea, a alta porosidade do material, o teor elevado de finos (material $< 0,075$ mm) e a forma irregular dos grãos.

Diante disto, diversos centros de pesquisa se vêm desafiados a desenvolver novas tecnologias, tanto no processamento dos resíduos, quanto na sua utilização final, agregando-lhes valor.

Dentro desse panorama, com o aparecimento de novos desafios no ramo da engenharia civil, considerando: a otimização de sistemas estruturais, o maior controle da qualidade da execução dos mesmos, a redução dos impactos ambientais e a busca por maior economia, por consequência, novos materiais vêm sendo desenvolvidos. Dentre esses materiais, pode-se enfatizar o desenvolvimento do concreto auto-adensável (CAA).

O CAA destaca-se por ser considerado um dos maiores avanços tecnológicos em relação aos concretos de alto-desempenho, devido à sua capacidade de acomodação e preenchimento dos espaços dentro de uma estrutura sem o uso de mecanismos de vibração, sendo necessário para tal, apenas o seu peso próprio.

Para tanto, o concreto, além de possuir ótima fluidez, como mencionado acima, é necessário que apresente boa resistência à segregação do agregado graúdo e, baixos índices de exsudação da água de mistura, além de, no momento de sua aplicação, não demonstrar bloqueio durante a passagem entre a armadura, preenchendo todos os espaços da fôrma em um tempo de espalhamento adequado.

A fabricação de um concreto que apresente características auto-adensáveis não é considerada uma questão de fácil solução, pois seu comportamento é dependente da combinação adequada de aditivos superplastificantes, elevado percentual de material fino e, sendo muitas vezes necessária a utilização de agentes promotores de viscosidade (POPPE *et al.*, 2005).

Um dos grandes obstáculos para a difusão do uso do CAA é seu elevado custo de produção. Maiores quantidades de cimento, o uso de aditivos superplastificantes de última geração e o uso de agentes promotores de viscosidade, além de um maior controle de qualidade, fôrmas estanques e procedimentos adequados de cura, são os responsáveis pelo aumento destes custos.

Outra adversidade enfrentada na produção de concretos com alto teor de argamassa (como no caso do CAA), é a perda de água durante o processo de cura, tendo como conseqüência a retração por secagem. De acordo com Péra e Ambróise (2003), no caso de placas de concreto auto-nivelante, seu desenvolvimento tem sido limitado pelo efeito de empenamento que ocorre nas extremidades da peça.

Diante destes desafios, optou-se nesta pesquisa, incorporar o agregado reciclado de construção e demolição em concreto auto-adensável.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

A proposta do estudo foi analisar a substituição de agregado natural por agregado reciclado de resíduo de construção e demolição em concreto auto-adensável, e a influência das propriedades físicas do material granular, sobre o comportamento destes concretos no estado fresco (exsudação, segregação, fluidez), assim como sua influência no fenômeno de empenamento (*curling*) em placas delgadas de concreto auto-adensável, durante o fenômeno de retração por secagem.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a influência do agregado reciclado e dos seus finos sobre as propriedades de argamassas em seu estado fresco (fluidez, exsu-

dação), visando uma adequação destas para melhor desempenho dentro do concreto;

- Verificar as alterações das propriedades do concreto no estado fresco (fluidez, exsudação, segregação), ajustando os mesmos para que alcancem as propriedades auto-adensáveis;
- Analisar a influência do teor de incorporação do agregado reciclado sobre o empenamento (*curling*) causado por retração por secagem em placas de concreto auto-adensável.

3. JUSTIFICATIVA

O primeiro apelo para a realização desse trabalho é a questão ambiental envolvida com o tema. Um panorama do consumo de agregados pela indústria do concreto mostra que caso não venham a ser desenvolvidas técnicas para utilização de materiais que venham a suprir, ao menos parcialmente, a demanda de agregados naturais, após o ano de 2010 o consumo destes pela indústria mundial de concreto permeará em torno de 8 a 12 bilhões de toneladas/ano (TU *et al.*, 2006).

Logo, o crescente aumento de consumo de matérias-primas e a disposição de resíduos de construção e demolição em locais inapropriados poderão causar o aumento do consumo de energia, o aumento exacerbado dos custos na construção, além de danos ambientais irreversíveis.

Os custos estão atrelados aos obstáculos impostos pelos órgãos ambientais, que visam à utilização racional destes recursos. Assim, a oferta de material acaba reduzida, aumentando a procura, além de, muitas vezes, aumentar os custos com frete de matéria-prima.

A escolha do tema ainda vem seguir uma linha de pesquisa já consolidada pelo grupo ValoRes que vem estudando, ao longo dos últimos anos esse tipo de resíduo nas suas diversas propriedades, visando compreender e garantir a aplicação segura desses materiais.

Por ser o AGR um material que demonstra alta absorção de água quando comparado com os agregados naturais, quando utilizado em concretos ou argamassas, estes tendem a apresentar perda de trabalhabilidade, trazendo como consequência a elevação da demanda de água.

Uma revisão sobre a absorção capilar servirá também para compreender melhor a influência dessas sobre a retração por secagem de concretos auto-adensáveis, uma vez que os agregados porosos podem tanto potencializar a retração devido ao seu alto grau de absorção, quanto auxiliar no processo de cura liberando água para a matriz.

Por fim, a escolha de utilizar o concreto auto-adensável para essa pesquisa vem do fato de que este apresenta uma elevada necessidade de teor de cimento e partículas finas (para manter a estabilidade do material no estado fresco), assim como volume e dimensões reduzidas dos agregados, potencializando a sua retração em comparação aos concretos convencionais. Logo, a viabilidade de aplicação do AGR em concreto auto-adensável é avaliada, por sê-lo um material que poderá suprir parte da necessidade de finos do AGR, além de buscar uma valorização maior deste resíduo ainda pouco explorado tecnicamente.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Resíduo de construção e demolição (RCD)

A utilização do resíduo de construção e demolição como substituto total ou parcial dos agregados em materiais cimentícios, passou a receber maior importância logo após o fim da segunda Guerra Mundial, no processo de reconstrução da Alemanha. Desde então, pesquisadores de diversos países têm desenvolvido trabalhos com o intuito de aprimorar as propriedades desse material como constituinte em novos concretos.

Na Europa, desde o início dos anos 80, o processamento de resíduos de construção e demolição tem recebido maior atenção. Um dos motivos desses esforços é a falta de capacidade dos aterros e a redução do fornecimento de materiais naturais. O início desses esforços deu-se na Holanda nos primórdios da década de 1980. Em 1984, um programa de pesquisa foi lançado para investigar a eficiência do tratamento, as propriedades do entulho processado para reutilização em obras de terraplenagem, a utilização como agregados em concreto e a compatibilidade ambiental dos processos de reciclagem.

O fator histórico aqui tratado é também de grande relevância levando-se em consideração a composição dos agregados reciclados. Segundo Tränkle e Dohmann (1996), a partir de meados de 1950, a indústria da construção civil tem sofrido um número elevado de modificações. Essa influência histórica é evidenciada pelo aumento da utilização do concreto, em detrimento do uso de materiais cerâmicos, além do aumento de compostos leves e de materiais isolantes, e muitos outros, o que dificulta cada vez mais o processamento destes resíduos.

Em 1992, uma comissão européia determinou o resíduo de construção e demolição como prioridade no fluxo de resíduos totais gerados. Uma estratégia em comum utilizada em diversos países da Europa foi a reutilização deste tipo de resíduo. A meta era a implantação de um plano estratégico que fosse colocado em prática até o ano de 1996.

Atualmente, o resíduo de construção e demolição é alvo de diversas pesquisas, desde estudos visando o desenvolvimento de políticas públicas, passando pela diminuição de emissão do resíduo a partir de um melhor planejamento das construções, até o estudo das propriedades do material analisando a sua aplicabilidade.

Do ponto de vista ambiental e de saúde pública, o pH alcalino do concreto (em torno de 11,5) é altamente prejudicial para o meio ambiente e em consequência para os seres humanos. Assim, a alta quantidade deste resíduo, despejado em aterros e, muitas vezes, em locais inapropriados, pode levar a uma séria contaminação do solo e dos mananciais aquíferos.

Segundo Costa *et al.* (2004), os resíduos provenientes das atividades de construção e demolição, nas médias e grandes cidades brasileiras, permeiam de 40% a 70% da massa total dos resíduos sólidos urbanos. As estimativas internacionais de produção de RCD variam entre 130 e 3000 kg/hab.ano. Já em São Paulo, a estimativa gerada pela Prefeitura Municipal é de que a produção deste tipo de resíduo alcance aproximadamente 280 kg/hab.ano. Entretanto, com relação a este último índice, John e Agopyan (2000) frisam que a metodologia aplicada para se obter tal estimativa é desconhecida.

De acordo com Poon *et al.* (2001), o resíduo gerado durante o processo de construção e demolição pode ser classificado dentro de cinco categorias dependendo da sua origem, sendo elas: material de construção de rodovias, solo escavado, resíduo de demolição, resíduo de desobstrução de terreno e resíduo de renovação.

As três primeiras categorias citadas na Figura 1 por Poon, *et. al* (2001) consistem de altos percentuais de material inerte. Ao contrário, os resíduos gerados das atividades de desobstrução de terreno e de trabalho de renovação, trazem muitos contaminantes orgânicos e outros escombros.

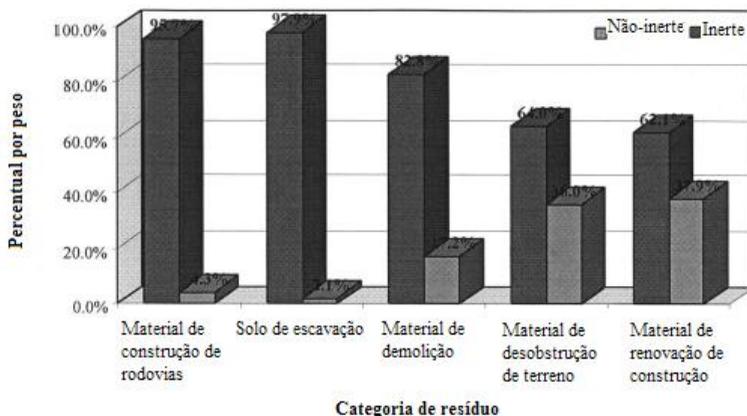


Figura 1 – Percentual de material inerte e não-inerte no RCD (adaptado de POON *et al.*, 2001)

Existem ainda outras duas categorias do resíduo de construção: o resíduo da estrutura e resíduo do acabamento. Fragmentos de concreto, barras de aço e pedaços de madeira são a base do resíduo durante o processo de construção. Já os resíduos provenientes das etapas de acabamento, possuem uma faixa bem mais ampla de materiais constituintes (POON, *et al.*, 2001).

Ainda pode ser considerado o resíduo proveniente da indústria de concreto pré-misturado. Este tipo de resíduo com características menos heterogêneas do que dos resíduos gerados nas etapas de construção e demolição, provém, principalmente, das atividades de lavagem dos caminhões betoneira e dos equipamentos da central, assim como de eventuais sobras ao final dos serviços de concretagem (SEALEY *et al.*, 2001).

Os resíduos provenientes do processo de demolição incluem praticamente os mesmos materiais gerados na etapa de construção, incluindo a superestrutura, concreto das fundações, pisos e etc. Esse tipo de resíduo apresenta um alto percentual de material inerte como blocos, areia e concreto. Outros materiais como papel, vidros, plásticos e outros, aparecem em menor quantidade (POON *et al.*, 2001).

Do ponto de vista técnico, por ser um resíduo de composição considerada heterogênea, as possibilidades de reciclagem de RCD variam de acordo com sua composição. Desta forma, a viabilidade de reciclagem do resíduo dependerá dos percentuais presentes de cada componente, o que está fortemente ligado com os parâmetros da região na qual

o resíduo foi gerado, além da aplicação a qual o produto beneficiado será destinado.

As frações compostas de concretos estruturais e de rochas naturais podem ser utilizadas quase que em sua totalidade como agregado para materiais cimentícios. Já a presença de materiais mais porosos como, argamassas e material cerâmico causa um enfraquecimento do agregado gerado, além de um produto com maior absorção de água. A Tabela 1 apresenta os percentuais dos principais materiais encontrados nos resíduos de demolição e construção segundo Poon *et al.*, 2001.

Tabela 1 – Composição dos resíduos de construção e demolição (adaptado de Poon *et al.*, 2001)

Constituinte	Percentual	
	Resíduo de demolição	Resíduo de construção
Asfalto	1,61	0,13
Concreto	19,99	9,27
Concreto armado	33,11	8,25
Solo, sujeira, barro	11,91	30,55
Rocha	6,83	9,74
Pedregulho	4,95	14,13
Madeira	7,15	10,53
Bambu	0,31	0,30
Blocos de concreto	1,11	0,90
Tijolo	6,33	5,00
Vidro	0,20	0,56
Outros orgânicos	1,30	3,05
Tubulação plástica	0,61	1,13
Areias	1,44	1,70
Árvores	0,00	0,12
Instalações	0,04	0,03
Refugo	0,07	0,24
Metal (ferro)	3,41	4,36
Total	100	100

Conforme Rao *et al.*, 2007, a absorção de água em agregados reciclados varia em torno de 3 a 12% (e em alguns casos podendo ser superior), tanto para agregado graúdo ou miúdo, sendo que esse valor é dependente do tipo de material que é utilizado para a produção do agregado.

Percebe-se que o valor da absorção da água no AGR é muito superior ao dos agregados naturais, os quais ficam em uma estreita faixa de 0,5 a 1%. Essa alta porosidade dos agregados reciclados pode ser atribuída ao resíduo de argamassa que permanece aderido ao agregado e

ao material cerâmico presente. Segundo Hansen e Narud (1995), além do agregado reciclado gerado a partir do resíduo de construção e demolição demandar uma maior quantidade de água que os agregados naturais eles ainda afetam a trabalhabilidade do concreto, fazendo com que haja uma maior perda de fluidez em um intervalo de tempo menor.

Em estudo realizado por Crentsil *et al.* (2001), comparando a absorção de água em concreto com agregados naturais e outro com AGR, notou-se que houve um aumento na absorção, no concreto, de 25% do concreto com agregado reciclado graúdo, em relação ao material com agregado basáltico.

De acordo com Crentsil *et al.* (2001), a argamassa aderida ao agregado altera o desempenho do material confeccionado com o AGR. Ainda é enfatizado que ocorre uma redução na resistência à compressão em torno de 10% e um aumento de até 70% na retração por secagem. Algumas características do material pesquisado são demonstradas na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades dos agregados basálticos e dos agregados de concreto reciclado (Adaptado de Crentsil *et al.*, 2001)

Propriedades	agregado de concreto reciclado	agregado basáltico
Massa específica, kg/m ³ AS (1141.6)	2394	2890
Absorção de água, % AS (1141.6)	5,6	1
nível de impureza, % (AS 1141.32)	0,6	<0,1
perda ao fogo, %	4,9	1,3

A trabalhabilidade do concreto feito com agregado reciclado é menor, especialmente quando são utilizados percentuais de substituição superiores a 50%. Para melhorar essa propriedade, diversos autores buscaram diferentes níveis de saturação de umidade das porções graúdas do AGR (RAO *et al.*, 2007).

Entretanto, segundo Vieira e Dal Molin (2004), as propriedades do agregado reciclado, como a rugosidade, a granulometria contínua e a maior quantidade de finos acabam aumentando a resistência à segregação e melhorando o efeito de empacotamento das partículas.

De acordo com Rao *et al.* (2007), a quantidade de ar incorporado em concretos contendo AGR é levemente superior ($\approx 4\%$ a $\approx 5,5\%$) à do concreto produzido com agregados naturais, em casos com 100% de substituição.

Outra propriedade afetada é a densidade do concreto produzido com AGR. Concretos feitos com agregados naturais possuem uma massa específica em torno de 2400 kg/m^3 , enquanto que concretos produzidos com agregado reciclado permanecem em torno de 2150 kg/m^3 , indiferente do tipo de cimento. Essa menor densidade é causada pela menor massa específica do agregado reciclado, o qual é dependente do tipo de concreto que foi utilizado para confeccioná-lo, além da influência da variação dos outros materiais presentes no resíduo.

Em avaliação às propriedades como condutividade de íons cloreto, permeabilidade ao oxigênio e sortividade à água, Olorunsogo e Padayachee (2002), demonstraram que em concretos contendo níveis de substituição de 0%, 50% e 100% de agregado natural por agregado reciclado, há uma diminuição da durabilidade proporcional ao aumento de substituição. Porém, foi verificado que todas essas propriedades melhoraram com o decorrer do tempo para o nível de substituição de 50%.

Em relação à durabilidade do concreto, não são aconselháveis substituições totais devido aos resultados analisados com misturas contendo 100% de AGR, aonde houve diminuição da resistência ao ataque de agentes agressivos. Esse fenômeno pode ser explicado devido, inclusive, às rachaduras e fissuras causadas no agregado reciclado durante o processo de obtenção, tornando o agregado mais suscetível à permeabilidade, difusão e absorção de fluidos (OLORUNSOGO e PADAYACHEE, 2002).

4.2 Concreto auto-adensável

O concreto auto-adensável é considerado um material cimentício de última geração, enquadrando-se dentro da categoria dos concretos de alto desempenho (CAD). Inicialmente, era denominado CAD qualquer concreto que atingisse elevada resistência à compressão aos 28 dias de idade ($f_{ck} > 60\text{MPa}$). Essa classificação tem evoluído e, atualmente, é considerado concreto de alto desempenho, qualquer mistura que alcance requisitos especiais para a aplicação do material, que não seriam atingidas com procedimentos e materiais utilizados rotineiramente (LARRARD e SEDRAN, 2002).

A principal definição para concreto auto-adensável é a de um concreto com comportamento fluido o suficiente para que possa se mover dentro de fôrmas, preenchendo os espaços existentes entre as arma-

duras, apenas pela ação de seu peso próprio (OKAMURA & OUCHI, 2003).

Entretanto, para alcançar satisfatoriamente esse comportamento, é necessária uma resistência à segregação e a exsudação, e uma capacidade de passar por locais com espaço restrito, sem causar congestionamento, como mencionado por Rols *et al.* (1999), demonstrando assim, uma estabilidade adequada do material e mantendo sua uniformidade.

Em geral, os concretos auto-adensáveis, são caracterizados por um baixo valor de tensão de escoamento e uma viscosidade plástica relativamente alta. A baixa tensão de escoamento é necessária para aumentar o espalhamento do concreto. Já a viscosidade moderada é responsável por manter uma dispersão homogênea das partículas sólidas durante o lançamento do concreto, mantendo assim a estabilidade da mistura (ASSAAD & KHAYAT, 2005).

O CAA pode ser aplicado em diversas situações, desde que respeitados alguns parâmetros como: taxa de armadura e diâmetro máximo do agregado graúdo, estanqueidade das fôrmas, dentre outros. Algumas das aplicações deste tipo de concreto são:

- Lajes de pequena espessura ou lajes nervuradas;
- Fundações executadas por hélice contínua;
- Paredes, vigas e colunas;
- Parede diafragma;
- Reservatórios de água e piscinas;
- Pisos, contra-pisos, muros e painéis de vedação;
- Locais de difícil acesso;
- Peças de dimensões reduzidas, com muitos detalhes e com alta concentração de armadura.

4.2.1 Propriedades do concreto auto-adensável

O concreto auto-adensável apresenta várias propriedades características que o diferenciam do concreto convencional, dentre as quais:

- Propriedades no estado fresco: alta deformabilidade, alta resistência à segregação, resistência à exsudação;
- Propriedades no estado endurecido: menor módulo de elasticidade (causado pelo volume reduzido de agregado graúdo), maior durabilidade (devido à microestrutura mais compacta, gerada pela adição de finos, causando refinamento dos poros, devido ao melhor empacotamento dos grãos e melhora das propriedades da zona de transição), maior retração (tende a ser maior devido à grande quantidade de finos e pelo maior percentual de pasta de cimento).

Segundo Mehta e Monteiro, 1994, o esforço necessário para o adensamento do concreto é regido pelas suas características de fluxo e pela facilidade com que a eliminação de vazios pode ser alcançada sem prejudicar a sua estabilidade. A estabilidade é um índice simultâneo de capacidade de retenção de água (o contrário da exsudação) e de capacidade de retenção do agregado graúdo na argamassa do concreto fresco (o contrário de segregação), medida geralmente pela coesão.

O desenvolvimento das características adequadas do concreto auto-adensável requer o controle dos parâmetros reológicos da matriz cimentícia, da quantidade de material fino complementar, assim como a quantidade e a distribuição do tamanho das partículas dos agregados graúdos.

Por ser um material multifásico onde os agregados graúdos estão suspensos em uma argamassa de comportamento fluido, a fluidez e a resistência à segregação são asseguradas controlando-se a reologia da argamassa e a quantidade e dimensões do agregado graúdo (YAHIA, *et. al.*, 2005).

Segundo Okamura e Ouchi, 2003, uma pasta com viscosidade adequada é necessária para evitar o bloqueio dos agregados graúdos quando o concreto passa pelos obstáculos, já que quando o concreto se movimenta, a pasta irá evitar o aumento de tensões localizadas, geralmente, em torno dos agregados graúdos.

Outro fator importante é a capacidade do concreto auto-adensável em passar por obstáculos. Em estruturas com armaduras extremamente densas, há a tendência de ocorrer o congestionamento dos agregados nas regiões próximas (Figura 2). Para que o concreto consiga fluir adequadamente é necessária certa energia. Essa energia acaba sendo consumida quando se aumenta a tensão interna gerando bloqueio das partículas de agregados.

Esse congestionamento é causado pela diminuição da distância entre as partículas de agregado graúdo, o que acaba provocando o aparecimento de tensão de cisalhamento entre as partículas. Para evitar que isso ocorra, é necessário diminuir essa tensão de cisalhamento garantindo uma viscosidade adequada da pasta e tomar cuidados com os agregados em relação as suas dimensões e quantidades adequadas de acordo com o espaçamento das barras de aço da armadura (Okamura e Ouchi, 2003).

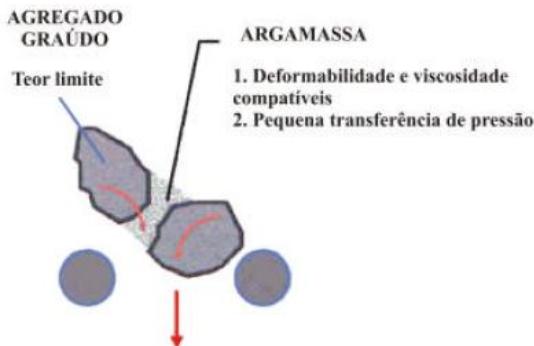


Figura 2 – Mecanismo de resistência ao bloqueio (Adaptado de OKAMURA; OUCHI, 2003)

4.2.2 Vantagens e desvantagens do concreto auto-adensável

A sua alta deformabilidade, seguida de alta coesão e homogeneidade permite a abolição do uso da atividade de vibração, o que reduz custos com mão-de-obra, energia e manutenção de equipamento, além de reduzir a geração de ruídos, causando menor desconforto entre os operários e gerando menos transtornos para a vizinhança da obra ou outro local de aplicação.

Além da considerável redução do tempo de execução utilizando-se o concreto auto-adensável, o uso de materiais secundários como cinza volante, cinza pesada, fíler calcário, resíduo de britagem e outros, conferem a esse tipo de concreto diversas vantagens ambientais.

A produção do concreto auto-adensável ainda é pouco difundida devido ao custo de produção, visto que nem todo concreto produzido por uma central dosadora será de características auto-adensáveis. O material ainda demanda um maior controle de qualidade, sendo muito mais sensível a quaisquer alterações na matéria-prima constituinte (teor de pasta, tipo de cimento, tipo de adição mineral, tipos de aditivos, etc).

Dentre os obstáculos para a disseminação da produção do concreto auto-adensável, está o tempo prolongado de mistura. De acordo com Chopin *et al.* (2004), comparando-se em escala reduzida, o tempo de mistura de um CAA é aproximadamente 75% superior ao tempo necessário para misturar um concreto convencional. Isso ocorre devido ao acréscimo de material complementar na sua composição, o que leva a um tempo maior para homogeneização da mistura.

Outro fator já citado é o aumento da retração causado pelo alto teor de pasta presente na mistura, o que leva a um acréscimo dos cuidados e por conseqüência dos custos do material e na sua formulação.

Já na fabricação de pré-moldados, a utilização do CAA pode ser difundida para praticamente todos os materiais produzidos, diminuindo assim para a empresa os custos com energia de vibração e nivelamento, operário específico para as funções e manutenção de equipamento.

4.3 Materiais para concreto auto-adensável

O concreto auto-adensável caracteriza-se por possuir uma quantidade superior de material fino quando comparado com o concreto convencional, além de necessitar de uma distribuição de tamanho dos grãos uniforme, o que irá proporcionar um melhor empacotamento das partículas.

Diferente do concreto convencional, o teor de pasta de cimento no CAA é superior, devido à maior necessidade de lubrificação entre as partículas, o que vem a facilitar a movimentação destas, principalmente a do agregado graúdo. Um baixo grau de contato entre os agregados pode levar a uma baixa fricção interna, aumentando a mobilidade do concreto.

4.3.1 Cimento

É importante que para o desenvolvimento do estudo seja escolhido um tipo de cimento entre os diversos tipos comercialmente avaliados na região do estudo. Tutikian (2004) recomenda que haja muito cuidado na escolha, já que as normas técnicas nacionais referentes aos tipos de cimento podem permitir uma ampla faixa de adições, fazendo assim, com que a composição de um tipo de cimento possa variar muito entre indústrias, ou até mesmo dentro de um lote.

Outro critério a ser analisado é a compatibilidade do cimento com o aditivo superplastificante. Segundo Neville, 1997, um cimento adequado não deve possuir uma finura muito elevada (Blaine ~ 400 m²/kg) e deve apresentar um baixo teor de C₃A. A compatibilidade dos dois materiais pode ser analisada previamente, determinando o tempo necessário para que uma determinada pasta de cimento escoe por um funil padronizado, chamado de Cone de *Marsh*.

Rols *et al.*, 1999, utilizaram em seu estudo, onde o objetivo era avaliar novos agentes promotores de viscosidade em concreto auto-nivelante, um cimento Portland comum (CEM I 52.5 R) de acordo com a norma europeia ENV 197/1.

Péra e Ambroise, 2004, em estudo de argamassas auto-nivelantes para reparos e acabamentos e, em placas de argamassas auto-nivelantes, utilizaram uma composição de cimento Portland comum (CEM I 52.5 R) de acordo com a norma europeia ENV 197/1 com um cimento alumi-

noso (CSA), na proporção de 12,5% e 87,5%, respectivamente, com o objetivo de controlar a retração causada pelo alto teor de pasta.

Emoto *et al.*, 2007 também utilizaram como material cimentício, uma composição de cimento Portland (CEM I 42.5 R), cimento aluminoso e sulfato de cálcio, na tentativa de compensar a retração da argamassa auto-nivelante com a reação expansiva de etringita.

Do *et al.*, 2003, utilizou um cimento Portland especificado como KS L 5201 pela norma coreana. O material apresentou uma área de superfície específica de $3300\text{cm}^2/\text{g}$.

Segundo EFNARC, 2005, todos os cimentos que estiverem em conformidade com a EN 197-1 podem ser usados para a produção desse tipo de concreto. A escolha correta do tipo de cimento dá-se conforme os requisitos específicos de cada aplicação. O que se verifica em diversos trabalhos é a utilização de um cimento tipo I para a condução do processo experimental. A escolha de cimentos que não possuam adições minerais é feita para que estas adições não venham a influenciar as propriedades do concreto durante as pesquisas.

4.3.2 Agregados

Segundo EFNARC, 2005, a distribuição do tamanho das partículas de agregado graúdo influencia diretamente a fluidez e a habilidade de passagem, assim como a demanda de pasta. Partículas de agregados de formato esférico reduzem o bloqueio e melhoram a fluidez devido à redução do atrito interpartículas.

Em um estudo analisando 68 artigos publicados pelo mundo todo, Domone (2006), verificou que cerca de 70% do total utilizavam agregado graúdo com diâmetro máximo em uma faixa de 16 a 20 mm. Outros pesquisadores usaram agregados dentro de uma faixa de 10 a 15 mm e, poucos foram os casos em que se utilizou agregado com diâmetro máximo superior a 20 mm. Nos artigos analisados, a quantidade de agregado graúdo, em volume, variou de 28% a 38% pelo volume de concreto, com cerca de 80% dessa variação estando numa faixa de 29,1% a 34,8%, sendo o equivalente a $770 - 925\text{ kg/m}^3$ de agregado graúdo em concreto, com massa específica de $2,65\text{ g/cm}^3$.

A influência dos agregados miúdos sobre as propriedades do concreto auto-adensável no estado fresco são tão significantes quanto à do agregado graúdo. Frações de partículas menores que 0,125 mm podem ser incluídas na quantidade de finos da pasta e fazer parte da relação água/pó (EFNARC, 2005).

Embora uma quantidade de pasta adequada auxilie na redução do atrito interno, uma boa distribuição granulométrica dos agregados miú-

dos também é considerada muito importante. Sendo muito comum a mistura entre areias com módulos de finura diferentes, até que se atinja um empacotamento adequado das partículas reduzindo assim a demanda de pasta (EFNARC, 2005).

Rols *et al.*, 1999, utilizaram como agregado graúdo para confecção de concreto auto-nivelante, uma brita com diâmetro máximo de 16 mm. O agregado miúdo utilizado foi uma areia natural de rio, contendo 4% de material maior que 5 mm. Na mesma pesquisa não foram utilizados finos com diâmetro inferior a 0,075 mm, uma vez que o objetivo do trabalho foi analisar diferentes tipos de agentes modificadores de viscosidade alternativos.

Na confecção de placas de concreto auto-nivelante, Péra *et al.* (2004) utilizaram areia de formação silico-calcário com dimensões entre 0 e 5 mm (incluindo os finos com diâmetro inferior a 0,075 mm) e agregado graúdo com dimensões entre 5 e 14 mm.

Para formulação de argamassas auto-nivelantes para acabamento de pisos, Do *et al.* (2003) utilizaram uma areia silicosa com tamanho máximo não superior a 1,2 mm. Não foram utilizados finos inferiores a peneira 0,075 mm para os agregados miúdos.

Em estudo visando avaliar a cinética de hidratação e a reologia de argamassas auto-nivelantes, Emoto *et al.* (2007) utilizaram areia quartzosa com dimensões entre 0,2 e 0,5 mm.

Em um estudo avaliando as propriedades de concretos auto-adensáveis com agregados com uma distribuição descontínua e altos teores de fíler, Bosiljkov (2003) utilizou uma areia quartzosa com dimensão entre 0 e 4 mm e um agregado graúdo calcário com dimensões entre 4 e 16 mm. Dentro do mesmo trabalho, a partir de agregados com uma “pobre” distribuição, foram realizadas composições dos mesmos, para que estes atingissem uma distribuição granulométrica mais adequada para o uso em CAA.

Segundo EFNARC, 2005, um alto volume de pasta de cimento requerido nesse tipo de concreto auxilia a redução do atrito entre as partículas de agregados. Porém, ressalta que métodos de dosagem misturando mais de um tipo de areia otimizam a curva granulométrica e ajudam a reduzir o alto volume de pasta.

4.3.3 Adições

No concreto auto-adensável, em muitos casos, também há uma necessidade maior de adição de material fino extra. O que para o concreto convencional representa um risco de perda de eficiência mecânica e

causa de aumento na demanda de água e superplastificantes, no CAA essas adições são alternativas para garantir a estabilidade do material.

Devido às propriedades requisitadas no estado fresco, para o concreto auto-adensável, adições minerais inertes ou pozolânicas são comumente utilizadas para melhorar e manter a coesão da mistura. O teor de adição pode ser determinado em função da substituição ao cimento, diminuindo assim também a liberação do calor de hidratação, uma vez que o concreto auto-adensável apresenta um alto teor de pasta.

As adições minerais podem ser inertes, causando um efeito físico e promovendo uma maior compactidade do material devido ao melhoramento no empacotamento das partículas (efeito microfiller). As partículas podem agir também como ponto de nucleação, influenciando a cinética de hidratação, provocando uma diminuição do espaço de crescimento dos hidratos, gerando uma grande quantidade de pequenos cristais ao invés de uma pequena quantidade de grandes cristais (DAL MOLIN, 2005).

Ainda, segundo Dal Molin (2005), as partículas das adições podem agir na zona de transição, interferindo no movimento das partículas em relação aos sólidos, reduzindo a exsudação de água no local e interferindo no crescimento orientado dos cristais de hidróxido de cálcio (CaOH_2).

As ações químicas das adições são caracterizadas, principalmente, pela capacidade de reação com a Portlandita, formando silicato de cálcio hidratado (C-S-H) a partir desta (reação conhecida como pozolânica). Materiais como a sílica ativa, o metacaulim, a cinza de casca de arroz, a cinza volante e a argila calcinada são exemplos de adições pozolânicas (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Segundo Haque *et al.* (1998), felizmente, muitos desses materiais utilizados como material fino complementar, são considerados subprodutos industriais, sendo sua utilização não apenas tecnicamente e economicamente viável para produzir um concreto com melhores características, mas também uma forma de minimizar os impactos ao meio ambiente.

De acordo com Bosiljkov (2003), a adição de fíler calcário traz diversos efeitos sobre as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido. Este age como ponto de nucleação para o C-S-H e o CH durante a hidratação nas primeiras idades, acelerando a hidratação dos minerais do clínquer, especialmente o C_3S , resultando em um aumento da resistência nas primeiras idades.

Devido ao refinamento e aumento da tortuosidade do sistema de poros, a adição de fíler calcário também modifica a variação de umidade no concreto, a qual controla a retração e as tensões de fissuração.

De outro lado, o módulo de elasticidade assim como as tensões de retração de concretos com fíler calcário podem ser maiores, iguais ou menores, desde que essas características dependam não somente do efeito fíler, mas também da fração de volume da pasta de cimento (BOSILJKOV, 2003).

A Figura 3 mostra a imagem de microscopia eletrônica de varredura em uma amostra de fíler calcário em trabalho desenvolvido por Artelt e Garcia (2008). De acordo com os autores, o fíler calcário apresenta forma irregular e uma quantidade considerável de partículas inferiores à $1\mu\text{m}$.

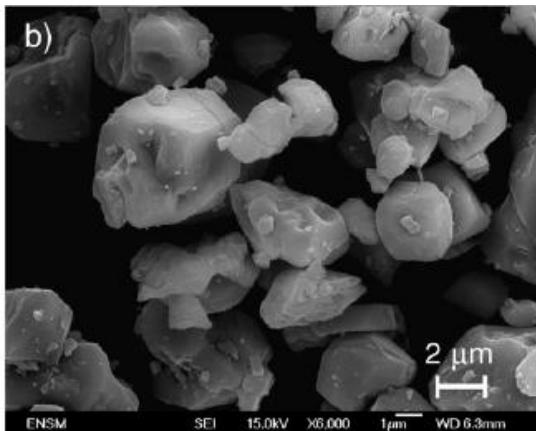


Figura 3 – MEV de amostra de fíler calcário (ARTELT e GARCIA, 2008)

Rols *et al.* (1999) utilizaram como material fino complementar fíler calcário com massa específica de $2,7\text{ g/cm}^3$ e área de superfície específica de $395\text{ m}^2/\text{kg}$. Péra e Ambroise (2004), e Emoto *et al.* (2007), assim como Rols *et al.* (1999), também utilizaram como adição o mesmo tipo de fíler. Entretanto, em ambos os trabalhos realizados, não há informações sobre as características físicas do material. Apenas Péra e Ambroise (2004), informam que o fíler utilizado é composto de 98% de CaCO_3 . Em ambos os trabalhos, a adição mineral não foi incluída como substituição ao cimento.

Rais *et al.* (2004), utilizaram como adição mineral, em um estudo que avaliava a produção de argamassas auto-nivelantes para acabamento

de pisos, um subproduto da fabricação de ácido fluorídrico e carbonato de cálcio com partículas entre 40 e 80 μm .

De acordo com Petersson (1999) *apud* Melo (2005), não é recomendável utilizar adições minerais com curva de distribuição granulométrica semelhante à do cimento, sendo mais aconselhável a utilização de adições com curvas que apresentem menor inclinação. De acordo com o autor, esse parâmetro é caracterizado através do fator de inclinação. Tal fator é definido a partir do quociente entre o diâmetro correspondente a 50% do total de partículas e o diâmetro correspondente a 80% do tamanho das partículas, com relação ao percentual retido acumulado.

Domone, 2007, verificou em um estudo analisando as propriedades de concretos auto-adensáveis no estado endurecido, que o fíler calcário tem sido comumente utilizado na produção de CAA na maioria dos artigos analisados em sua pesquisa.

Poppe e Schutter (2005) avaliaram a influência do fíler calcário na cinética de calor de hidratação em pastas de cimento. Na Figura 4, é possível observar a distribuição granulométrica dos cimentos e fillers utilizados na pesquisa.

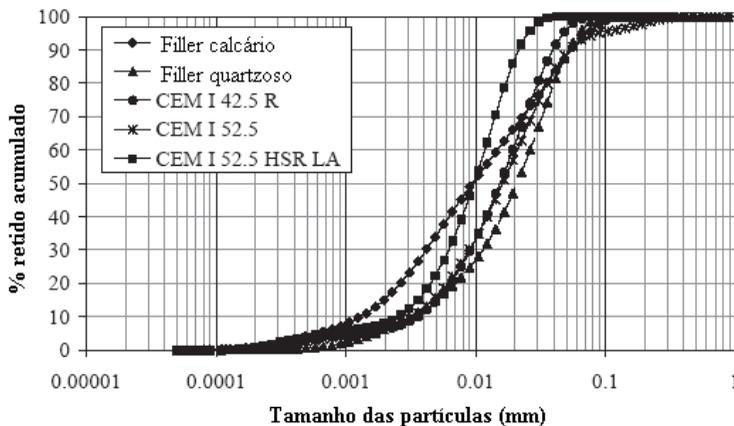


Figura 4 – distribuição do tamanho das partículas de cimento e fillers (Poppe e Schutter, 2005)

Mnahoncakova *et al.* (2008), em um estudo avaliando as propriedades do concreto auto-adensável, tanto no estado fresco (fluidez, segregação e exsudação) quanto no estado endurecido (absorção de água, condutividade térmica, permeabilidade à água e resistência à compres-

são), utilizaram um fíler calcário com a composição química apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Composição química do clínquer e fillers (Mnahoncakova *et al.*, 2008)

Compostos	Clínquer	Cinza volante	Filler calcário
SiO ₂	22.57	52.77	1.50
Fe ₂ O ₃	2.13	7.32	0.38
Al ₂ O ₃	4.97	24.98	0.40
CaO	68.11	3.42	53.76
MgO	0.82	2.73	0.71
SO ₃	0.40	0.34	0.065
K ₂ O	0.20	2.93	Não determinado
Na ₂ O	0.15	0.77	
CaO livre	0.68	<0.10	

4.3.4 Aditivos

Segundo a NBR EB – 1763/92, os aditivos para concreto são produtos que, adicionados em pequena quantidade em concretos de cimento Portland, modificam algumas de suas propriedades, com o objetivo de alcançar uma determinada condição. Segundo Martin (2005), os aditivos, quando utilizados corretamente, podem melhorar ou modificar as seguintes propriedades: a reologia, a pega, a quantidade de ar incorporado, a durabilidade e a resistência mecânica.

O uso de aditivos permite ampliar o campo de aplicação do concreto e, ainda, permite a redução de custos (levando-se em consideração todas as operações do processo). Entretanto, segundo Martin (2005), as modificações das propriedades do concreto provocadas pelo emprego de aditivos, são muito sensíveis à sua dosagem, assim como à temperatura e ao tipo de cimento utilizado.

Para a fabricação de concreto auto-adensável, o uso dos aditivos é de fundamental importância, principalmente o uso dos superplastificantes, que são indispensáveis para a garantia das propriedades adequadas do concreto no estado fresco. De acordo com as necessidades, ainda podem ser utilizados outros tipos de aditivos, como aceleradores ou retardadores de pega, incorporadores de ar, entre outros.

Segundo a NBR EB – 1763/92, os aditivos superplastificantes são produtos que aumentam o índice de consistência de um concreto quando mantida a mesma relação água/cimento, sendo capaz de reduzir no mí-

nimo 12% da quantidade de água para alcançar um concreto com determinada consistência.

Os aditivos incorporadores de ar são substâncias tensoativas formadas de moléculas de cadeias longas, com uma extremidade hidrófila (atrai a água) e uma hidrófoba (repele a água). Geralmente esses aditivos são formados a partir de resinas da madeira, materiais protéicos, ácidos graxos e detergentes sintéticos (MEHTA, 1994).

O princípio de funcionamento dos incorporadores de ar (aniônico e de caráter hidrófobo) é a sua adsorção pelas partículas de cimento. Apenas uma pequena parte do aditivo é dissolvido em forma de sal de cálcio, formando bolhas (em geral com diâmetro inferior a 75 μm). Essas bolhas se unem por uma ação tensoativa à superfície hidrófoba da combinação cimento-aditivo. A quantidade de ar a ser incorporada pode ser modificada, dependendo do módulo de finura da areia utilizada (MARTIN, 2005).

Em estudo analisando a eficiência de diferentes agentes promotores de viscosidade Rols *et al.* (1999) utilizaram um aditivo superplastificante de base melanina sulfonado, contendo 30% de teor de sólidos, em combinações binárias com as diferentes concentrações de agentes modificadores de viscosidade.

Em um estudo sobre argamassas auto-nivelantes para acabamento de pisos, Rais *et al.* (2004) utilizaram uma combinação de aditivo superplastificante à base de lignossulfonato de cálcio com 40% de teor de sólidos (Plastiment BV 40 / Silka) e um lignossulfonato de sódio, com 36% de teor de sólidos (Alphaplast LS),

Na realização de um estudo sobre o empenamento de placas de argamassa auto-nivelante, Péra e Ambróise (2004) utilizaram apenas um aditivo superplastificante policarboxilato de base líquida com 30% de teor de sólidos.

Dentre os aditivos superplastificantes destacam-se atualmente os Policarboxilatos (Martin, 2005). Seu efeito oferece ótima fluidez de longa duração, sem retardo excessivo do tempo de pega. Porém, devido sua complexa estrutura química, os policarboxilatos são compatíveis com um número limitado de matérias-primas. O seu uso é citado em diversos estudos realizados por diversos autores (Bosiljkov, 2003; Assad e Khayat, 2005; Felekoglu, 2006). A estrutura química desse tipo de aditivo é apresentada na Figura 5.

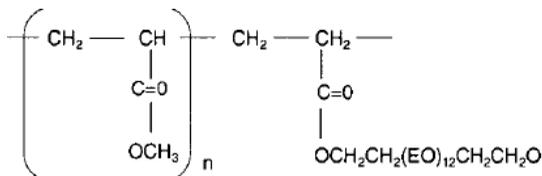


Figura 5 – Monômero de um policarboxilato

Domone (2006) ressalta em um estudo sobre o estado-da-arte do concreto auto-adensável, que de 68 artigos produzidos em 11 anos, em 30 casos foi utilizado em conjunto com o aditivo superplastificante (na maioria policarboxilato) um aditivo incorporador de ar. Em 30 dos 68 casos estudados incorporaram na mistura, aditivos incorporadores de ar em combinação com outro aditivo. Segundo Martin (2005), o ar incorporado, melhora a trabalhabilidade do concreto, diminuindo a segregação e a exsudação.

Os aditivos a base de éter policarboxílico, agem, principalmente por repulsão estérica. Esse mecanismo é produzido pela presença de uma longa cadeia lateral ligada em vários pontos da cadeia central do polímero. Esta arquitetura produz um forte efeito dispersante, impedindo o entrelaçamento das cadeias laterais de diferentes moléculas de aditivos, criando uma capa de adsorção de grande volume que impede a aproximação das partículas de cimento.

4.3.4.1 Agentes modificadores de viscosidade

Vários tratamentos diferentes têm sido usados para desenvolver o concreto auto-adensável. Um método de conseguir a estabilidade necessária para tal, é o aumento significativo de materiais finos (como: cinza volante ou filler calcário) sem substituição da quantidade de água quando comparado ao concreto comum (ROLS *et al.*, 1999).

Outra alternativa para aumentar a viscosidade da matriz, consiste na incorporação de agentes modificadores de viscosidade para melhorar a estabilidade. O uso desses aditivos com concentração adequada de superplastificantes pode assegurar alta deformabilidade e adequada trabalhabilidade, levando a uma boa resistência à segregação.

Segundo Sonebi (2006), os AMVs são praticamente novos tipos de aditivos que auxiliam no aumento da coesão e estabilidade de matrizes cimentícias, sendo os AMVs polissacarídeos solúveis em água que melhoram a capacidade de retenção desta. Seu uso aumenta a tensão de escoamento e a viscosidade plástica.

Esses agentes que podem ser à base de celulose modificada ou de amido hidrolisado, os quais são usados em torno de 0,1 a 0,2% da massa de material cimentício, permitindo a adição de material fino para se manter uma mesma viscosidade. Os glicol-polietilenos e os biopolímeros são considerados os agentes promotores de viscosidade mais eficazes para concreto auto-nivelante.

Um dos AMVs mais utilizados, o *Welan Gum* apresenta uma estrutura molecular formada por pontes de hidrogênio presente entre dois anéis de glicosídeos pertencentes a correntes poliméricas. Desde que esses polímeros possam ser absorvidos pela superfície dos grãos de cimento, pode haver um efeito de ligação de longo alcance do começo ao fim, envolvendo a fase aquosa da pasta e tornando-a mais viscosa.

Os AMVs são altamente eficazes no controle da exsudação devido suas longas cadeias de moléculas aderidas na periferia das moléculas de água, que, absorvem e fixam parte da água de mistura a qual aumenta o valor da tensão de escoamento e da viscosidade plástica (SONEBI, 2006).

Ainda segundo Sonebi (2006), moléculas em cadeias de polímeros adjacentes desenvolvem forças de atração bloqueando a migração de água e causando a formação de um gel viscoso.

De acordo com Leemann e Winnefeld (2007), em estudo realizado comparando diversos tipos de AMVs, de origem orgânica e inorgânica, na alteração da cinética de hidratação do cimento nas primeiras idades, os agentes de origem orgânica não demonstraram influência sobre a hidratação. Entretanto, os AMVs de origem inorgânica alteraram a cinética de hidratação, causando uma aceleração na mesma. Os agentes modificadores de viscosidade em questão foram utilizados em conjunto com aditivo superplastificante policarboxílico.

Rols *et al.* (1999), analisaram a utilização de três materiais alternativos ao uso do *welan gum*. Foram eles: cola de amido, sílica precipitada e um resíduo da indústria do amido. Segundo os autores, a sílica precipitada (em casos de pouca amplitude) e a cola de amido apresentaram-se como boas alternativas em substituição do *welan gum* como AMV, limitando a exsudação e aumentando a resistência à segregação em até 5h.

Phan *et al.* (2006), em um estudo das influências interativas entre aditivos superplastificantes e agentes modificadores de viscosidade orgânicos, utilizaram um AMV a base de polissacarídeos (*Foxcrete*), fornecido por J. Ambróise do INSA Lyon (*Institut National des Sciences Appliquées de Lyon*), o qual foi usado em suspensão aquosa com 20% de concentração.

Outro agente existente é a metilcelulose. Esta encontra uma grande aplicação como modificador de viscosidade em materiais de construção. É adicionado a misturas de argamassas secas para melhorar as propriedades das mesmas, tais como trabalhabilidade, retenção de água, viscosidade, aderência às superfícies e etc.

Este produto é resultante do tratamento da celulose com solução de hidróxido de sódio (NaOH) seguido da reação com cloreto de metila (CH_3Cl). Um grau de substituição de 1,6 a 2,0 grupos metoxilas por unidade de glicose proporciona uma maior solubilidade em água fria por favorecer a penetração de moléculas de água entre as cadeias, devido ao afastamento nestes pontos pela presença de grupos metoxilas. Uma solução a 2% pode atingir uma viscosidade de 7.000 a 8.000 cps a temperatura de 20°C. O material perde a viscosidade se aquecido próximo de 50 a 60°C, mas reversível ao ser resfriado. Sua condição é estável em pH de 3 a 11. A presença de sais e açúcares diminui a temperatura de geleificação. A Figura 6 mostra uma cadeia à base de éter metilcelulose.

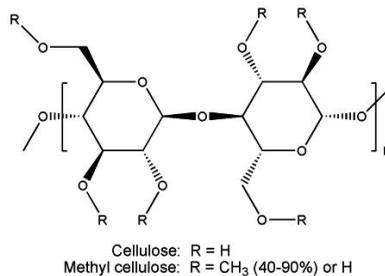


Figura 6 – Exemplo de cadeia de metilcelulose

5.4 Propriedades do concreto no estado fresco

5.4.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade não é apenas uma característica inerente ao próprio concreto, mas envolve também as considerações relativas à natureza da obra e aos métodos de execução adotados. Segundo Mehta e Monteiro (1994), a trabalhabilidade do concreto pode ser definida como a propriedade que determina o esforço necessário para manipular uma quantidade de concreto fresco com uma perda mínima de homogeneidade, atingidos os requisitos da aplicação.

O esforço necessário para lançar uma mistura de concreto é predominantemente determinado pela energia total necessária para o início e manutenção do fluxo do material, sendo dependente das propriedades

reológicas da argamassa e do atrito externo entre as partículas do concreto e a superfície da fôrma.

O mecanismo de adensamento do concreto é regido pela suas características de fluxo e pela facilidade com que a eliminação dos vazios pode ser alcançada sem comprometer a estabilidade. A estabilidade é um índice simultâneo da capacidade de retenção de água e da capacidade de retenção do agregado graúdo na massa do concreto fresco.

Nos próximos subitens serão tratadas de forma pormenorizada, diferentes propriedades do concreto no estado fresco, que influenciam a trabalhabilidade.

5.4.2 Exsudação

O fenômeno de exsudação pode ser definido como uma espécie de segregação onde a característica principal é o aparecimento de água na superfície após o lançamento e o adensamento do concreto, ocorrendo antes do início de sua pega, sendo uma característica que se destaca em misturas altamente fluidas. De acordo com Neville (1997), a exsudação é resultado da incapacidade dos componentes sólidos do material de reterem a água de amassamento quando os mesmos tendem a descer, já que a água é o constituinte do concreto com menor massa específica.

Devido a isso, a ação da gravidade induz ao aparecimento de parte da água presente no concreto, em sua superfície. Neville (1997), salienta que a exsudação pode ser representada quantitativamente pelo percentual de água de mistura ou pelo assentamento total por altura de concreto.

Neville (1997), ainda cita que a tendência à exsudação depende, entre outros, das propriedades do cimento como, finura e teor de C_3A . Ela ainda é dependente das características dos agregados. A presença de uma quantidade adequada de partículas de diâmetro inferior a 150 μm reduz significativamente a exsudação.

Assim, acredita-se que o resíduo de construção e demolição apresenta-se como alternativa para minimizar os efeitos da exsudação, uma vez que, por se caracterizar como um material altamente poroso e com teor elevado de finos, demonstra aparentemente habilidade para reter água de mistura.

5.4.3 Segregação

A segregação é caracterizada pela separação dos componentes da mistura. No concreto ela ocorre, principalmente, durante as operações de transporte e lançamento, fazendo com que a massa perca homogeneidade e levando a uma maior concentração de determinado constituinte em

determinado ponto da massa. Os principais agentes causadores são as diferentes dimensões e as diferentes massas específicas dos materiais presentes no concreto. A dimensão máxima característica, a distribuição granulométrica, o teor de finos, a massa específica e a forma dos grãos, são as principais características dos agregados que influenciam na segregação. O teor de pasta de cimento também influenciará a estabilidade da mistura, sendo esta o suficientemente fluida para assegurar a fluidez do concreto e, viscosa o suficiente para manter a estabilidade e segurar os agregados graúdos. Concretos com falta ou excesso de água também terão tendência à segregação.

5.5 Propriedades no estado endurecido

5.5.2 Resistência à compressão

A resistência à compressão simples é uma das características mais importantes de um concreto, não só porque este resiste predominantemente à compressão, mas também, porque fornece outros parâmetros físicos que podem ser relacionados a esta propriedade.

No concreto auto-adensável, a maioria dos métodos de dosagem não priorizam a resistência à compressão como parâmetro de formulação, sendo que as propriedades no estado fresco regem as principais características para aceitação do material.

A resistência à compressão é medida em corpos de prova cilíndricos padronizados com as seguintes dimensões: (θ : 10 cm e h: 20 cm) ou (θ : 15 cm e h: 30 cm). Sua medida é realizada, geralmente, aos 3, 7 e 28 dias de idade.

Tal propriedade ainda sofre a influência de diversos fatores, dentre eles: relação água/cimento, idade do concreto, forma e dimensões do corpo de prova, a qualidade dos materiais e o cuidado na moldagem e condições de cura dos corpos de prova.

Segundo Levy e Helene (2004), em estudo realizado utilizando agregados reciclados de blocos de concreto como substituição ao agregado natural, para misturas contendo teores de substituição de 20%, 50% e 100%, foi possível alcançar resistências equivalentes aos concretos feitos com agregados naturais.

Ettxeberria *et al.* (2007), ressaltam em seu estudo, que, em concretos confeccionados com 100% de substituição de agregado reciclado graúdo houve uma perda na resistência à compressão entre 20 e 25% com relação ao concreto convencional, aos 28 dias, com a mesma relação água/cimento ($a/c= 0,50$) e mesma quantidade de cimento (325 kg/m³). Entretanto, para misturas com 25% de substituição e a/c equivalentes, a resistência à compressão foi similar a de concretos sem teores

de substituição. Entretanto, vale reforçar que esse comportamento é dependente diretamente da composição do AGR, a qual pode variar muito de local para local e até dentro de uma mesma central de beneficiamento, mas em lotes diferentes.

No desenvolvimento de pesquisa sobre a substituição de areia natural por agregado reciclado de RCD em concreto convencional e sua influência nas propriedades mecânicas, Pedrozo (2008) verificou que para diferentes teores (0, 25, 50, 75 e 100%) não houve acréscimo ou decréscimo significativo das resistências, principalmente em idades mais avançadas (28 e 90 dias).

5.5.4 Retração por secagem

Há uma concordância na literatura de que as matrizes cimentícias sofrem reduções de volume, denominadas retrações, tanto no estado fresco quanto no endurecido, sendo causadas por diversos fatores.

Dentre elas, desprezando-se as deformações causadas por efeitos térmicos, a perda de água é a principal causa da retração desses materiais. Como na maioria dos casos, após a aplicação do material, este estará submetido a uma umidade relativa menor que 100%. Ocorrerá assim, a perda de água e, por conseqüência, a retração.

Portanto, a compreensão do fenômeno de retração é de fundamental importância, uma vez que as fissuras, além de diminuir a capacidade de resistência mecânica do material, principalmente de regiões ou de elementos submetidos à tração, servem, por exemplo, de pontos facilitadores de acesso a agentes nocivos, reduzindo a durabilidade da estrutura.

Mesmo tendo atingido o estado endurecido, o concreto continua perdendo água para o ambiente, justamente pelo gradiente de umidade. No início, a água não está presa à estrutura dos produtos hidratados por ligações físico-químicas fortes. Assim, sua saída do concreto não provoca retração significativa. Porém, quando a maior parte desta água livre foi liberada, continuando a secagem, é possível notar que uma perda adicional de água resulta em uma retração considerável que, por sua vez pode causar fissuras e o empenamento das bordas (no caso de peças delgadas). Esta retração é denominada de retração por secagem.

O empenamento ocorre quando a placa sofre distorção das bordas e cantos para cima, gerado pelo gradiente de umidade e/ou temperatura entre as faces superior e inferior da placa. O empenamento das bordas está diretamente relacionado com o fenômeno da retração do concreto. O empenamento excessivo pode conduzir à perda de aderência de reves-

timentos, fissuras estruturais devido à perda de contato da placa com a sub-base, piora do nivelamento do piso e mau funcionamento das juntas.

Diversos fatores podem levar ao aumento da retração por secagem. Dentre esses fatores, podem ser citados: dosagem, geometria da estrutura e condições climáticas.

Dos fatores relacionados aos materiais que estão na composição do concreto e sua dosagem, o tipo, a granulometria e a dimensão máxima do agregado, a relação água/cimento e o emprego de adições minerais e aditivos químicos são variáveis importantes que afetam a retração do concreto, principalmente a retração por secagem. Agregados com maior módulo de deformação conduzem a um menor grau de retração. Quanto menor a quantidade de água de amassamento e o uso de agregados com quantidade aceitável de material pulverulento. Uma distribuição granulométrica contínua também auxilia na redução da retração do concreto quando comparada com uma combinação de agregados miúdos e graúdos inadequada.

No caso de peças com elevada área de superfície exposta em relação ao volume total da mesma, a evaporação de água para o ambiente terá a tendência de ocorrer mais rapidamente e provavelmente em maior quantidade.

As restrições à variação volumétrica podem causar fissuras durante o processo de retração. A armadura e os agregados graúdos podem servir de elementos de restrição causando atrito entre a pasta e esses. Tais restrições geram tensões de tração no concreto em uma fase em que ele ainda não possui resistência mecânica suficiente para absorvê-las, gerando fissuras. Estas podem inicialmente causar um comprometimento estético e, em um prazo maior, pode até comprometer a durabilidade da peça.

Os vazios presentes no concreto, principalmente aqueles presentes na pasta, exercem grande influência sobre as propriedades do material. Esses vazios possuem diferentes tamanhos e estão espalhados por toda a estrutura. Na seqüência é realizada uma abordagem sobre cada um deles.

Espaço interlamelar no C-S-H – Correspondem cerca de 28% do volume da estrutura do C-S-H e possuem tamanhos da ordem de 0,5 a 2,5 nm, segundo Mehta e Monteiro (1994). De acordo com diversos autores, estes vazios exercem pequena influência à resistência e permeabilidade de pastas e concretos. No entanto, a remoção da água retida nestes espaços pode contribuir para a retração por secagem e fluência.

Vazios capilares - São os espaços entre os componentes sólidos da pasta (produtos hidratados e anidros). Para pastas com baixa relação

água/cimento e bem hidratadas seu tamanho pode variar entre 10 e 50 nm. Já em pastas recentes e de relação água/cimento elevada essas dimensões podem chegar a 5 μm . Assim, o volume e tamanho destes poros variam com o tempo, sendo também função da distância inicial entre os grãos de cimento, ou seja, da relação água/cimento. O tamanho de 50 nm tem sido sugerido como o limite entre os poros que afetam a resistência e a permeabilidade (macroporos) e os poros que influenciam primordialmente a retração por secagem e fluência (microporos) (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Ar incorporado – De formato geralmente esférico sua origem mais comum é a incorporação intencional de ar ou o aprisionamento durante o processo de mistura. Os primeiros possuem tamanhos entre 50.000 e 200.000 nm e os segundos chegando a cerca de 3 mm. Assim, ambos são maiores que os vazios capilares, podendo afetar principalmente a resistência e a permeabilidade (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Influenciado por diversos parâmetros, o fenômeno da retração ocorre, sendo que geralmente há vários destes fatores atuando concomitantemente, dificultando, conseqüentemente, a avaliação de cada um separadamente. De modo geral, tudo o que afetar a quantidade e a qualidade da pasta afetará a retração de concretos e argamassas, pois a mesma ocorre essencialmente na pasta.

A retração cresce com o aumento da relação água/cimento, porém não de maneira exata (Taylor, 1990). Neville (1997), faz considerações parecidas, apontando que, para relações água/cimento entre 0,2 e 0,6, há uma relação diretamente proporcional desta com a retração da pasta de cimento. Para valores superiores a 0,6 pode haver perda de água sem retração. Esta influência direta da relação água/cimento na retração é esperada, uma vez que, aumentando a relação água/cimento, aumenta-se a quantidade de pasta e também a quantidade de água evaporável para um mesmo grau de hidratação. Segundo Neville (1997), o aumento da relação água/cimento também aumenta a velocidade de deslocamento da água até a superfície do concreto.

Por outro lado, se mantida constante a relação a/c, a retração aumentará com um incremento no consumo de cimento, pois se aumenta do volume de pasta. A retração para concretos com relações a/c mais elevadas é superior, sendo também mais suscetível a variações no consumo de cimento.

Segundo Rols *et al.* (1999), a retração final de um concreto auto-nivelante (730 a 770×10^{-6} m/m) é cerca de 50% maior que de um concreto comum (450 a 500×10^{-6} m/m), pois o concreto auto-nivelante contém um maior teor de pasta.

Quando a taxa de evaporação de água for significativamente maior que a taxa de exsudação, podem se desenvolver tensões para a formação de poros capilares na superfície que podem exceder a tensão de resistência do concreto, principalmente nas primeiras idades (SIVAKUMAR e SANTHANAM, 2007).

Apesar de parte da água perdida ser mantida na exsudação, se a perda de umidade na superfície exceder $0,5\text{kg/m}^2/\text{h}$, pressões capilares negativas são formadas causando tensões internas de compressão (BANTHIA e GUPTA, 2006).

A retração por secagem ocorre devido à perda de água da pasta de cimento já no estado endurecido, sendo que esta é ligada, principalmente, à remoção da água adsorvida. Ainda, de acordo com Neville (1997), a redução de volume sofrida pelo concreto não é igual ao volume da umidade perdida, sendo que a água livre retirada no início tem pouca influência sobre a retração.

Neville, 1997, salienta que a perda de umidade ocorre apenas na superfície de maneira que forma-se um gradiente de umidade entre o interior da peça e a superfície, passando assim a sofrer retração diferencial. Assim, quando a secagem do material ocorre de modo assimétrico, há a possibilidade da ocorrência de empenamento, sendo que a intensidade da retração é dependente da forma e do volume da peça, caracterizada por uma relação área/volume, reforçando que o fenômeno de retração não depende apenas do concreto, mas, inclusive das dimensões da peça.

A confecção de placas de concreto auto-adensável tem seu desenvolvimento limitado devido à ocorrência do empenamento das extremidades das placas. Eles explicam que esse fenômeno deve-se pelo gradiente de umidade que ocorre conforme a espessura das mesmas. O empenamento dá-se pela retração diferencial entre as partes inferior e superior da peça, sendo a causa considerada, apenas a retração por secagem, como demonstrado na Figura 7 (PÉRA e AMBRÓISE, 2004).

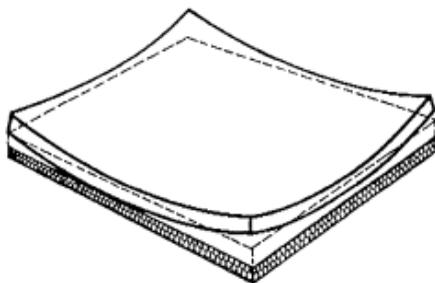


Figura 7 – Empenamento (*curling*) de placa (PÉRA e AMBRÓISE, 2004)

Segundo Péra e Ambróise, 2004, esse fenômeno aumenta quando a espessura da placa e o diâmetro máximo do agregado graúdo diminuem (além de outros fatores como relação a/c e teor de pasta). A equação 9 demonstra o modelo pelo qual pode ser calculado o deslocamento das placas.

$$y = 2,6 \left[\frac{(1 - \eta)^3}{D} \right]^{1/2}$$

Equação 1

onde:

- y é o deslocamento vertical (cm);
- η é a umidade relativa;
- D é o diâmetro máximo dos agregados (cm).

É importante destacar que essas variáveis não afetaram o comportamento de retração do concreto, no ensaio desenvolvido neste estudo, uma vez que no mesmo não haverá diferença de composição granulométrica entre os agregados, não variando assim o diâmetro máximo ou o módulo de finura.

5.7 Absorção capilar

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), a água, sendo um agente primário, tem capacidade suficiente para criar e degradar materiais naturais e artificiais, como o concreto, sendo esse também um fator central por trás da maioria dos problemas de durabilidade das matrizes cimentícias, já que a água é agente de transporte para íons agressivos.

Segundo Santos *et al.* (2006), pelo fato da água ser um constituinte presente no concreto já no primeiro instante de sua formulação, ocorre transferência de umidade com a formação dos géis de C-S-H e com a evaporação da água, formando os poros capilares. O movimento da água

no interior do concreto continua ao longo de sua vida útil em função de suas condições internas e das condições externas a que está submetido.

Os mecanismos de fixação e transporte de umidade em materiais de construção atuam diferentemente na fase vapor e na fase líquida. Segundo Santos *et al.*, 2006, partindo do ponto de vista físico, pode-se considerar que existem três mecanismos fundamentais de fixação de umidade: adsorção, condensação e capilaridade.

A água adsorvida é composta de camadas de moléculas que condensam sobre a superfície dos poros. Sua quantidade no equilíbrio é dependente da superfície específica do meio poroso, da afinidade entre o vapor de água e a matriz sólida e as condições higrotérmicas predominantes. O fenômeno de adsorção é regido pelas forças de *Van der Waals*.

O fenômeno de absorção capilar é o processo físico através do qual o material cimentício retém água nos poros capilares, ocorrendo na fase líquida da água.

A condensação é o fenômeno de adsorção de várias camadas de moléculas nas paredes dos poros. A sua quantidade é dependente da superfície específica do meio poroso, da afinidade entre o vapor de água e o sólido e das condições higrotérmicas predominantes (SANTOS, 2006).

Wirquin, 2000 *apud* Levy e Helene, 2004, demonstraram, em um estudo, que o processo de absorção de água nos concretos com agregados naturais e nos concretos com AGR é similar e obedecem as mesmas regras.

De acordo com Kasemchaisiri e Tangtermsirikul (2007), diversos trabalhos científicos têm reportado que concretos com o uso do AGR apresentam baixa trabalhabilidade devido à alta demanda de água para sua estrutura porosa.

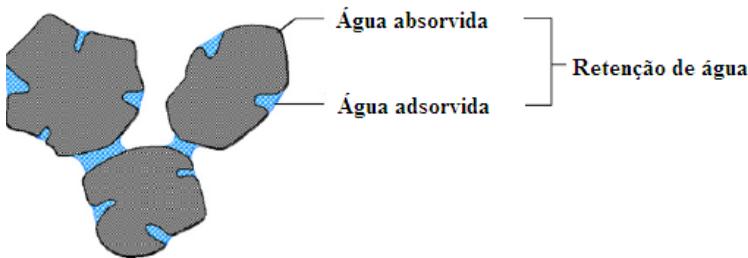


Figura 8 – composição da retenção de água de agregados porosos (adaptado de Kasemchaisiri e Tangtermsirikul, 2007)

Outra questão importante em relação às propriedades hidrodinâmicas de materiais porosos é a propriedade de retenção de água dos agregados.

De acordo com Olorunsogo e Padayachee (2002), em estudo realizado, utilizando agregado reciclado, com o aumento do teor de substituição de AGR de 0% para 100%, houve um aumento na sorptividade à água, aos 3 dias de idade, de $21,21 \text{ mm/h}^{1/2}$ para $31,24 \text{ mm/h}^{1/2}$. No mesmo trabalho, misturas curadas a 7, 28 e 56 dias demonstraram um incremento na sorptividade, com relação a 0% de substituição, de 43,6%, 38,5% e 28,8%, respectivamente.

Segundo Levy e Helene, 2004, a absorção de água em concretos aumentou proporcionalmente ao acréscimo na substituição de agregados naturais por agregados reciclados. Esse resultado já era esperado pelos autores, uma vez que os ensaios em material granular apresentaram uma quantidade de água absorvida entre 6 e 10 vezes maior.

Entretanto, para Duailibe (2008), materiais com características de angulosidade e rugosidade elevadas tendem a reduzir a conectividade dos poros dos materiais cimentícios produzidos dificultando a penetração da água e diminuindo a quantidade de água absorvida.

Porém, o comportamento esperado acima mencionado, não foi observado para os concretos com teor de substituição de 20% da fração graúda para o AGR. Sendo que esse grupo obteve uma absorção inferior ao concreto de referência. Esse comportamento excepcional também foi verificado para o volume total de poros. Esse comportamento pode ser explicado devido às mudanças na composição granulométrica do agregado (fator de compactação).

De acordo com Bazuco (1999), as partículas de agregado reciclado tem a tendência de apresentar uma superfície mais porosa e rugosa. Essas características foram atribuídas à quantidade de argamassa aderida nos grãos de AGR.

6. CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO

O cimento Portland é composto pelo clínquer, que se caracteriza como um material sinterizado e peletizado resultante da calcinação a aproximadamente 1450°C de uma mistura de calcário e argila e, eventuais corretivos de natureza silicosa, aluminosa ou ferrífera.

As primeiras fases abundantes como calcita (CaCO_3), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), quartzo (SiO_2), pagliocásio ($(\text{NaAlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$), entre outras, são os principais constituintes das rochas calcárias e argilosas.

Essas fases são transformadas em minerais metaestáveis com campo de estabilidade com temperaturas superiores a 1000°C , represen-

tados pelos silicatos e aluminatos cálcicos e ferroaluminatos cálcicos. Em menor quantidade há a presença de CaO (cal livre), periclásio (MgO) e sulfatos alcalinos.

Os principais compostos do clínquer do cimento anidro são:

- $C_3S - 3 CaO \cdot SiO_2$ (silicato tricálcico): principal responsável pelas propriedades hidráulicas, tendo rápida reação com a água;
- $C_2S - 2 CaO \cdot SiO_2$ (silicato dicálcico): reage lentamente com a água, apresentando pouca resistência mecânica inicial que tende a aumentar significativamente com o decorrer do processo de hidratação;
- $C_3A - 3 CaO \cdot Al_2O_3$ (aluminato tricálcico): reage instantaneamente com a água (elevada liberação de calor de hidratação), sendo, por isso, necessária a adição de sulfato de cálcio para geração de produtos insolúveis em água;
- $C_4AF - 4 CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ (ferro aluminato tetracálcico): tem reação rápida mas não instantânea. Tem baixa resistência e o óxido de ferro age como fundente e fixa a alumina que melhora a resistência ao ataque das águas sulfatadas.
- **Outros** – óxido de cálcio livre (CaO), periclásio (MgO), álcalis (Na_2O , K_2O).

O mecanismo de hidratação do cimento é constituído por um processo de dissolução-precipitação que ocorre nas primeiras fases, seguido de um processo topoquímico. O enrijecimento da pasta é caracterizado pela hidratação dos aluminatos e a evolução da resistência pelos silicatos (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Todos os compostos presentes no clínquer do cimento Portland são anidros, mas quando entram em contato com a água eles são atacados ou decompostos, formando produtos hidratados. São formadas soluções supersaturadas e instáveis temporariamente, mas esses se depositam gradualmente sobre os sólidos em excesso e tendem a entrar em grau de equilíbrio com os compostos hidratados produzidos. Dois mecanismos de hidratação do cimento podem ser visualizados. No primeiro, o mecanismo através da solução, os compostos do cimento podem se dissolver para produzir íons em solução, e esses íons depois se combinar para precipitar os produtos hidratados (LEA, 1970).

Depois do contato com a água, as partículas de cimento encontram-se dispersas, tanto em flocos, quanto individualizadas. O espaçamento entre elas dependerá da relação água/cimento. Em torno de 10 minutos após o contato com a água, agulhas de AFt começam a se formar. As dimensões destas agulhas compreendem, geralmente, um comprimento em torno de 250nm e espessura de 100nm (TAYLOR, 1990).

Durante a secagem, essa camada se rompe e os cristais de AFt retrocedem para a superfície dos grãos de cimento. Os produtos iniciais diferem na morfologia e na composição dos anéis hexagonais de C-S-H que são observados em pastas de C_3S .

Em torno de 3 horas após o contato com a água, inicia-se um período caracterizado pelo aumento abrupto da liberação de calor de hidratação e que é caracterizado pela rápida formação de C-S-H e CH. O término dessa fase é em torno de 24 horas após o início da mistura, compreendendo algo em torno de 30% das reações do cimento (TAYLOR, 1990).

O CH forma cristais maciços no espaço originalmente preenchido por água. Pontos de nucleação aparecem por ser relativamente em pequeno número, e os cristais crescentes podem envolver alguns dos grãos de cimento menores. Todos esses recursos do processo são similares quando observados em pastas de C_3S .

O C-S-H forma uma camada ao redor dos grãos de cimento a qual envolve e talvez nucleie as agulhas de AFt. Uma quantidade significativa é formada em 3h e os grãos são completamente cobertos em 4h.

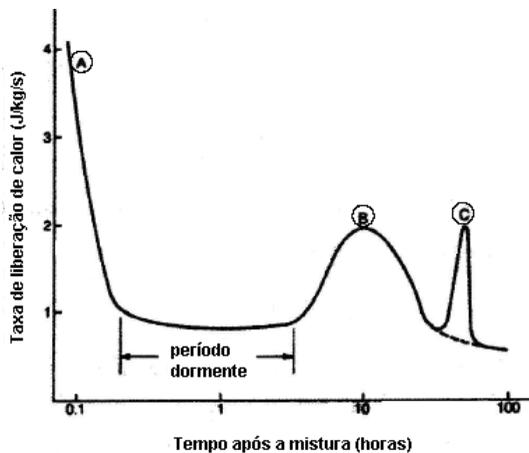


Figura 9 – Gráfico da taxa de liberação de calor/tempo

A Figura 9 demonstra a cinética de liberação de calor de hidratação do cimento Portland. No gráfico é possível visualizar a alta taxa de calor liberado logo no início das reações, o período de indução, a curva indicando o início e o fim de pega e o pico de formação de monossulfatos.

A reação do C_3A em contato com a água é imediata e por isso há a necessidade da adição de sulfato de cálcio para retardar a reação. A hidratação dos aluminatos na presença de sulfato resulta na etringita ($C_6AS_3H_{32}$) que assume forma acicular e, em monossulfatos hidratados com a forma de placas hexagonais delgadas.

Nos primeiros minutos, com a reação do C_3A com o sulfato de cálcio, em solução, forma-se um gel amorfo rico em aluminatos na superfície do grão, formando pequenas agulhas de etringita (AF_t).

A formação das agulhas de etringita começa minutos após o início da hidratação, sendo responsáveis pelo fenômeno da pega e desenvolvimento da resistência inicial. Após alguns dias, dependendo da proporção alumina-sulfato do cimento Portland, a etringita pode tornar-se instável e decompor-se para formar o monossulfato hidratado, que é uma forma mais estável (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

O processo de hidratação do C_4AF , pelo fato deste designar genericamente uma série de compostos, é de difícil caracterização e tem pouca influência na pasta endurecida. Segundo Mehta e Monteiro (1994), seus compostos resultantes são estruturalmente similares aos formados a partir do C_3A .

Ao início da mistura, as reações de hidratação acontecem de maneira rápida. Durante esse processo é formada uma fina camada de C-S-H sobre a superfície dos grãos de cimento. Desta maneira, essa fina camada funciona como uma barreira de difusão para a água, causando retardo nas reações de hidratação (JOLICOEUR e SIMARD, 1998).

7. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa teve por objetivo contribuir com o estudo da incorporação do agregado reciclado de resíduo de construção e demolição em concreto auto-adensável apoiando-se nas propriedades físicas do material.

As principais etapas foram: a caracterização das matérias-primas, a equivalência das granulometrias dos agregados miúdos, estudo do material granular (demanda de água), estudo em pasta, estudo em argamassa e análise das propriedades em concreto auto-adensável.

A proposta metodológica para a realização desta pesquisa encontra-se detalhada em forma de fluxograma conforme apresentado na Figura 10.

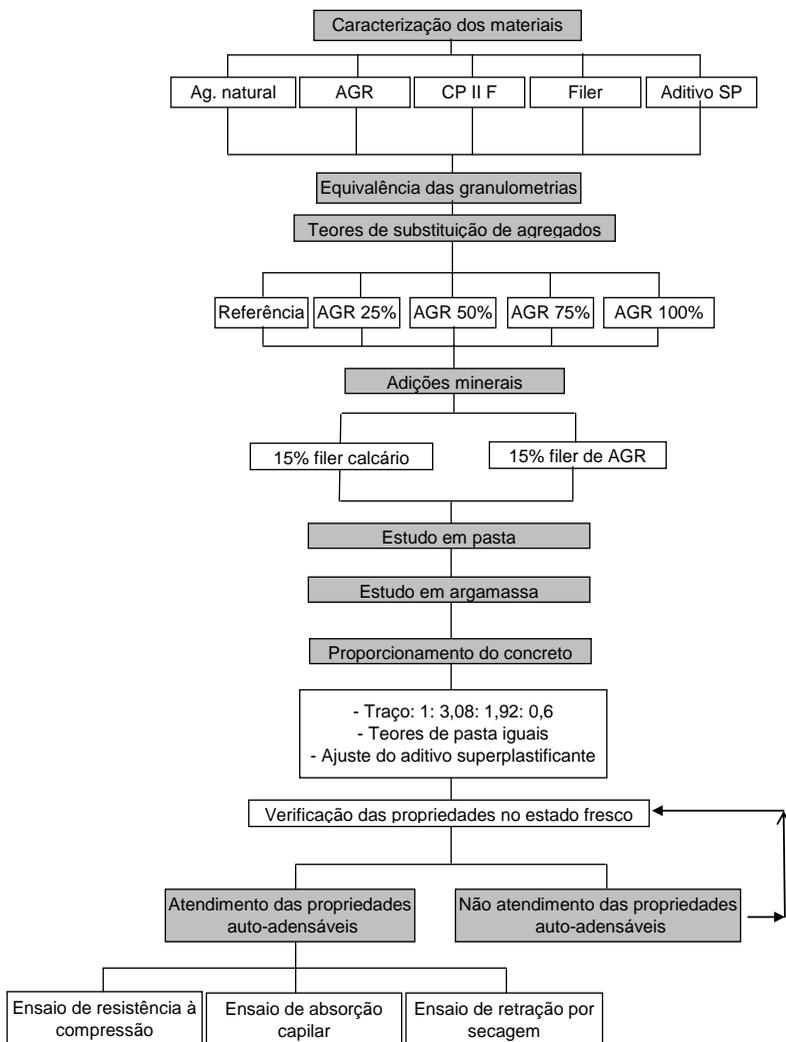


Figura 10 – Fluxograma de atividades da metodologia proposta

A Tabela 4 demonstra uma síntese dos ensaios propostos para cada etapa durante a realização do trabalho, assim como o objetivo de cada um.

Tabela 4 – Descrição das etapas, objetivos e ensaios

Etapa	Objetivo	Ensaio
Caracterização dos materiais	Identificar as propriedades físicas e químicas das matérias-primas a serem utilizadas.	Granulometria (peneiramento, sedimentação e <i>laser</i>).
		Massa específica aparente.
		Superfície específica (<i>Blaine</i>).
		Massa unitária no estado solto.
		Teor de material pulverulento.
		Espectrometria por fluorescência de raios-x.
		Perda de massa ao fogo.
Composição dos agregados	Fazer a equivalência da granulometria da areia natural para com a do AGR.	Massa específica, granulometria.
Estudo em pasta	Verificar a compatibilidade entre cimento, fillers e aditivo.	Ensaio de saturação de aditivo (cone de <i>Marsh</i>) e calorimetria semi-adiabática.
Estudo em argamassa	Ajustar o teor de aditivo e verificar o escoamento e segregação da argamassa.	Ensaio de escoamento (mini <i>slump-flow</i>), massa específica e resistência à compressão.
Propriedades do concreto no estado fresco	Avaliar se as propriedades dos concretos produzidos enquadram nos parâmetros pré-determinados de trabalhabilidade para concretos auto-nivelantes.	Ensaio de espalhamento (<i>slump-flow</i>).
		Ensaio de segregação (ROLS et al., 1999).
Propriedades do concreto no estado endurecido	Avaliar se os concretos com propriedades auto-nivelantes possuem diferença significativa de resistência à compressão conforme a substituição de cimento por finos residuais.	Ensaio de resistência à compressão.
		Determinação da absorção de água por capilaridade.
Retração por secagem	Analisar através do método proposto por Péra & Ambroise (2003) o empenamento das extremidades (<i>curling</i>) de placas delgadas de concreto auto-nivelante devido à retração por secagem.	Ensaio de retração por secagem (PÉRA & AMBROISE, 2003).

7.1 Materiais

Os materiais empregados no presente trabalho são descritos resumidamente nos subitens abaixo.

7.1.1 Aglomerante

O aglomerante utilizado no trabalho foi o CP II F – 32 (cimento Portland composto com fíler) da Itambé Cimentos. A NBR 11578/91 estabelece que este cimento deva conter entre 6 a 10% de material carbonático, sendo o restante composto de clínquer. Por não conter pozolana, o CP II F não influenciará em possíveis reações pozolânicas do A-GR. Algumas propriedades físicas e seus limites são apresentados na Tabela 5, e as propriedades químicas do CP II F – 32 são apresentadas na Tabela 6, a partir de relatório de ensaios do fabricante.

Tabela 5 – Propriedades físicas do CP II F – 32

ENSAIOS FÍSICOS fabricante	Especificações ABNT		
Blaine (cm ² /g)	3284	≥ 2600	NBR NM 76
Tempo de início de pega (h:min)	02:44	≥ 01:00	NBR NM 65
Tempo de fim de pega (h:min)	03:30	≤ 10:00	NBR NM 65
Finura na peneira # 200 (%)	3,23	≤ 12	NBR 11579
Finura na peneira # 325 (%)	15,27	-	NBR 9202
Expansibilidade a quente (mm)	0,64	≤ 5	NBR 11582
Consistência normal (%)	25,63	-	NBR NM 43
Resistência à compressão 1 dia (MPa)	15,8	-	NBR 7215
Resistência à compressão 3 dias (MPa)	26,9	≥ 10	NBR 7215
Resistência à compressão 7 dias (MPa)	32,9	≥ 20	NBR 7215
Resistência à compressão 28 dias (MPa)	40,4	≥ 32	NBR 7215

Fonte: http://www.cimentoitambe.com.br/?acao=sec&p=produtos/cp_ii_f_32

Tabela 6 – Propriedades químicas do CP II F – 32

Ensaio	Especificações ABNT	
	Limites	Normas
Perda ao fogo (%)	5,07	≤ 6,5 NM 18
Resíduo insolúvel (%)	1,27	≅ 2,5 NBR NM 15
Trióxido de enxofre - SO ₃ (%)	3,19	≤ 4 NBR 14656
Óxido de cálcio livre - CaO Livre (%)	1,43	- NBR NM 12
Óxido de magnésio - MgO (%)	4,76	≤ 6,5 NBR 14656
Óxido de alumínio - Al ₂ O ₃ (%)	4,21	- NBR 14656
Óxido de silício - SiO ₂ (%)	19,12	- NBR 14656
Óxido de ferro - Fe ₂ O ₃ (%)	2,59	- NBR 14656
Óxido de cálcio - CaO (%)	60,31	- NBR 14656
Equivalente alcalino (%)	0,56	- NBR 14656

Fonte: http://www.cimentoitambe.com.br/?acao=sec&p=produtos/cp_ii_f_32

Diversos estudos realizados com concreto auto-adensável foram conduzidos por seus pesquisadores, utilizando como aglomerante o cimento Portland comum. A escolha deste cimento deu-se pelo fato do mesmo não possuir adições minerais ativas, sendo constituído praticamente apenas de clínquer. O motivo de não utilizar como aglomerante, para esta pesquisa, o CP I – S é o fato de que no Brasil esse tipo de cimento dificilmente é comercializável, dificultando a sua obtenção em maiores quantidades. Outro fator levado em consideração na escolha é o teor de C₃A, o qual dever ser inferior a 10%, como recomendado pela EFNARC (*The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems*). Assim o Cimento Portland composto, CP II, pode ser o tipo de cimento mais utilizado, estando dentro das especificações da mesma.

7.1.2 Agregados

As argamassas e os concretos de referência foram confeccionados com uma areia natural de origem quartzosa, com dimensões entre 0,15 e 4,8 mm, como agregado miúdo. Como agregado graúdo, foi utilizada uma brita de origem granítica, disponível no mercado regional, com diâmetro máximo de 9,5 mm e caracterizada pela NBR 7211 como Brita 0. Como a intenção do estudo é a de analisar o empenamento de placas com apenas 3,0 cm de espessura, na confecção dos concretos foi utilizado como agregado graúdo, as partículas retidas nas peneiras 4,8 e 6,3 mm.

7.1.3 Agregado Reciclado de RCD

Como próprio intuito da pesquisa, o agregado reciclado de resíduo de construção e demolição foi utilizado como substituição parcial ou total ao agregado miúdo, e como fíler, em adição ao teor de finos.

O AGR usado é proveniente de uma usina de beneficiamento, situada na cidade de São Bernardo do Campo, estado de São Paulo. A Figura 11 apresenta um organograma detalhado do processo de produção, coleta e preparo do AGR, desde a usina até o laboratório. A escolha pelo AGR produzido na central de beneficiamento em questão foi devido à inexistência de usinas de reciclagem de resíduo de construção e demolição na região de Florianópolis e pelo fato de outros trabalhos desenvolvidos pelo grupo de pesquisa ValoRes terem utilizado o mesmo material.

No local, dois tipos de resíduos foram encontrados: o resíduo proveniente de construção e demolição e o resíduo produzido por empresas de serviço de concretagem. Em uma primeira análise visual, foi possível observar pouca presença de materiais cerâmicos nas pilhas de resíduos.

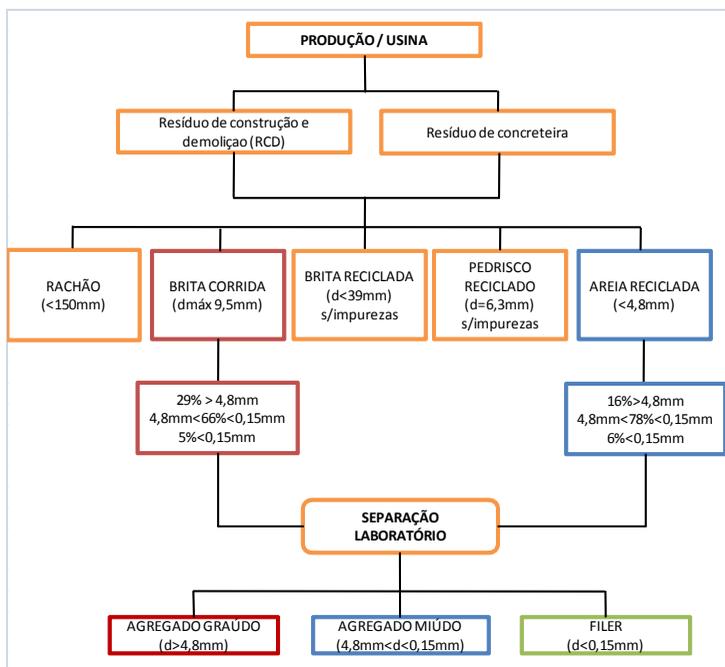


Figura 11 – Fluxograma de produção, coleta e preparação do AGR

O RCD disposto no local, assim como a maioria dos RCDs produzidos, é proveniente de operações de desmanche para reforma, demolições e restos de obras (material desperdiçado por mau uso ou reservação). O resíduo de concreteiras é fruto de restos de concretagem e de concretos e argamassas que não foram aceitos pelo cliente por não atendimento a alguma especificação ou por terem perdido a trabalhabilidade adequada para o uso em obra.

Dentre os diversos materiais produzidos na central, apenas dois foram coletados para a pesquisa. Os materiais coletados na usina são citados a seguir, assim como a sua separação em laboratório para utilização no estudo:

- Agregado reciclado miúdo: Material com dimensão máxima de 4,8mm possuindo grande quantidade de material fino (pó). Foi utilizado como agregado miúdo todo material localizado entre as peneiras 0,15 mm e 4,8 mm, sendo este separado em frações, porém respeitando a distribuição original proveniente da produção em usina. Todo material abaixo da peneira 0,15mm foi aproveitado como fíler.

- Agregado reciclado graúdo (brita corrida): pelo fato de apresentar uma granulometria contínua, contendo material graúdo, miúdo e inclusive fíler, o material foi seccionado em três partes: agregado graúdo ($9,5\text{mm} < d < 4,8\text{mm}$), agregado miúdo ($4,8 < d < 0,15\text{mm}$) e fíler de AGR ($d < 0,15\text{mm}$). Vale salientar, que o agregado reciclado graúdo não foi utilizado nesta pesquisa, aproveitando-se apenas as outras frações constituintes.

A Figura 12 demonstra o layout da usina de reciclagem. A unidade de produção é dotada de um britador primário e um britador secundário, sendo que do primeiro, além do material encaminhado para o segundo, ainda é gerado um resíduo que volta a ser britado, fazendo parte dos produtos finais. Foi notado também, na ocasião da coleta, que dos resíduos gerais dispostos no local, a maior parte era composto de materiais cimentícios. As empresas que encaminhavam à central os seus resíduos eram obrigadas a realizar uma triagem do material para que estes pudessem ser destinados à usina. Materiais cerâmicos em excesso, gesso e qualquer outro material que difira demasiadamente de concretos e argamassas, não eram aceitos pela usina.

Apesar disto, pequenas quantidades de material cerâmico foram encontradas nas pilhas produzidas. Entretanto, não foi realizada separação entre a fase cerâmica e a fase cimentícia, uma vez que não se pretendia descaracterizar o material produzido no local.

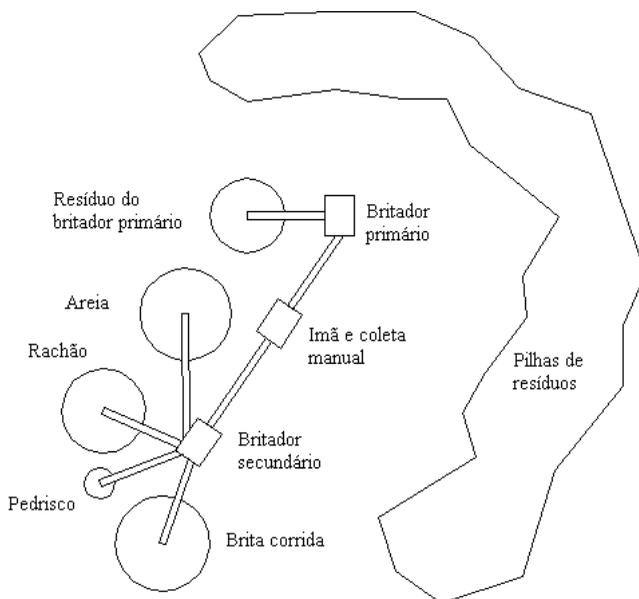


Figura 12 – layout da produção na usina de reciclagem

7.1.4 Aditivos químicos

A princípio, o aditivo químico utilizado foi um de efeito superplastificante (reduzidor de água) à base de éter policarboxilato, comercialmente identificado como Glenium SP fabricado pela empresa BASF *construction chemical*. A adição do material foi realizada em percentual à massa de cimento.

No decorrer da pesquisa foi utilizado outro aditivo com maior teor de sólidos. Denominado como Tecflow 7000, o referido aditivo, produzido pela Rheoset, foi utilizado na dosagem final dos concretos. Na Tabela 7 são apresentadas as características dos dois aditivos.

Tabela 7 – Propriedades dos aditivos superplastificantes

Propriedade	Glenium SP	Tecflow 7000
Principal componente químico	Éter policarboxílico	Éter policarboxílico
Densidade (kg/L)	1,02 a 1,06 g/cm ³	1,075 a 1,115 g/cm ³
pH	5 a 7	5 a 7
Estado físico	Líquido	Líquido
Teor de sólidos médio (%)	17 - 19	38 - 42
Dosagem recomendada pelo fabricante (% m. c.)	0,2 - 0,8	0,8 - 1,2

7.1.5 Adições minerais

As adições minerais utilizadas foram o fíler calcário e o fíler de AGR. O fíler calcário foi lavado na peneira 0,15 mm, o produto passante foi seco e utilizado nas misturas. O fíler de AGR é o resultado do material passante na peneira 0,15 mm a partir do agregado reciclado peneirado. A adição se deu, em massa, em um percentual de 15% em comparação com a massa total de cimento. O objetivo da adição foi comparar a influência de cada uma sobre as propriedades do concreto auto-adensável no estado fresco (principalmente a fluidez e a exsudação), na resistência à compressão e na retração de placas de concreto.

Inicialmente, os teores de adição foram fixados em 25% em relação à massa de cimento e posteriormente reduzidos para 15% no estudo em argamassa e mantidos nos concretos.

7.1.6 Agente promotor de viscosidade

Nas amostras onde a utilização de fíler foi insuficiente para promover uma viscosidade adequada às misturas, fornecendo a estabilidade necessária para evitar-se a segregação e exsudação, foi utilizado um agente promotor de viscosidade, ou também denominado, agente modificador de viscosidade (AMV). O produto utilizado para tal tarefa foi o emulsificante Methocel, material este a base de metilcelulose. Este agente emulsificante foi adicionado para aumentar a sua viscosidade das misturas, tornando-as razoavelmente estáveis e homogêneas. A sua incorporação foi realizada através de um percentual baseado na massa total de material seco no concreto.

7.2 Métodos

O método de trabalho escolhido não priorizou propriamente um sistema de dosagem de concreto auto-adensável, mas sim a análise do comportamento dos materiais sob determinadas condições e fatores isolados sistematicamente.

Inicialmente foi realizado um estudo detalhado das matérias-primas utilizadas, buscando o maior número de informações na caracterização dos materiais. Desde a análise granulométrica dos agregados, até a verificação das propriedades químicas dos materiais, buscando um perfil detalhado que mais adiante pudesse fornecer respostas ao comportamento demonstrado nas argamassas e nos concretos.

Concomitantemente à caracterização das matérias-primas, foi realizada a equivalência das granulometrias dos agregados miúdos (natural e reciclado) utilizados para a confecção tanto das argamassas quanto dos concretos. Essa equivalência foi executada utilizando o peneiramento e a

separação dos agregados para cada intervalo de abertura de peneiras. Para a composição dos traços, a areia natural teve a granulometria igualada a do AGR, com o objetivo de minimizar os efeitos dessa variável sobre o comportamento dos materiais cimentícios. Juntamente, foi realizado um estudo no material granular (agregados miúdos e filers) com o objetivo de verificar a demanda de água de cada material.

Em paralelo à equivalência dos agregados, foi realizado um estudo em pasta de cimento através do ensaio de saturação de aditivo através do método do cone de *Marsh*. Este ensaio visou analisar o teor máximo de aditivo utilizado para alcançar uma maior fluidez da pasta, além de verificar a manutenção dessa fluidez através do tempo, e o comportamento do aditivo com a presença de fíler calcário e fíler de AGR.

Além disso, ainda na análise experimental em pastas, foi realizado um estudo do desenvolvimento da liberação de calor de hidratação do cimento em pastas contendo diferentes teores de aditivo superplastificante, pelo método de calorimetria, em um calorímetro semi-adiabático.

Um estudo em argamassas foi realizado para verificar as propriedades no estado fresco e endurecido destas que posteriormente fizeram parte do concreto alvo do estudo. As propriedades no estado fresco foram verificadas por meio da moldagem de argamassas e, em seqüência, do ensaio de fluidez em uma mesa de abatimento, verificando-se o diâmetro da abertura do material e determinando os teores de fíler e de aditivo necessários para o alcance das propriedades auto-adensáveis. Ainda foram verificadas a massa específica das argamassas e a sua resistência à compressão aos 28 dias de idade.

As amostras de argamassa foram identificadas por categorias de acordo com o teor de adição de fíler, teor de substituição de agregado natural por AGR e pelo tipo de aditivo utilizado, conforme descrito abaixo:

- F1 + (teor de AGR): Amostra com adição de 25% de fíler calcário e utilização de aditivo superplastificante a base de éter policarboxílico (Glenium SP);
- F2 + (teor de AGR): Amostra com adição de 25% de fíler de AGR e utilização de aditivo superplastificante a base de éter policarboxílico (Glenium SP);
- F3 + (teor de AGR) G: Amostra com adição de 15% de fíler calcário e utilização de aditivo superplastificante a base de éter policarboxílico (Glenium SP);

- F4 + (teor de AGR) G: Amostra com adição de 15% de fíler de AGR e utilização de aditivo superplastificante a base de éter policarboxílico (Glenium SP);
- F3 + (teor de AGR) T: Amostra com adição de 15% de fíler calcário e utilização de aditivo superplastificante a base de éter policarboxílico (Tecflow 7000);
- F4 + (teor de AGR) T: Amostra com adição de 15% de fíler de AGR e utilização de aditivo superplastificante a base de éter policarboxílico (Tecflow 7000).

Para a finalidade desta pesquisa, foram realizados dois traços de referência (sem utilização de agregados reciclados) e outros traços com os percentuais de substituição de agregado natural por AGR de 25%, 50%, 75% e 100%, sendo dois para cada teor de substituição de agregado miúdo, modificando o tipo de fíler utilizado (fíler calcário ou fíler de AGR).

O traço de referência utilizado para as misturas de concreto foi de 1: 3,08: 1,92: 0,6, correspondente ao cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e relação água/cimento, respectivamente. Para as argamassas, o mesmo traço foi mantido, excluindo-se obviamente apenas o agregado graúdo. Os teores de substituição para todos os ensaios envolvendo argamassas e concretos são demonstrados na Tabela 8.

Tabela 8 – teores de substituição de materiais nos concretos e argamassas

Mistura	% adição mineral	% agregados		Código
		AGR	Areia natural	
1	15% Filer calcário 0% Filer de AGR	0	100	F3 REF
2	0% Filer calcário 15% Filer de AGR	0	100	F4 REF
3	15% Filer calcário 0% Filer de AGR	25	75	F3 AGR25
4	0% Filer calcário 15% Filer de AGR	25	75	F4 AGR25
5	15% Filer calcário 0% Filer de AGR	50	50	F3 AGR50
6	0% Filer calcário 15% Filer de AGR	50	50	F4 AGR50
7	15% Filer calcário 0% Filer de AGR	75	25	F3 AGR75
8	0% Filer calcário 15% Filer de AGR	75	25	F4 AGR75
9	15% Filer calcário 0% Filer de AGR	100	0	F3 AGR100
10	0% Filer calcário 15% Filer de AGR	100	0	F4 AGR100

A metodologia de substituição da areia natural pelo AGR foi realizada com relação ao volume absoluto dos materiais, assim como realizado em estudo dirigido por Kreuz *et al.* (2002) *apud* Andrade (2004), uma vez que, segundo os autores, quando há diferença significativa entre as massas específicas entre os agregados, haverá interferência na comparação dos resultados das misturas, devido à variação de volume de material. Para o processo de substituição será adotado o método utilizado por Andrade (2004), com algumas adaptações, como a troca do uso da massa unitária pelo uso da massa específica aparente no cálculo de substituição por volume, conforme demonstrado nas equações 2 e 3.

$$m_{agr} = m_{areia} \times \frac{\rho_{agr}}{\rho_{areia}} \times \% \text{ substituição} \quad \text{Equação 2}$$

$$m_{areia} = (1 - \% \text{ substituição}) \cdot m_{areial} \quad \text{Equação 3}$$

Onde,

m_{agr} : massa de AGR;

$\% \text{Substituição}$: teor de substituição de areia por AGR;

ρ_{agr} : massa específica aparente do AGR;

ρ_{areia} : massa específica aparente da areia natural;

m_{areia} : massa de areia natural antes da substituição;

m_{areia1} : massa de areia natural remanescente após a substituição

As propriedades do concreto no estado fresco foram controladas através dos ensaios de espalhamento (*slump flow*) e o ensaio de segregação (ROLS, *et al.*, 1999). A Tabela 9 apresenta alguns limites possíveis a serem adotados para aceitação das propriedades estudadas.

Tabela 9 – Critérios de conformidade (adaptado de EFNARC, 2005)

Propriedade	Critério
Slump Flow Classe SF1	$\geq 520\text{mm}, \leq 700\text{mm}$
Slump Flow Classe SF2	$\geq 640\text{mm}, \leq 800\text{mm}$
Slump Flow Classe SF3	$\geq 740\text{mm}, \leq 900\text{mm}$
Slump Flow - Valor alvo	$\pm 80\text{mm}$ de valor alvo
Funil-V Classe VF1	$\leq 10\text{s}$
Funil-V Classe VF2	$\geq 7\text{s}, \leq 27\text{s}$
Funil-V Valor alvo	$\pm 3\text{s}$
Resistência à segregação Classe SR1	≤ 23
Resistência à segregação Classe SR2	≤ 18

Tabela 10 – Quantidade de materiais utilizados por m^3 e os limites recomendados

	Utilizado	Limites
Cf (kg/m^3)	404,87	400 a 600
a/f	0,60	0,8 a 1,10
% a.m.	41,71	35 a 50%
% a.g.	25,32	25 a 35%

Os concretos, já com a incorporação de resíduo, que obedeceram aos limites estabelecidos para as propriedades no estado fresco, tiveram corpos-de-prova moldados e curados em câmara úmida para a realização dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias. Os concretos que não se adequaram aos limites adotados para os ensaios no estado fresco tiveram os teores de aditivo superplastificante reajustados até que alcançassem os parâmetros desejados.

A resistência à compressão foi utilizada como comparação entre os traços de referência e as demais composições para verificar se havia perda ou ganho da mesma, conforme a incorporação dos resíduos.

Ainda foi moldado um exemplar de cada amostra de concreto para realização do ensaio de absorção capilar de acordo com a NBR

9779/1995. As amostras foram mantidas vedadas do contato com o ar, com o intuito de se evitar a carbonatação das mesmas e foram ensaiadas na idade de 28 dias.

Posteriormente, uma análise da retração por secagem foi realizada para avaliar os efeitos da substituição do agregado natural pelo agregado reciclado, no empenamento das extremidades (*curling*) em placas delgadas de concreto auto-adensável, seguindo a metodologia proposta por Péra e Ambróise (2004). As leituras foram iniciadas 3h após a moldagem das placas, com estas já no estado endurecido. As leituras foram realizadas, por um *Data Logger*, a cada quatro minutos.

Para esse ensaio mantiveram-se constantes, a umidade relativa e a temperatura do ambiente, o teor de pasta, a distribuição granulométrica dos agregados e a relação água/cimento. As variáveis foram, o percentual de substituição de cimento por fíler calcário e por fíler de AGR, o teor de substituição do agregado natural por AGR e o percentual de aditivo superplastificante.

Os resultados obtidos durante os ensaios realizados forneceram os parâmetros necessários para determinar quais os resíduos obtiveram maior habilidade de incorporação no concreto auto-adensável e quais propriedades são afetadas com a sua incorporação.

8. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Os ensaios de caracterização das matérias-primas foram desenvolvidos conforme as Normas citadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Ensaio de caracterização das matérias-primas

Ensaio de caracterização	Norma
Agregados - Determinação da composição granulométrica	NBR NM 248/2003
Agregado graúdo - Determinação da massa específica e massa aparente	NBR NM 53/1996
Agregados em estado solto - Determinação da massa unitária	NBR 7251/1982
Agregados - Determinação do teor de materiais pulverulentos	NBR 7219/1987
Análise química por fluorescência de raios-x	x x x
Agregado miúdo - Determinação da massa específica pelo método do picnômetro	x x x
Ensaio de absorção de água pelo picnômetro - condição saturada superfície seca	x x x
Ensaio de granulometria à <i>laser</i>	x x x
Imagens realizadas por microscopia óptica	x x x
Ensaio de perda ao fogo	x x x

Durante a caracterização, dois métodos foram utilizados para determinar a análise granulométrica. Um deles foi o usual método de peneiramento. Através desse método obteve-se a distribuição granulométrica.

trica dos materiais dentro de uma faixa das peneiras 9,5 a 0,15mm. O outro foi o ensaio de granulometria à *laser*. Este visa obter uma leitura mais precisa da distribuição do tamanho dos grãos com diâmetro inferior a 0,15 mm, e assim analisar a possível influência destes através da inclusão como adição mineral. Em complementação aos ensaios de caracterização física, foram realizadas análises por microscopia óptica do material granular, além das massas específicas, a absorção e a massa unitária.

Ainda foi analisada a composição química do agregado reciclado e de ambos os filers através do método de fluorescência de raios-x. Também foi executado o ensaio de perda ao fogo dos mesmos materiais em uma mufla atingindo temperatura máxima de 900°C, a uma taxa de aquecimento de 10°C/min.

9. ENSAIOS EM MATERIAL GRANULAR

9.1 Ensaio de demanda de água em material granular

O ensaio teve o objetivo de verificar a demanda de água para as diferentes composições do material granular (agregado natural e agregado reciclado). No método proposto, diversas composições foram propostas e apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Composições e percentuais para ensaio de demanda de água

Composição	Agregado natural (%)	Agregado reciclado (%)
REF	100	0
AGR25	75	25
AGR50	50	50
AGR75	25	75
AGR100	0	100

As proporções utilizadas nas composições do material granular para a execução deste ensaio, foram as mesmas utilizadas na confecção dos concretos. Para cada composição foi separada uma massa de 500 g de material. Inicialmente, adicionou-se 150 g de água, buscando manter uma relação água/sólido de 0,3. O material era levado à argamassadeira e misturado em velocidade baixa durante 1 minuto. O misturador era desligado e então se raspava as laterais buscando homogeneizar o material. Ligava-se novamente a argamassadeira, em velocidade alta, por 2 minutos.

Após a mistura o material era colocado na mesa de abatimento (*flow table*), dentro de um molde de formato tronco-cônico com diâmetro superior de 80 mm, diâmetro inferior de 125 mm e altura de 65 mm,

onde eram adensados em três camadas de 15, 10 e 5 golpes, respectivamente. Ao desmoldar o material, eram aplicados 30 golpes na mesa de abatimento, sendo 1 golpe por segundo.

Eram tomadas duas medidas ortogonais, utilizando um paquímetro. Caso o diâmetro médio fosse $290 \text{ mm} \leq d \leq 310 \text{ mm}$, a quantidade de água utilizada era considerada ideal para aquela mistura. Caso a abertura do material granular estivesse abaixo de 290 mm, o material era levado novamente ao misturador, onde era adicionada mais água e se misturava novamente a mistura durante 30 segundos em velocidade rápida. Além das amostras citadas na Tabela 12 foram analisadas, separadamente, a demanda de água do filer calcário, do filer de AGR e de uma mistura de 50% de cada.

9.3 Absorção de água (condição saturada, superfície seca)

Para determinar a quantidade de água absorvida pelos grãos dos materiais granulares foi executado o ensaio de absorção de água pelo método do picnômetro.

Tal método consiste na medição da umidade total (h), a partir da secagem do material e a umidade superficial dos grãos (h_{sup}) utilizando um picnômetro. A subtração da umidade total pela umidade superficial fornece a quantidade de água absorvida pelos grãos, sendo:

$$A_b = h - h_{sup} \quad \text{Equação 4}$$

Considerando a umidade total e a umidade superficial, respectivamente, como:

$$h = \frac{m_h - m}{m} \quad \text{Equação 5}$$

e

$$h_{sup} = \frac{100(\rho K - m_h)}{\rho(m_h - K)} \quad \text{Equação 6}$$

Sendo:

$$m_h = m_c - m_a \quad \text{Equação 7}$$

$$K = P_{ag} - (P_{ag+a} - m_h) \quad \text{Equação 8}$$

m_h : massa úmida

m_a : massa do picnômetro parcialmente cheio

m_c : massa do picnômetro parcialmente cheio com amostra

m : massa seca

P_{ag} : massa do picnômetro com água

P_{ag+g} : massa do picnômetro com água mais amostra

ρ : massa específica aparente

10. ENSAIO EM PASTA

10.1 Ensaio de teor de saturação de aditivo (Cone de *Marsh*)

O estudo analisando o teor de saturação de aditivo superplastificante foi realizado utilizando cimento CP II F – 32 da marca Itambé, Aditivo superplastificante *Tecflow 7000* da Rheotec, fíler calcário e fíler de AGR.

O ensaio foi executado na sala climatizada do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), utilizando-se de uma argamassadeira planetária, com velocidades de rotação de 140 ± 5 rpm e 285 ± 10 rpm.

A seqüência da mistura era a seguinte:

- Cimento ou cimento mais fíler com 80% da água (vel. lenta: 1 min);
- Desligava-se para fazer a raspagem do material aderido à cuba (15 seg);
- Adicionava-se o aditivo superplastificante, mais os 20% restantes da água de mistura;
- Ligava-se a argamassadeira por mais 30 segundos em velocidade alta.

A quantidade de pasta produzida era de 1 dm^3 para cada teor de aditivo. A pasta era colocada dentro do cone de *Marsh* e media-se o tempo necessário para que $0,8 \text{ dm}^3$ da mesma escoassem dentro de um frasco graduado, com auxílio de um cronômetro digital. As medições eram realizadas no momento imediato após a mistura inicial e após 5, 15, 30, 60, 75 e 90 minutos após este, com o objetivo de verificar a perda de fluidez. A cada medição, a pasta era misturada novamente momentos antes, na argamassadeira, em velocidade baixa, por 1 minuto. Variou-se, também os teores de adição de aditivo em 0,1%, a partir de 0,5%, sendo executada, também, uma mistura de referência, sem introdução de superplastificante na mesma. A relação água/cimento utilizada foi de 0,5.

Foram realizadas misturas envolvendo:

- cimento + água + aditivo;
- cimento (75%) + fíler calcário (25%) + água + aditivo;
- cimento (75%) + fíler de AGR (25%) + água + aditivo;
- cimento (75%) + fíler calcário (12,5%) + fíler de AGR (12,5%) + água + aditivo.

As misturas envolvendo cimento com adição de fíler calcário e cimento com adição de fíler de AGR, foram realizadas para verificar se

havia interferência das adições sobre o teor de saturação do aditivo e sobre a perda de eficiência do mesmo.

10.2 Ensaio de calorimetria

O estudo do desenvolvimento do calor de hidratação foi realizado através do ensaio de calorimetria semi-adiabática, tipo *Langavant*. As amostras eram acondicionadas em recipientes cilíndricos de poliestireno expandido (EPS) de 1,5 cm de espessura, 12 cm de altura e 7 cm de diâmetro. O mesmo era coberto por uma manta térmica revestida com uma folha de alumínio. As amostras ainda permaneceram alocadas dentro de duas caixas térmicas feitas de isoplástico com paredes em duas camadas. Fez-se a aquisição dos dados em um *Data Logger* da marca *Hewlett-Packard*, modelo 34970A, com um intervalo de medições de 20 segundos.

O estudo deu-se em amostras de pasta de cimento, variando-se o teor de aditivo superplastificante, identificadas abaixo, como:

- P SP REF: Pasta de referência (0% de aditivo);
- P SP 0,6: Pasta de cimento com 0,6% de SP;
- P SP 0,8: Pasta de cimento com 0,8% de SP;
- P SP 1,0: Pasta de cimento com 1,0% de SP;
- P SP 1,2: Pasta de cimento com 1,2% de SP;
- P SP 1,4: Pasta de cimento com 1,4% de SP;
- P SP 1,6: Pasta de cimento com 1,6% de SP;

Alguns parâmetros foram utilizados para avaliar a influência do teor de aditivo superplastificante no calor de hidratação das pastas, a partir das temperaturas registradas ao longo do ensaio.

A variação de temperatura pode ser calculada a partir das temperaturas obtidas através do procedimento experimental, através da equação:

$$\Delta T_i = T_i - T_1$$

Equação 9

Sendo,

ΔT_i : variação da temperatura da amostra em função da temperatura inicial em $t = 0$ (°C);

T_i : temperatura da amostra no intervalo de tempo i considerado (°C);

T_1 : temperatura da amostra no início do ensaio (°C).

Outro parâmetro é a capacidade térmica da amostra, a qual leva em consideração o volume, a massa da amostra e o calor específico de cada constituinte da mesma e calculada pela equação:

$$C_s = m_s \cdot \Sigma(g_i \cdot c_i) \quad \text{Equação 10}$$

Sendo,

C_s : capacidade térmica da amostra (J/K);

m_s : massa da amostra (kg);

g_i : proporção relativa do constituinte na massa da amostra (kg/kg);

c_i : calor específico do constituinte (kJ/kg.K).

A partir da evolução da temperatura ao longo do tempo, é possível calcular o desenvolvimento do calor gerado pela amostra, com base em sua capacidade térmica calculada. Assim como a taxa de calor gerado obtida pela relação entre o calor e o tempo. As equações abaixo demonstram as formas de cálculo para Q_i e ΔQ_i .

$$Q_i = \frac{C_s \cdot \Delta T_i}{m_c} \quad \text{Equação 11}$$

Sendo,

Q_i : quantidade de calor gerado no tempo i (J/g);

C_s : capacidade térmica da amostra (J/K);

ΔT_i : variação da temperatura no tempo i ($^{\circ}\text{C}$);

m_c : massa de cimento na amostra (g).

$$\Delta Q_i = \frac{Q_i}{t} \quad \text{Equação 12}$$

Sendo,

ΔQ_i : taxa de calor gerado no tempo i (J/g/h);

Q_i : quantidade de calor gerado no tempo i (J/g);

i : intervalo de tempo i (h).

A partir do cálculo do acumulado da quantidade de calor gerado, é possível obter-se o valor total do calor desenvolvido, através da equação abaixo:

$$Q_{\max} = \Sigma Q_i \quad \text{Equação 13}$$

Sendo,

Q_{\max} : quantidade do calor total gerado durante o ensaio (J/g);

Q_i : quantidade de calor gerado no tempo i (J/g).

Para os cálculos acima mencionados, foram admitidos os valores de calor específico do cimento e da água. Os respectivos valores estão apresentados na Tabela 13. O calor específico do aditivo superplastificante não foi considerado, uma vez que a quantidade utilizada no estudo de calorimetria é insignificante, perante a massa total das misturas.

Tabela 13 – Calores específicos considerados para o ensaio de calorimetria

Material	Cimento Portland	Água potável
Calor específico (kJ/kg.K)	0,84	4,186

11. ENSAIOS EM ARGAMASSA

11.1 Ensaio de espalhamento (*flow table*)

Para determinar a quantidade necessária de aditivo superplastificante para alcançar a fluidez desejada para argamassa em concreto auto-adensável, foi utilizado o ensaio de espalhamento, usando a mesa de fluidez (*flow table*).

O ensaio consistiu na confecção de argamassas utilizando diversas combinações agregado natural/agregado reciclado, com dimensões entre 4,8mm e 0,15mm, além de cimento e fíler (calcário ou de AGR). Os teores de aditivo foram pré-estabelecidos no ensaio de cone de *Marsh*.

A seqüência de mistura dos materiais ocorreu da seguinte maneira:

- 100% da água mais 100% do cimento ou cimento mais fíler;
- ligava-se a argamassadeira em velocidade baixa, por 30 segundos;
- era adicionado o agregado gradativamente dentro de um tempo de 30 segundos, em velocidade baixa;
- alterava-se para velocidade alta, permanecendo esta por 30 segundos;
- desligava-se a argamassadeira durante 1 min e 30 seg, sendo que nos primeiros 15 seg era realizada a raspagem das laterais da cuba e logo em seguida coberta por uma toalha umedecida;
- era novamente ligada a argamassadeira, agora pelo período de 1 minuto, em velocidade alta.

Este ensaio possibilitou determinar a quantidade necessária de aditivo superplastificante para atingir-se a trabalhabilidade necessária, correspondente na bibliografia, para se alcançar as propriedades auto-adensáveis em concretos.

12. ENSAIOS EM CONCRETO

12.1 Ensaio de espalhamento (*Slump Flow*)

O ensaio de espalhamento teve a função de medir a capacidade do concreto auto-adensável de fluir livremente sem segregar, verificando a capacidade de preenchimento e a deformabilidade sob ação de seu peso próprio. Os resultados do ensaio estão diretamente ligados com a propriedade reológica de tensão de escoamento.

O ensaio é de execução extremamente simples, podendo ser executado tanto em laboratório, quanto em campo. O equipamento é formado de uma base metálica, de 1000 mm x 1000 mm, que não absorva água e não ofereça atrito para o escoamento do concreto, um tronco de cone de 300 mm de altura, diâmetro superior de 100 mm e diâmetro inferior de 200 mm, além de uma concha e uma trena.

A execução do ensaio iniciava com o umedecimento da placa e do tronco de cone para que esses não absorvessem a água de amassamento. A placa era colocada em local firme e nivelado e o tronco de cone posicionado no centro da placa. Em seguida preenchia-se o tronco de cone com o concreto, retirando o excesso de material na borda superior com uma espátula. É importante salientar que durante ou após a colocação do concreto não se deve executar qualquer tipo de adensamento.

Depois dessas etapas, o tronco de cone era retirado verticalmente, deixando o concreto fluir livremente sobre a placa. Media-se o diâmetro do espalhamento em duas direções ortogonais e, a média dessas medidas determinava o valor do *slump flow*. Importante salientar que esse ensaio pode ser executado em argamassas com um aparato adaptado, para fim de estudos preliminares. A Figura 13 demonstra os equipamentos para o ensaio de espalhamento.

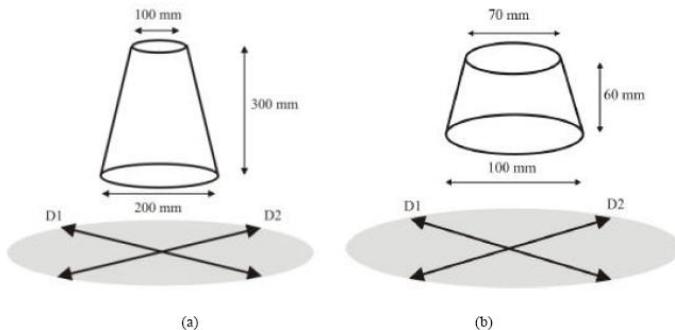


Figura 13 – Ensaio de espalhamento (*slump flow*): (a) concreto; (b) argamassa (NUNES, 2001, *apud* MELO, 2005)

No ensaio de espalhamento, além da abertura do mesmo, outras propriedades podem ser observadas, mesmo que de forma visual, como resistência à segregação e exsudação.

12.3 Ensaio de segregação (ROLS *et al.*, 1999)

Este ensaio, proposto por Rols *et al.* (1999), propõe mensurar a quantidade de material segregado em uma mistura de concreto auto-adensável. Para isto o concreto foi colocado em um aparato (Figura 14) composto de uma coluna de PVC de 100 mm de diâmetro nominal e seccionado em cinco partes. Cada amostra foi tomada de uma das seções (superior, intermediária e inferior). Os agregados graúdos contidos em cada amostra foram lavados em uma peneira de malha 4,8 mm e pesados. A análise dos resultados foi realizada utilizando-se do desvio obtido da média das massas retidas em cada seção. O objetivo foi avaliar a influência da substituição de areia natural por AGR na segregação das misturas, verificando se o mesmo aumentava ou não a estabilidade da mistura.

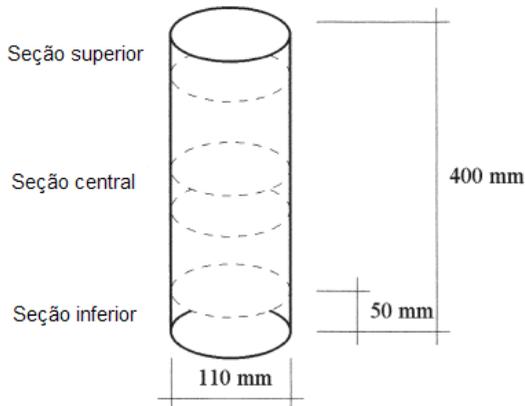


Figura 14 – equipamento utilizado para mensurar a segregação (Adaptado de ROLS *et al.*, 1999)

12.4 Ensaio de absorção capilar (NBR 9779/95)

O ensaio de absorção capilar foi executado de acordo com o método determinado pela NBR 9779/95. Os corpos-de-prova de concreto foram moldados em moldes cilíndricos com diâmetro de 10 cm. Entretanto, estes foram preenchidos até apenas uma altura de 9 cm e cobertos

por uma película plástica encostada sobre sua superfície, para evitar a carbonatação do material. Após a desmoldagem, as amostras foram embaladas em filme plástico e papel alumínio.

Após 28 dias, os corpos-de-prova foram pesados e em seguida postos em estufa a 50°C por 24 horas. Retirando-se as amostras da estufa, sua massa seca foi novamente determinada e o material posto para resfriar em um dessecador contendo sílica gel.

As amostras foram ensaiadas em um recipiente de isopor com dimensões de L: 30, C: 50 e H: 20. A tampa da caixa recebeu uma abertura de 15 cm² referentes a 1% da área total da mesma. Os corpos-de-prova foram alocados sobre uma grelha de forma a mantê-los não diretamente em contato com o fundo da caixa. Uma abertura próximo ao fundo foi mantida para manter uma película de água com altura constante. O fornecimento de água foi realizado por uma cânula provida de um dosador.

As medidas foram realizadas retirando-se a amostra do recipiente, secando-a superficialmente com um pano e pesando em uma balança de resolução mínima de 0,025% referente à massa total do corpo-de-prova. As leituras foram realizadas a cada 5 minutos durante a primeira hora de ensaio, a cada 30 minutos até a quarta hora e a partir daí foram realizadas leituras em intervalos não coincidentes, até o período de 72h. Ao final do ensaio, as amostras foram secas em estufa à 50°C até constância de massa. Através deste ensaio foram determinadas a quantidade total de água absorvida e a sorptividade. A Figura 15 e a Figura 16 mostram as vistas esquemáticas, superior e lateral do equipamento utilizado, respectivamente.

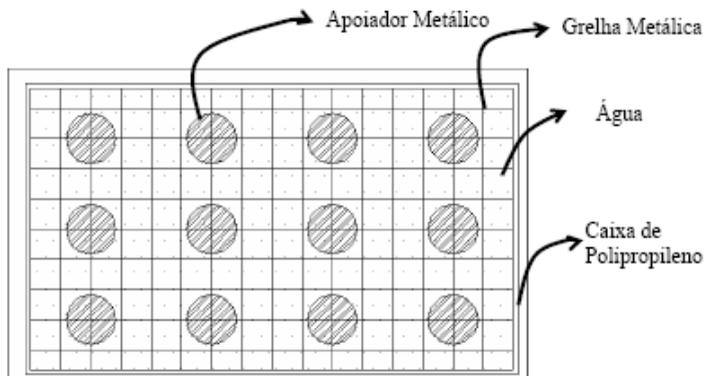


Figura 15 – Equipamento de ensaio de absorção por capilaridade em concretos – vista superior (ANDRADE, 2004)

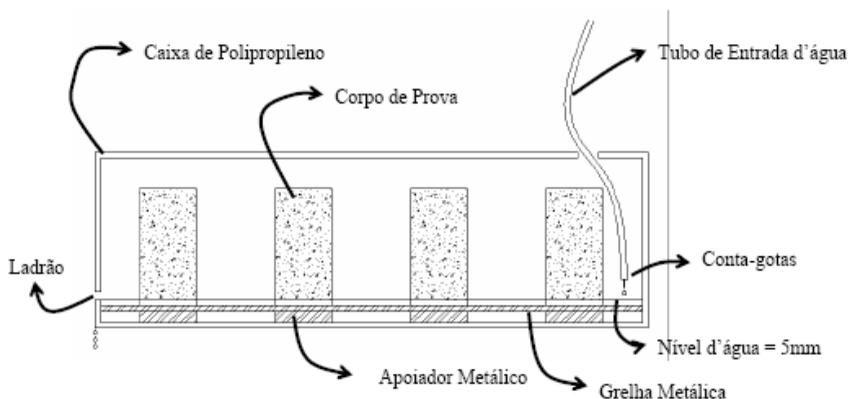


Figura 16 - Equipamento de ensaio de absorção por capilaridade em concretos – vista lateral (ANDRADE, 2004)

12.5 Ensaio de resistência à compressão

Os concretos que obedecerem às condições estabelecidas de comportamento no estado fresco (segregação, exsudação, fluidez) foram ensaiados em resistência à compressão em corpos-de-prova cilíndricos de dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, seguindo todos os procedimentos de moldagem de corpos-de-prova e os procedimentos de cura em câmara úmida.

Os corpos de prova foram ensaiados aos 28 dias, respeitando os limites de tolerância estabelecidos pela NBR 5739/1994 e demonstrados na Tabela 14.

Tabela 14 – Tolerância de tempo para ensaio de compressão em função da idade de ruptura (NBR 5739/1994)

Idade de ensaio	Tolerância permitida
24h	± 30 min ou 2,1%
3 dias	± 2 h ou 2,8%
7 dias	± 6 h ou 3,6%
28 dias	± 20 h ou 3,0%
60 dias	± 36 h ou 2,5%
90 dias	± 2 d ou 2,2%

12.7 Ensaio de retração por secagem (PÉRA e AMBRÓISE, 2004)

O equipamento para realizar o ensaio de retração foi desenvolvido no laboratório do grupo ValoRes, localizado no NPC (Núcleo de

Pesquisa em Construção Civil) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Equipamento similar foi desenvolvido pelo *Institut National des Sciences Appliquées – INSA – de Lyon* na França.

As dimensões das placas de concreto utilizadas nesse estudo foram de 330 x 330 x 30 mm. O posicionamento dos parafusos que mediram o deslocamento dimensional causado pela retração foi fixado em 2,5 e 4,5 cm das bordas da placa. Os dados foram coletados automaticamente através de um equipamento digital de aquisição de dados (*Data Logger*) da marca Hewlett-Packard, modelo 34970A, o qual esteve conectado a um computador para o armazenamento dos dados. As leituras realizadas através da variação da voltagem foram transformadas em valor dimensional (μm), pelo *software* Agilent BenchLink Data Logger 1.5. Um corte esquemático do equipamento é apresentado na Figura 17. Ainda fixaram-se dois LVDTs no centro da placa, em sentidos ortogonais, para medir o deslocamento horizontal. Foi fixada sob a mesa superior do equipamento, uma célula de carga que registrou a cinética de perda de massa de água para o ambiente. A Figura 18 demonstra o equipamento já em operação.

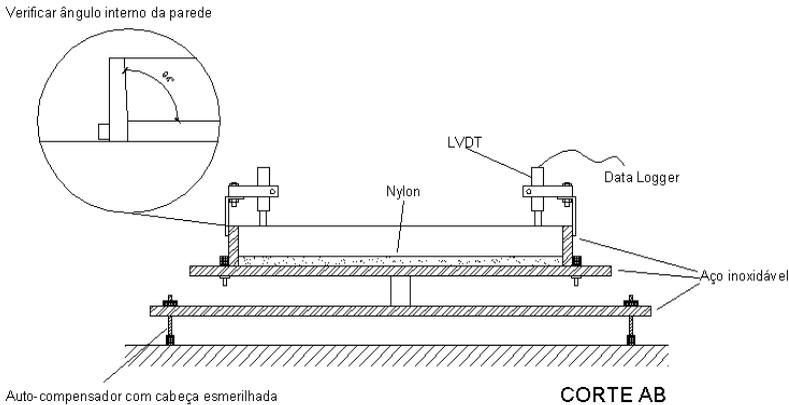


Figura 17 – Corte esquemático do equipamento para medir a retração das placas de concreto



Figura 18 – Equipamento para ensaio de retração por secagem

13. RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos através dos ensaios realizados, tanto para caracterização, quanto para pastas, argamassas e concretos.

13.1 Resultados da Caracterização física dos materiais

Os resultados dos ensaios referentes às características físicas dos agregados utilizados no trabalho são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Características dos agregados

	Abertura das peneiras (mm)	Areia	AGR graúdo	Brita c/finos	Brita lavada	AGR miúdo
% retido acumulado	12,5	0	1	0	0	0
	9,5	0	11	7	5	0
	6,3	1	20	55	60	11
	4,8	1	29	83	88	16
	2,4	8	45	95	98	28
	1,2	35	63	97	100	48
	0,6	58	73	98	100	64
	0,3	79	85	98	100	82
	0,15	92	95	98	100	94
	0	100	100	100	100	100
Diâmetro máximo característico (mm)		4,8	12,5	9,5	9,5	6,3
Módulo de finura		2,74	-	-	-	3,31
Massa específica (g/cm ³)		2,60	2,43	2,64	2,64	2,43
Massa unitária no estado solto (kg/dm ³)		1,53	1,40	1,50	-	1,28
Teor de material pulverulento (%) **		1,58	-	-	-	4,51
Classificação NBR 7217/1987		Areia média	Brita 0	Brita 0	Brita 0	Areia grossa

De acordo com os resultados contidos na Tabela 15, é possível verificar a diferença entre as massas específicas do agregado miúdo natural e do agregado miúdo reciclado. Apresentando o primeiro uma maior massa específica (aproximadamente 6,5% superior).

Outro resultado significativo foi o teor de material pulverulento obtido das amostras do material natural e reciclado. O ensaio foi realizado em amostras já contendo a granulometria composta para realização dos estudos em argamassa e concreto. Foi notória a diferença entre os dois materiais, sobressaltando-se a quantidade superior de finos do agregado reciclado (285% superior).

A análise da distribuição granulométrica dos agregados miúdos, reciclados e naturais, acima da peneira de abertura nominal de 0,15 mm foi realizada de acordo com a norma NBR NM 248 (2003) e, a partir dos resultados demonstrados na Tabela 15 é apresentado na Figura 19 o gráfico com as distribuições, dentro dos intervalos considerados utilizáveis e ótimos.

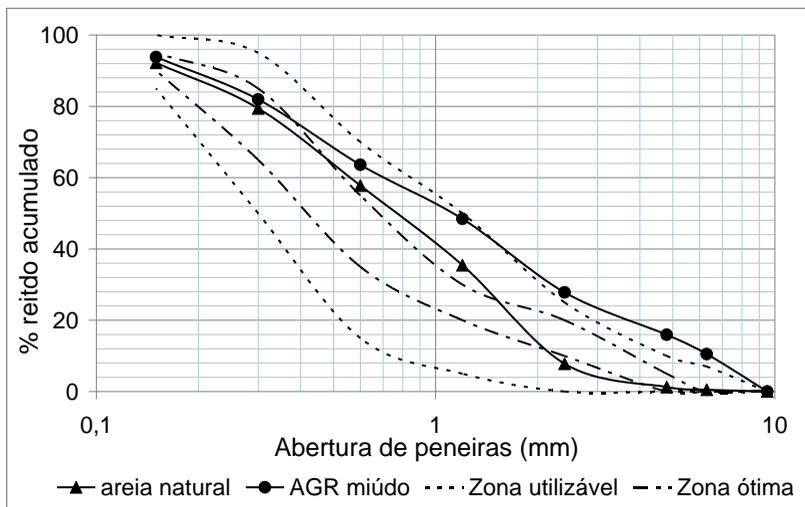


Figura 19 – Curva granulométrica dos agregados miúdos (natural e reciclado)

Observando as curvas apresentadas na Figura 19, observa-se que ambos agregados possuem uma distribuição uniforme do diâmetro dos grãos. É possível ainda analisar que os percentuais retidos entre as peneiras 0,6 mm e 0,15 mm são muito próximos para ambos os materiais. Entretanto, o agregado reciclado apresenta uma quantidade superior de grãos com diâmetro superior a 2,4 mm. Analisando o gráfico, nota-se que a areia natural possui uma distribuição mais próxima da idealizada pela NBR NM 248 (2003). Entretanto, para a execução dos estudos em argamassas e concretos, assumir-se-á a curva granulométrica apresentada pelo agregado reciclado, o qual apresenta uma distribuição no limite da zona utilizável e, em determinados pontos, chega a estar fora destes limites estabelecidos. O motivo para tal escolha será o de não descaracterizar o AGR por ser este o principal objeto deste estudo.

Em análise aos resultados, ressalta-se que a granulometria dos agregados miúdos, tanto natural quanto reciclado, pode variar muito dentro de uma mesma central de beneficiamento. Essa variação é causada pela heterogeneidade dos resíduos dispostos na usina de reciclagem que mudam muito de acordo com a origem de produção do resíduo.

Para os agregados graúdos, a Figura 20 apresenta a distribuição granulométrica dos agregados graúdos (natural e reciclado) utilizados.

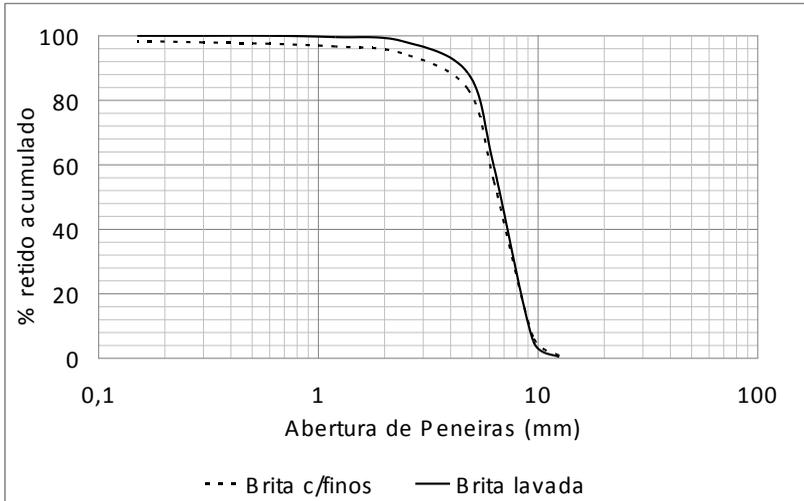


Figura 20 – Curva granulométrica dos agregados graúdos (natural e reciclado)

A partir do disposto na Figura 20, é possível notar uma diferença pequena entre o agregado graúdo lavado e o agregado graúdo não lavado. Apesar da diferença mínima, essa quantidade de material fino (maior parte formada de material pulverulento) poderia afetar a viscosidade do concreto, incrementando a quantidade de finos e alterando resultados. Os dados fornecidos pelo ensaio auxiliaram na decisão de efetuar a lavagem do agregado graúdo diminuindo assim a quantidade de partículas com diâmetro inferior a 4,8 mm.



Figura 21 – Imagens microscópio óptico (50x): (a) AGR; (b) Areia natural

Através de imagem obtida por microscopia óptica observou-se a forma das partículas de AGR e areia natural, retidas entre as peneiras

0,15mm e 0,30mm. As imagens dispostas na Figura 21 demonstram que o agregado reciclado possui forma mais arredondada do que a areia, que possui forma mais angular. Esse arredondamento das partículas deve-se, em parte, à camada de pasta aderida aos grãos. Essa camada de pasta pode também explicar a maior demanda de água na utilização do AGR.

A Figura 22 demonstra uma comparação entre a distribuição granulométricas do fíler calcário e do fíler de AGR, obtidos a partir do método de granulometria a *laser*. Os resultados analisados no gráfico demonstram o mesmo comportamento de distribuição do tamanho dos grãos para ambos os materiais.

Nas distribuições obtidas de cada material, observou-se que o fíler calcário possui uma maior quantidade de partículas com diâmetro inferior. Sendo que este possui em torno de 16% das partículas com diâmetro inferior a $1\mu\text{m}$, enquanto que o fíler de AGR possui apenas 4% de suas partículas com diâmetro abaixo desse limite.

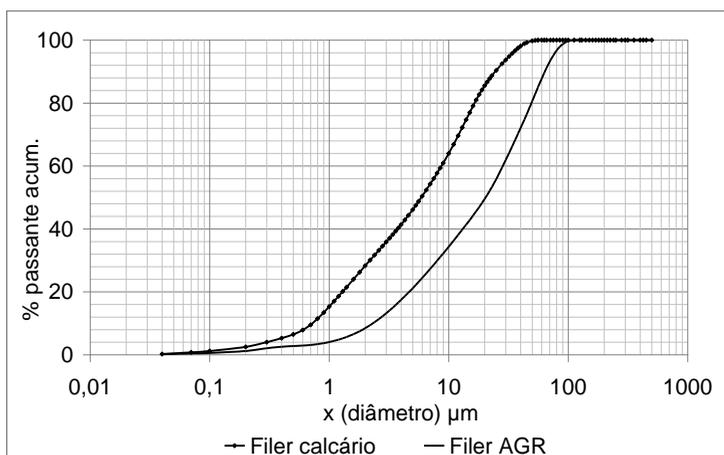


Figura 22 – Composição granulométrica dos fílers (granulometria à *laser*)

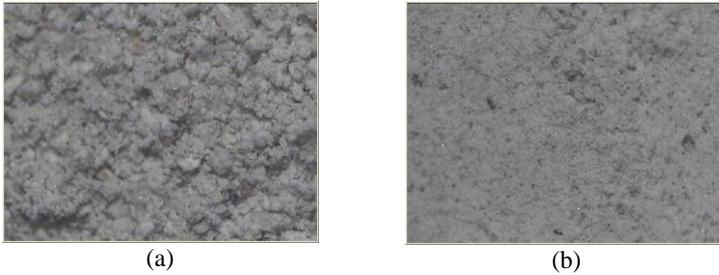


Figura 23 – Imagens microscópio óptico (50x): (a) fíler de AGR; (b) fíler calcário

As duas marcas de fíler calcário utilizadas por Melo (2001), apresentaram cerca de 10% de partículas inferiores a $5\mu\text{m}$. Quantidade essa bastante inferior ao visualizado para o fíler em questão neste trabalho, que apresentou em torno de 44% de partículas inferiores a esse diâmetro, demonstrando ser um material muito mais fino.

Já no trabalho realizado por Poppe e Schutter (2005), o fíler calcário utilizado apresentou uma granulometria semelhante a do material utilizado neste trabalho, apresentando aproximadamente 40% de material inferior a $5\mu\text{m}$. Bosiljkov (2003) utilizou dois tipos de fíler, um calcário e o outro designado como pó calcário, apresentando 30% e 60% de partículas inferiores a $5\mu\text{m}$, respectivamente.

As imagens realizadas dos fílers em microscópio óptico, e dispostas na Figura 23, demonstram que o fíler calcário possui partículas de diâmetro inferior em comparação ao fíler de AGR, comprovando o disposto no ensaio de granulometria a *laser*. Infelizmente, o alcance de aumento de imagens do equipamento, não foi o suficiente para poder analisar a forma das partículas, sendo esse o objetivo inicial da análise. Para tal tarefa, seria necessário um equipamento com uma capacidade de aumento maior, como por exemplo, um microscópio eletrônico de varredura.

Tabela 16 – Dados do ensaio de absorção da areia natural pelo método do picnômetro

	am1	am2	am3	média	desvio	CV (%)
ρ	2,63	2,66	2,65	2,65	0,02	0,73
k	38,9	49,9	34	40,93	8,14	19,89
h	6,136	7,706	4,881	6,24	1,42	22,68
hsup	4,255	5,306	3,424	4,33	0,94	21,79
ab	1,881	2,400	1,457	1,91	0,47	24,70

Tabela 17 – Dados do ensaio de absorção do AGR pelo método do picnômetro

	am1	am2	am3	média	desvio	CV (%)
ρ	2,67	2,65	2,63	2,65	0,02	0,67
k	75,2	40,6	48,6	54,8	18,11	33,05
h	19,802	19,188	16,6	18,5	1,68	9,08
hsup	12,591	12,232	10,756	11,9	0,97	8,20
ab	7,211	6,956	5,873	6,68	0,71	10,63

Através do disposto na Tabela 16 e na Tabela 17, verifica-se a absorção dos agregados miúdos. Esta absorção foi analisada a partir do material com granulometria já igualada. Os resultados apresentados estão de acordo com o apresentado por Angulo e John (2005) e por Corinaldesi e Moriconi (2009). Todavia, é importante salientar que por se tratar de um material bastante heterogêneo, o agregado proveniente da reciclagem do resíduo de construção e demolição pode sofrer grandes variações nos resultados obtidos por diferentes autores.

13.2 Resultados da caracterização química dos materiais

A caracterização química dos materiais foi realizada através de ensaio de Espectrometria por Efluorescência de Raios-X, no laboratório do grupo Valores, pertencente ao Núcleo de Pesquisa em Construção (NPC), com exceção do cimento, o qual teve suas características químicas analisadas através de relatório técnico da Itambé cimentos.

Foi realizada também a calcinação do fíler calcário e do fíler de AGR em uma mufla, a uma taxa de aquecimento de 10°C por minuto até atingir uma temperatura final de 900°C, permanecendo esta por uma hora, a fim de verificar a perda de massa ao fogo dos materiais. O objetivo dessa calcinação foi o de verificar a perda de massa ao fogo dos materiais. Os resultados das propriedades químicas dos materiais estão dispostos na Tabela 18.

Tabela 18 – Propriedades químicas e físicas do cimento, do filler calcário e do filler de AGR

	CP II F - 32 (%)	Filler calc. (%)	Filler AGR (%)
Al ₂ O ₃	4,12	2,13	11,59
SiO ₂	18,66	6,77	31,65
Fe ₂ O ₃	2,58	0,98	3,94
CaO	59,89	69,6	38,65
MgO	4,44	4,87	2,15
SO ₃	3,07	0,33	1,79
Cal livre	1,02	-	-
K ₂ O	-	0,69	2,71
SrO	-	0,06	0,09
ZrO ₂	-	0,016	0,11
Blaine	3310	-	-
Perda ao fogo (%)	5,15	14,37	6,11
início de pega (h)	03:48	-	-
fim de pega (h)	04:31	-	-

Notou-se na composição química do filler calcário, uma quantidade elevada de óxido de cálcio (69,6%) do material já submetido à perda ao fogo. Em comparação aos valores verificados na literatura, esse valor é elevado. Melo, 2005, obteve em seu material uma quantidade de CaO de 31,39%. Entretanto, não é comentado no referido trabalho se o material foi previamente calcinado, ou não. O filler calcário utilizado por Yahia *et. al* (2005), apresentou 54,9% de óxido de cálcio, aproximando-se mais da quantidade encontrada no presente estudo.

Em comparação com Limbachiya *et al.* (2007), a quantidade de óxido de cálcio, em agregado reciclado, na presente pesquisa, foi maior. No referido trabalho, as amostras estudadas permaneceram dentro de uma faixa de 16% e 13%. Já para a perda ao fogo, os valores apresentados pelos autores correspondem ao verificado neste trabalho.

Já para a perda ao fogo, o valor de 14,37% ficou bem abaixo dos resultados obtidos por outros autores (em torno de 40% de perda em outros trabalhos).

Na comparação entre os dois fillers estudados, o filler de AGR apresentou 11,59% de Al₂O₃, contra apenas 2,13% do filler calcário. Essa maior quantidade de Al₂O₃ está estreitamente ligada à composição dos concretos e argamassas que constituem o resíduo. Para o SiO₂, no filler de agregado reciclado encontrou-se 31,65% e 6,77% encontrado no filler calcário. O óxido de cálcio encontrado no filler de AGR, ficou em um patamar inferior (\approx 45%). Para a perda ao fogo, os fins de AGR apresentaram apenas 6,11% de material carbonático.

A presença de SiO_2 , Al_2O_3 , CaO e Fe_2O_3 nos agregados reciclados, está associada, em parte, com as diversas formas de silicatos presentes nas partículas de pasta de cimento, em agregados naturais e em materiais cerâmicos (Angulo & John, 2005). Isto explica a presença desses compostos no AGR estudado.

Os dois aditivos superplastificante utilizados demonstram características muito semelhantes no que se refere ao pH, à base química e à massa específica do material. Entretanto, a diferença básica entre os dois, é o teor de sólido presente em cada um. Enquanto no Glenium SP o teor de partículas sólidas fica entre 17 e 19%, no Tecflow 7000 o mesmo permeia uma faixa entre 38 e 42%. Um estudo mais aprofundado da estrutura química dos aditivos, não foi realizado, uma vez que se torna uma tarefa difícil, pelo fato dos superplastificantes policarboxilatos possuírem cadeias longas e de difícil caracterização, o que demandaria um tempo elevado para análise e fugiria do objetivo principal do estudo.

13.3 Resultados do ensaio em material granular

Os resultados do ensaio de molhagem do material granular são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – resultados do ensaio de demanda de água em material granular

Amostra	Material	d1	d2	d _m	H _{final}	H _{médio}	M _{esp m}
1	FAGR	29,8	29,5	29,65	0,65	0,65	1,465
1	FAGR	32,0	32	32,00	0,65		
2	FC	32,2	32,8	32,50	0,42	0,41	1,895
2	FC	29,5	29,8	29,65	0,40		
3	FC/FAGR	29,2	29,6	29,40	0,30	0,32	1,519
3	FC/FAGR	29,0	28,9	28,95	0,35		
4	REF	-	-	-	0,30	0,26	-
4	REF	-	-	-	0,22		
5	AGR25	29,6	29,4	29,50	0,28	0,28	1,80975
5	AGR25	25,2	26	25,60	0,32		
6	AGR50	29,5	28,5	29,00	0,26	0,27	1,699
6	AGR50	30,4	30,1	30,25	0,28		
7	AGR75	29,0	28,9	28,95	0,27	0,28	1,579
7	AGR75	28,9	29,4	29,15	0,29		
8	AGR100	29,4	28,9	29,15	0,30	0,32	1,534
8	AGR100	28,9	29,4	29,15	0,34		

Durante o ensaio, foi possível observar que as composições contendo maior teor de material reciclado demonstraram maior estabilidade da mistura, ou seja, com o aumento do teor de AGR foi diminuída a

presença de segregação e exsudação no material. Em algumas misturas onde o percentual de AGR era baixo ou nulo não foi possível realizar a leitura, uma vez que mesmo aumentando a quantidade de água nas composições, notou-se apenas o aumento da exsudação nos materiais, não havendo aumento de fluidez.

As amostras de referência (100% agregado natural) apresentaram elevado teor de exsudação da água de mistura, impossibilitando a leitura e o alcance do valor almejado de 30 ± 1 cm no ensaio de *mini-slump flow*.

Esta maior estabilidade do material está diretamente relacionada com a maior quantidade de material pulverulento presente no agregado reciclado. Apesar do material já ter sido peneirado, separado em frações e composto novamente, nem todo fíler foi excluído do material, o que só seria possível se o mesmo fosse lavado. Porém, isso não foi realizado, pois provocaria uma modificação muito grande no material, provocando a sua descaracterização. Além disto, outra possibilidade é a maior rugosidade dos grãos de AGR que gera maior atrito interpartículas, e da maior porosidade do material, causada pela camada de pasta aderida na superfície. Apesar das diferentes demandas, é possível perceber que não há diferenças exacerbadas entre os diferentes teores de incorporação de AGR.

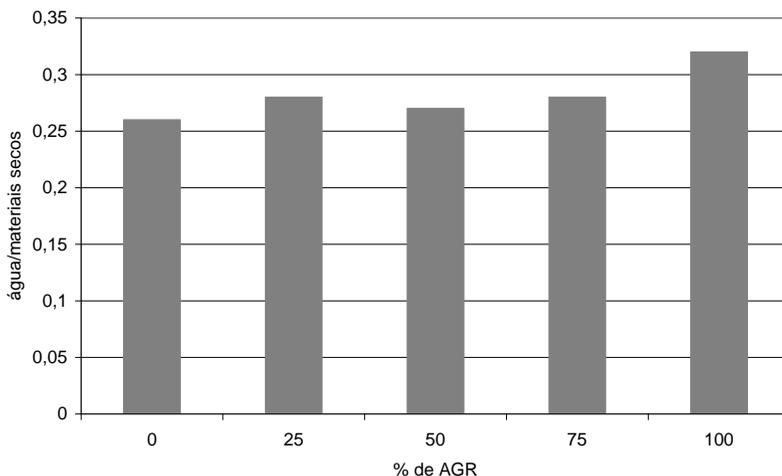


Figura 24 – Demanda de água nos agregados miúdos

Entre as amostras estudadas dos finos, o fíler de AGR demonstrou uma maior demanda de água que o fíler calcário, ao contrário do

que seria esperado, pelo fato do material calcário possuir grãos de menor diâmetro e, por consequência, maior área específica. Entretanto, a hipótese levantada, é de que o fíler de AGR possua uma maior tortuosidade na forma de suas partículas, além da maior porosidade do material, o que elevou a demanda de água do mesmo.

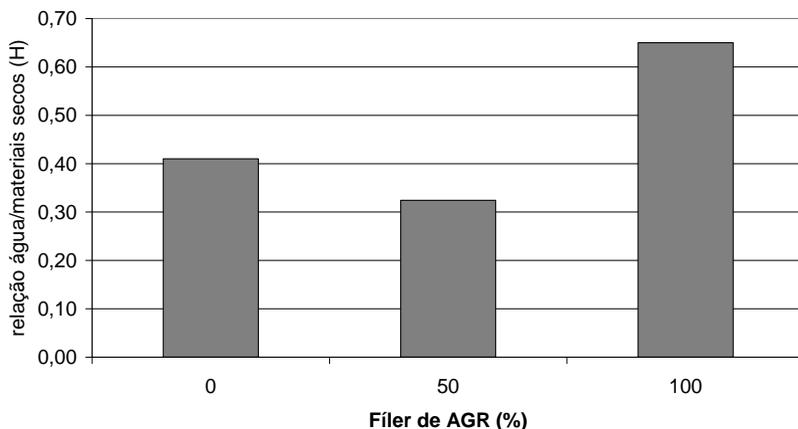


Figura 25 – Demanda de água dos fílers

A amostra estudada de 50% fíler calcário e 50% de fíler de AGR apresentou um comportamento diferente do esperado, que seria um valor médio para a demanda de água, ficando entre os valores de cada material. Todavia, o que ocorreu foi uma diminuição ainda maior da demanda de água. Uma hipótese levantada para tal comportamento, é de que o material reciclado apresenta uma maior tortuosidade e porosidade, além de partículas maiores. Assim, o fíler calcário poderia ter sido adsorvido, provocando um entupimento desses poros, diminuindo o contato da água com toda superfície tanto do AGR quanto do material calcário. A Figura 26 demonstra um esquema da conduta dos materiais para tal hipótese.

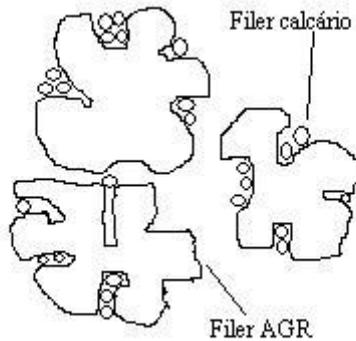


Figura 26 – Esquema da possível interação entre os finos de calcário e de AGR

13.3 Resultados dos ensaios em pasta

13.3.1 Ensaio de saturação de aditivo e perda de fluidez

Para o ensaio de saturação de aditivo e perda de fluidez, foram utilizadas misturas binárias e ternárias de pasta de cimento Portland, sendo:

- cimento Portland e aditivo Glenium SP;
- cimento Portland, fíler de AGR e aditivo Glenium SP;
- cimento Portland, fíler calcário e aditivo Glenium SP;

A partir dos resultados apresentados na Figura 27, foi possível realizar uma série de considerações.

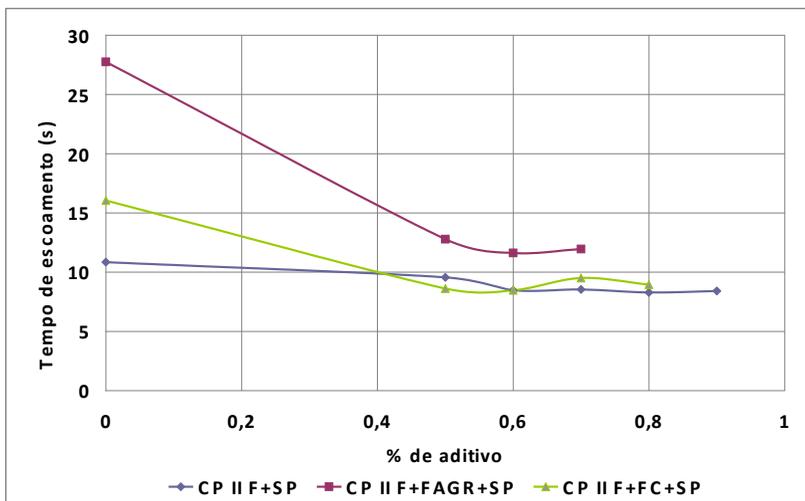


Figura 27 – Resultados do ensaio de saturação de aditivo e perda de eficiência

Para cimento Portland e aditivo Glenium SP (CP II F + SP) foi possível verificar que com relação ao traço sem aditivo, a mistura contendo 0,5% de SP (em relação à massa de cimento) não apresentou um ganho de trabalhabilidade considerável. As demais dosagens, com teor de aditivo de 0,6%, 0,7%, 0,8% e 0,9% também permaneceram muito próximas uma das outras, não demonstrando grandes aumentos de fluidez no material. Porém, foi possível verificar que com teores acima de 0,7%, houve a ocorrência de floculação do cimento e uma sedimentação demasiada, o que acabava dificultando a remistura do material antes das leituras seguintes.

Foi percebido, a partir dos resultados, que a utilização do aditivo Glenium SP foi muito útil na manutenção da trabalhabilidade da mistura, havendo pouca perda de fluidez da pasta em tempos de leitura mais avançados (30 e 60 min). Para essa mistura, o teor de saturação de aditivo encontrado foi de 0,8%, sendo que a mistura contendo 0,9% apresentou aumento da viscosidade do material.

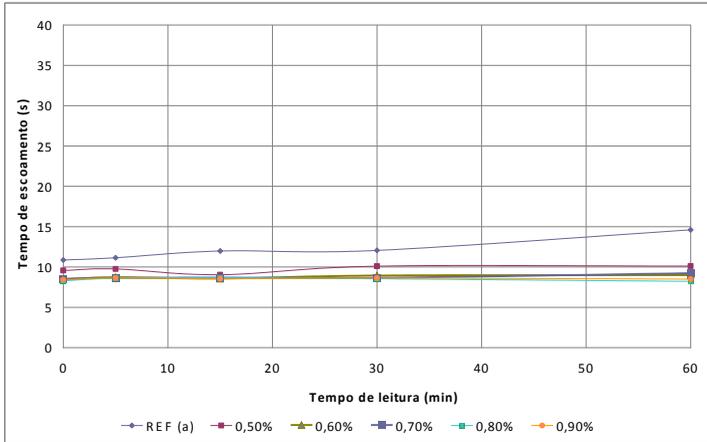


Figura 28 – Gráfico de perda de trabalhabilidade (CP IIF + SP)

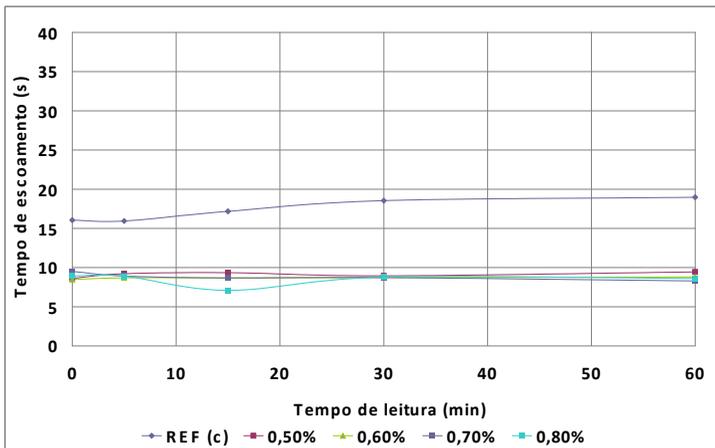


Figura 29 - Gráfico de perda de trabalhabilidade (CP IIF + FC + SP)

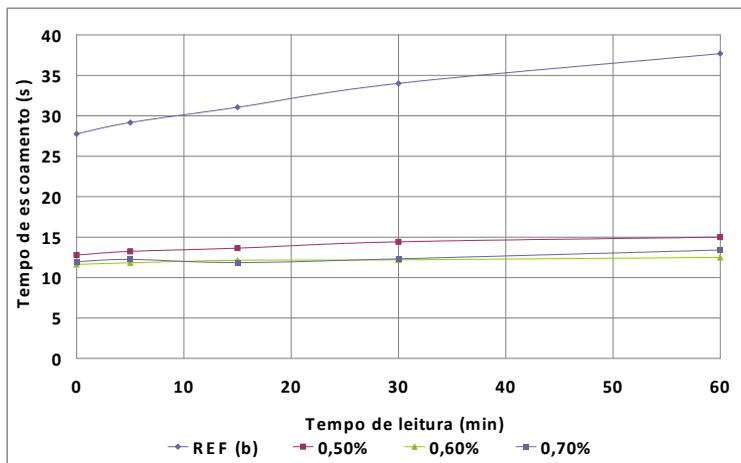


Figura 30 - Gráfico de perda de trabalhabilidade (CP IIF + FAGR + SP)

Para a mistura contendo cimento Portland, fíler de AGR e aditivo Glenium SP, foi possível notar que a substituição de 25% do total de cimento pelo referido fíler provocou um aumento brusco da viscosidade do material. Tal aumento da viscosidade está diretamente relacionado com o formato das partículas do fíler de AGR, uma vez que, o material apresenta uma superfície rugosa, a qual gera um maior atrito interpartículas.

No entanto, a diferença da mistura de referência (sem aditivo), para as misturas com aditivo é muito maior que no caso anterior. A diferença de tempo de escoamento entre as misturas também foi maior, o que facilitou a leitura entre as amostras. A trabalhabilidade ao longo do tempo foi mantida quase que estável nas misturas contendo aditivo, inclusive para leituras em tempos mais avançados (30 e 60 min). Os fenômenos de floculação e de sedimentação do material permaneceram para as amostras com maiores teores de aditivo, assim como ocorrido para as misturas sem fíler de AGR.

13.3.2 Ensaio de calorimetria semi-adiabática

Os resultados obtidos através dos ensaios de calorimetria semi-adiabática das pastas são apresentados, analisados e discutidos nesse subitem, sendo analisados separadamente para, ao final, visualizá-los em conjunto e verificar as modificações e as influências gerais sofridas pelas misturas. A Tabela 20 apresenta variáveis como a massa da amostra e a quantidade máxima de calor gerado, dentre outros.

Tabela 20 – Dosagem das misturas de pastas para calorimetria

Amostra	a/c	M _s (kg)	M _c (kg)	C _s (J/K)	Q _{max} (J/g)
REF	0,6	0,725	0,290	1,397	32,75
P SP 0,6	0,6	0,712	0,285	1,482	31,23
P SP 0,8	0,6	0,713	0,285	1,496	30,92
P SP 1,0	0,6	0,728	0,291	1,427	30,92
P SP 1,2	0,6	0,702	0,281	1,389	32,37
P SP 1,4	0,6	0,734	0,294	1,435	32,37
P SP 1,6	0,6	0,702	0,281	1,375	31,52

As amostras apresentaram uma queda no calor máximo gerado, de acordo com aumento do teor de aditivo superplastificante. De acordo com Castro e Pandolfelli (2009), não é possível estabelecer uma influência definitiva do SP sobre a cinética de hidratação do cimento, apenas baseando-se sobre pesquisas bibliográficas, uma vez que esta influência está atrelada às diversas propriedades intrínsecas de cada superplastificante.

A complexidade das reações de hidratação do cimento, não se deve apenas a sua composição, mas também a sua forma de fabricação, da área de superfície específica e da presença de adições e aditivos.

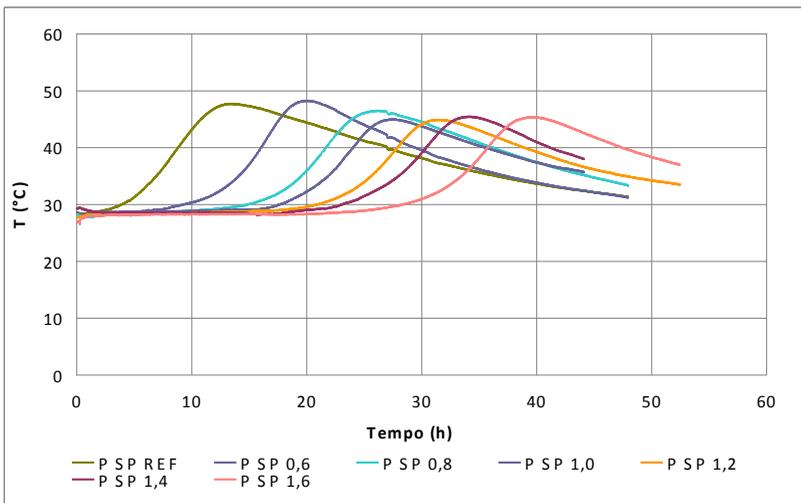


Figura 31 – Evolução da temperatura para as amostras de pasta de cimento

A Figura 31 mostra as temperaturas desenvolvidas pelas diferentes pastas contendo diferentes teores de aditivo superplastificante. Nela é possível verificar uma clara influência do teor de aditivo sobre o desenvolvimento das temperaturas, tanto em quantidade quanto nos tempos levados para que tais temperaturas e seus picos fossem alcançados.

Na mesma figura pode ser observado que houve um retardo no tempo de alcance do pico da temperatura máxima desenvolvida, conforme o aumento do teor de aditivo. Esse aumento ainda pode ser relacionado com a diminuição do desenvolvimento da temperatura, também verificada no gráfico.

Da referência, até a amostra contendo 1,6% de aditivo, verificou-se um retardo no início da inclinação da curva após o período de indução de aproximadamente 25 horas, assim como retardo no fim da inclinação ascendente, caracterizada como fim de pega, para todas as amostras presentes dentro deste intervalo. Os gráficos com a variação de temperatura, a quantidade máxima de calor gerado e a quantidade de calor gerado em determinado tempo i , encontram-se no Anexo A.

Conforme Jolicoeur e Simard (1998), os aditivos atuam diferentemente, de acordo com o grau de hidratação do cimento, considerando que o processo possa ser dividido em cinco estágios sendo: reações iniciais, ou pré-indução (entre 0 e 15 min); período de indução (15 min a 4 h); período de aceleração (entre 4 e 8h); período de desaceleração (entre 8 e 24h); e período de difusão (entre 1 e 28 dias).

No primeiro estágio, o aditivo influencia o processo de nucleação, a taxa de reação e os produtos da mesma. Na segunda etapa, a quantidade de íons sulfato (SO_4^{2-}) é que determina o comportamento do sistema cimentício, tanto nas propriedades reológicas, quanto o início de pega. Na terceira fase, ocorre a auto-inibição da hidratação do cimento, influenciada pelos fenômenos ocorridos nos estágios I e II (JOLICOEUR e SIMARD, 1998).

De acordo com Felekoglu & Sarikahya (2007), em estudo analisando três tipos diferentes de SP policarboxilato, não houve um retardo significativo no tempo de pega para um dos aditivos, ao contrário dos outros dois que provocaram um aumento no tempo de pega conforme foi aumentado o teor dos mesmos.

Conforme Felekoglu e Sarikahya (2007), a origem do retardo pode estar relacionada com a estrutura de ligação do esqueleto principal da cadeia com as cadeias secundárias dos polímeros do superplastificante.

13.4 Resultados dos ensaios em argamassa

13.4.1 Mini-slump flow

Os ensaios em argamassa tiveram como objetivo principal, ajustar o teor de aditivo superplastificante, e verificar a necessidade do uso de agentes promotores de viscosidade em conjunto. O ensaio realizado para verificar as propriedades no estado fresco foi o *mini-slumpflow*, através do qual foi medido o espalhamento de argamassas com variações de incorporação de AGR, de fíler e de teor de aditivo, utilizando a mesa de abatimento, todavia, sem o uso de adensamento através de golpes de soquete, nem golpes de queda de mesa.

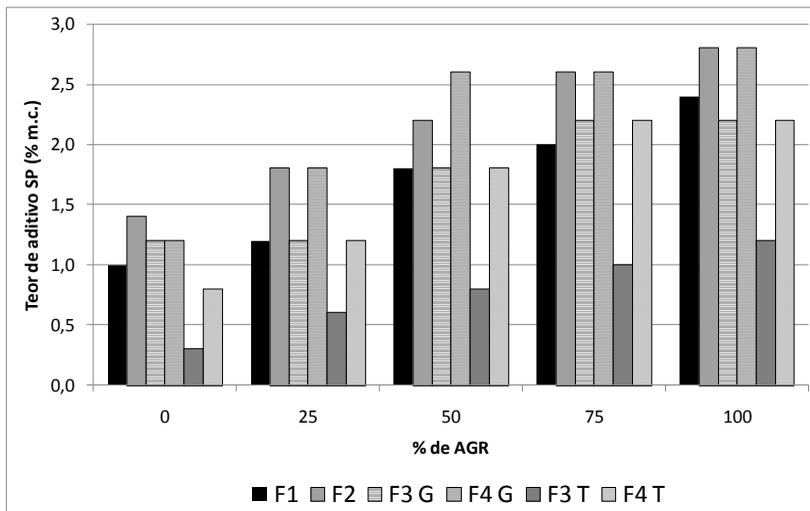


Figura 32 – Percentual de teor de aditivo com relação à incorporação de AGR

A Figura 32 demonstra que conforme o aumento da substituição de areia natural por agregado reciclado foi necessário um incremento na quantidade de aditivo superplastificante. É importante salientar que, embora o AGR apresente uma absorção maior em relação ao agregado natural, durante a dosagem das argamassas essa absorção foi prevista, redimensionando assim a quantidade de água para cada mistura.

Durante a realização do ensaio, foi verificada, de forma visual, a segregação e a exsudação do material. De todas as amostras ensaiadas, as que apresentaram maiores problemas com segregação e exsudação foram as amostras de referência contendo fíler calcário (F1 REF e F3 REF). As demais apresentaram uma maior estabilidade conforme era aumentado o teor de incorporação de AGR (finos e/ou agregado). Coe-

são essa tão alta (para os teores de substituição de agregado natural por AGR superiores a 50%) que demandaram altas taxas de superplastificante para que fosse atingido o espalhamento pré-estabelecido (250 a 300 mm). Em praticamente todas as misturas, quando o fíler calcário era substituído pelos finos de AGR, foi necessário o aumento do percentual de superplastificante.

Em análise a distribuição granulométrica dos dois tipos de finos, verificou-se que o fíler calcário possui partículas menores que o fíler de AGR. Todavia, em sentido contrário do que se era esperado, a demanda de aditivo aumentou para as amostras com o segundo tipo de fíler. Esse comportamento pode estar atrelado à área específica do material. A hipótese, como já citado anteriormente em outros subitens, é de que o fíler de AGR possua maior porosidade e uma superfície mais tortuosa, o que compense as suas partículas maiores, e provoque um aumento na área superficial.

A substituição do aditivo Glenium SP pelo Tecflow 7000, resultou em uma queda brusca de teor de superplastificante, resultado do maior teor de sólidos presente no segundo aditivo ($\approx 40\%$).

A Figura 33 demonstra a massa específica aparente de cada argamassa, conforme o teor de substituição de agregado natural por agregado reciclado, levando em consideração as amostras com fíler calcário e as amostras com fíler de AGR.

Através dos resultados apresentados, é possível notar um leve declínio da massa específica, conforme a incorporação de AGR. Todavia, nas amostras contendo o aditivo Tecflow 7000, os resultados foram invertidos, fazendo com que em todas as amostras com fíler de AGR apresentassem maior massa específica.

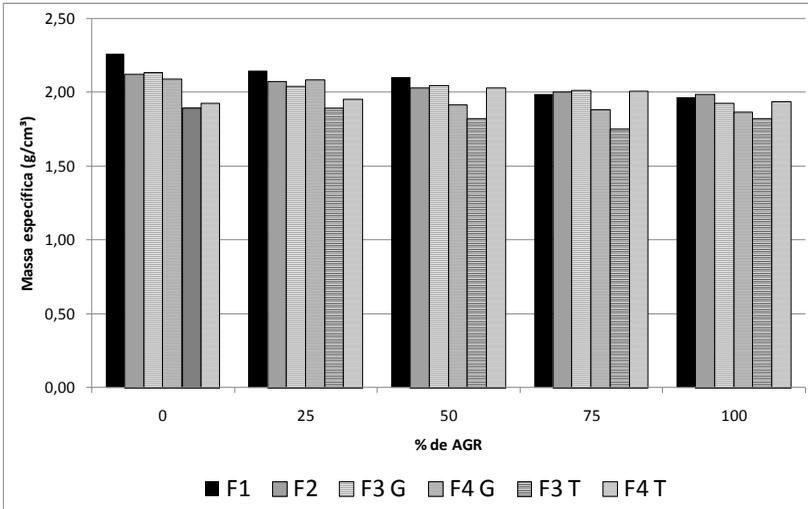


Figura 33 – Massa específica das argamassas com relação à incorporação de AGR.

13.4.2 Ensaio de resistência à compressão

A Figura 34, apresenta os resultados dos valores médios do ensaio de resistência à compressão, realizado em argamassas. De posse destes é possível realizar algumas considerações.

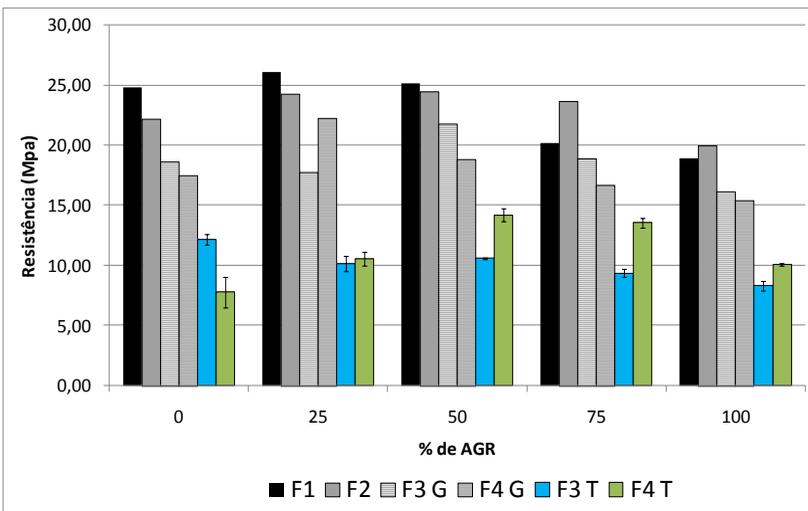


Figura 34 – Resultados de resistência à compressão em argamassa

Houve uma determinada tendência, para todas as amostras, de elevação e posterior diminuição da resistência à compressão. Este comportamento pode estar relacionado com um efeito microfíler inicial, o qual provoca um melhor empacotamento das partículas. Em determinado ponto, a absorção capilar passaria a exercer maior influência, causando queda de resistência.

Nas amostras F3 T (15% de fíler calcário e *Tecflow 7000*) e F4 T (15% de fíler de AGR e *Tecflow 7000*) foi observado o comportamento de decréscimo de resistência com relação às amostras contendo Glenium SP em torno de 50%. Isto pode estar relacionado a alguma incompatibilidade do superplastificante com o tipo de cimento utilizado.

Em observação aos desvios-padrão apresentados na figura, para as amostras F3 T e F4 T, é possível verificar que praticamente todas amostras permaneceram dentro de um limite de valores, não havendo diferenças exacerbadas entre as resistências alcançadas.

13.5 Resultados dos ensaios em concreto

Durante os estudos em concreto auto-adensável, foram realizados diversos ensaios, dentre os quais: ensaio de espalhamento (*slump flow*), ensaio de segregação, ensaio de massa específica no estado fresco, ensaio de resistência à compressão, ensaio de absorção capilar e ensaio de retração.

13.5.1 Ensaio no estado fresco

A Tabela 21 demonstra os resultados do ensaio de espalhamento e de massa específica para os concretos executados, assim como suas respectivas demandas de aditivos. O “W” presente na mesma tabela é referente ao agente promotor de viscosidade, a base de metilcelulose. O seu percentual é calculado com base na massa de material seco total.

Tabela 21 – Características dos concretos no estado fresco

AGR (%)	Fíler	Fíler AGR	W (%)	SP (%)	x	d1 (mm)	d2 (mm)	dm (mm)	γ_1 (g/cm ³)	γ_2 (g/cm ³)	γ_m (g/cm ³)
	calcário (%)	(%)									
0	15	0	0,01	1	0,6	520	530	525,0	1,89	1,91	1,90
	0	15	0	1,2	0,6	540	530	535,0	2,13	2,14	2,14
25	15	0	0	1,2	0,6	630	600	615,0	2,11	2,05	2,08
	0	15	0	1,4	0,6	660	640	650,0	1,99	2,02	2,01
50	15	0	0	1,6	0,6	680	680	680,0	2,07	1,91	1,99
	0	15	0	1,6	0,6	630	620	625,0	2,04	2,03	2,03
75	15	0	0	1,6	0,6	680	690	685,0	1,96	2,00	1,98
	0	15	0	1,6	0,6	600	610	605,0	1,86	1,88	1,87
100	15	0	0	1,6	0,6	630	640	635,0	1,81	1,83	1,82
	0	15	0	1,8	0,6	610	620	615,0	1,84	1,84	1,84

Na Figura 35 observa-se o aumento da necessidade de aditivo superplastificante, para uma dada trabalhabilidade (espalhamento no ensaio de *slump flow*), conforme o aumento do teor de substituição de

areia natural por agregado reciclado miúdo. Além disso, nota-se também o aumento de aditivo, na maioria dos casos, para as amostras onde foi utilizado filer de AGR no lugar de filer calcário.

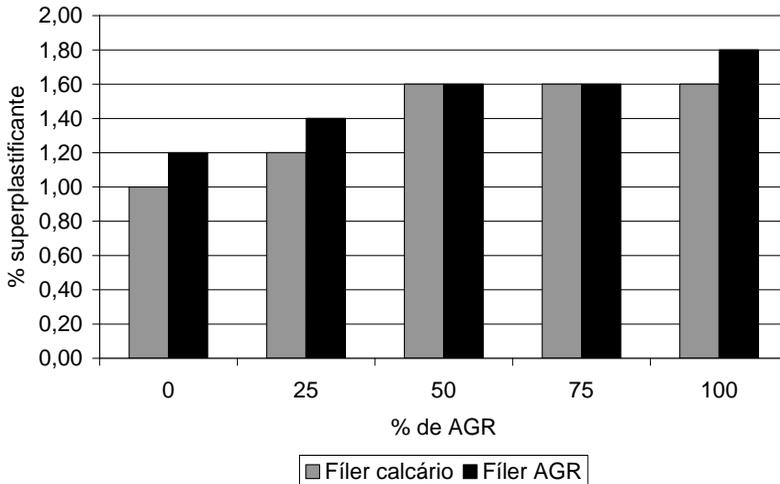


Figura 35 – Teores de aditivos para concreto auto-adensável com incorporação de AGR

Durante o ensaio de espalhamento, também foi verificada a ocorrência de segregação e exsudação, entretanto, apenas de forma visual. Verificou-se que quanto maior o percentual de substituição utilizado, menor era a presença de ambos. Todavia, para teores elevados (75% e 100%) o aumento da viscosidade elevou-se de tal maneira, que acabava causando o aumento do tempo de escoamento, mesmo com a adição de altos percentuais de aditivo superplastificante.

Na amostra de referência, contendo filer calcário, foi necessária a utilização de um agente promotor de viscosidade, denominado de *Methocel*. Tal agente promoveu um aumento na viscosidade do material, evitando, conseqüentemente, a segregação e a exsudação do mesmo. Porém, o *Methocel* provocou um aumento na quantidade de ar incorporado, perceptível visualmente, e comprovado através do ensaio de massa específica no estado fresco, o qual demonstrou uma queda na mesma.

Tabela 22 – Resultados do ensaio de segregação

Amostra	Anel sup	Anel int	Anel inf	Mmédia	S	Coe. Var
F3 REF T	181,8	231,1	253,6	222,2	36,7	16,5
F4 REF T	193,2	227,5	251,8	224,2	29,4	13,1
F3 AGR25 T	205,4	250,4	258,5	238,1	28,6	12,0
F4 AGR25 T	211,9	258,0	240,3	236,7	23,3	9,8
F3 AGR50 T	193,8	233,4	265,3	230,8	35,8	15,5
F4 AGR50 T	209,9	233,4	231,9	225,1	13,2	5,8
F3 AGR75 T	238,4	220,5	246,8	235,2	13,4	5,7
F4 AGR75 T	223,7	205,3	226,1	218,4	11,4	5,2
F3 AGR100 T	205,4	213,5	227,7	215,5	11,3	5,2
F4 AGR100 T	207,4	207,5	211,8	208,9	2,5	1,2

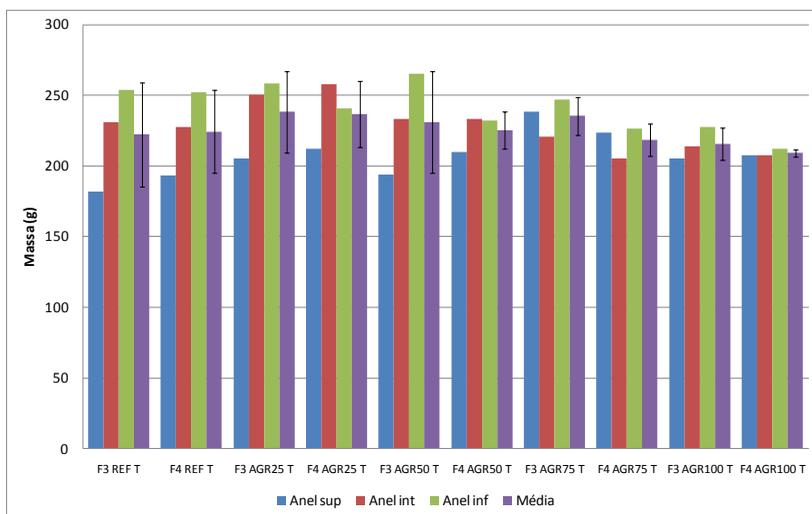


Figura 36 – Resultados do ensaio de segregação em concreto

A Figura 36 e a Tabela 22 apresentam os resultados obtidos no ensaio de segregação do concreto. Através de análise, verificou-se a diminuição da diferença entre as massas retidas nos anéis superior, intermediário e inferior do aparato, conforme o aumento da substituição de agregado natural por AGR. Tal comportamento está intimamente ligado com o aumento da viscosidade verificado durante o ensaio de espalhamento, onde constatou-se uma maior estabilidade das misturas.

Para este ensaio não foram determinados limites quantitativos da diferença entre massas de agregado graúdo retido nos diferentes anéis. O ensaio foi utilizado apenas como complemento, para constatar graficamente se o aumento do teor de AGR provocaria alguma

influência no efeito de segregação. Através do gráfico é possível visualizar a diminuição do desvio padrão das médias de cada amostra, comprovando assim, a diminuição da segregação com o aumento do teor de agregado reciclado. Também é possível verificar a influência positiva do filer de AGR. Este foi mais eficaz no combate a segregação do que o filer calcário

Na Figura 37 são apresentadas as massas específicas dos concretos no estado fresco. De acordo com o disposto na mesma, é possível verificar uma queda, quase linear, da massa, conforme o aumento do percentual de AGR nas misturas. O único caso fora do comportamento foi a amostra de referência com filer calcário, a qual necessitou a incorporação de um AMV para que fosse combatida a segregação, uma vez que apenas o filer calcário presente não foi suficiente. O AMV utilizado além de aumentar a viscosidade, promoveu uma queda na massa específica. A hipótese para tal, é de que tenha ocorrido maior aprisionamento de ar na mistura, devido a incorporação do agente promotor de viscosidade. O decréscimo na massa específica é justificado pela massa específica inferior do agregado reciclado ($2,43 \text{ g/cm}^3$ diante de $2,60 \text{ g/cm}^3$ da areia natural).

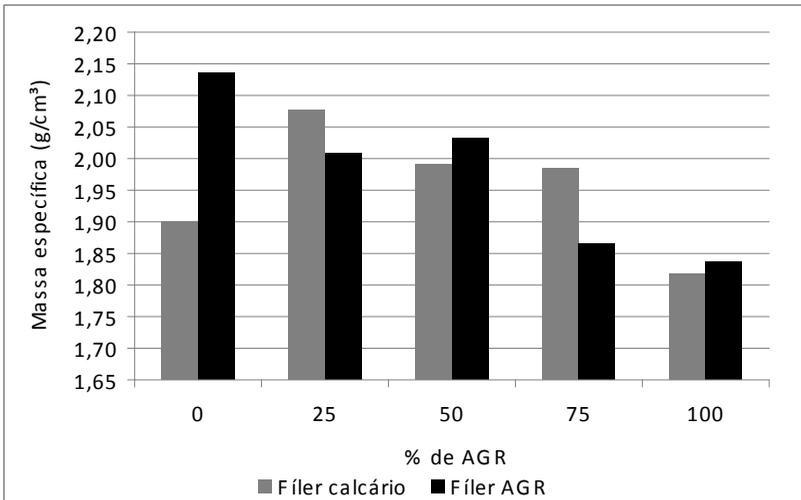


Figura 37 – Resultados de massa específica dos concretos

13.5.2 Ensaio de resistência à compressão

Os resultados do ensaio de resistência à compressão são apresentados na Tabela 23 e na Figura 38. A partir destes, é possível

visualizar que a resistência para ambas amostras (com filer calcário ou filer de AGR) tende a ter um acréscimo até determinado percentual de substituição de agregados, havendo posteriormente uma queda da resistência, repetindo o comportamento visualizado nas argamassas.

Tabela 23 – Resultados de resistência à compressão em concretos

Amostra	CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	Resist. (MPa)	S	C.V.
F3 REF T	5,79	6,42	5,73	5,98	0,38	6,39
F4 REF T	8,30	8,24	7,5	8,01	0,45	5,58
F3 AGR25 T	9,10	9,08	9,11	9,10	0,01	0,15
F4 AGR25 T	7,73	8,97	7,24	7,98	0,89	11,17
F3 AGR50 T	10,56	10,72	9,57	10,29	0,63	6,08
F4 AGR50 T	10,63	9,39	9,70	9,91	0,65	6,54
F3 AGR75 T	xxxx	11,63	8,46	10,05	2,24	22,33
F4 AGR75 T	8,75	10,15	9,13	9,34	0,72	7,73
F3 AGR100 T	6,93	8,55	7,51	7,66	0,82	10,72
F4 AGR100 T	9,96	8,85	9,13	9,31	0,57	6,15

Para as amostras com filer calcário, houve um pico de resistência para o teor de substituição de 50% de agregado reciclado, assim como, utilizando o filer de AGR como adição mineral, obteve-se também o pico de resistência em 50% de substituição. Para ambos, após esse pico, houve decréscimo na resistência à compressão.

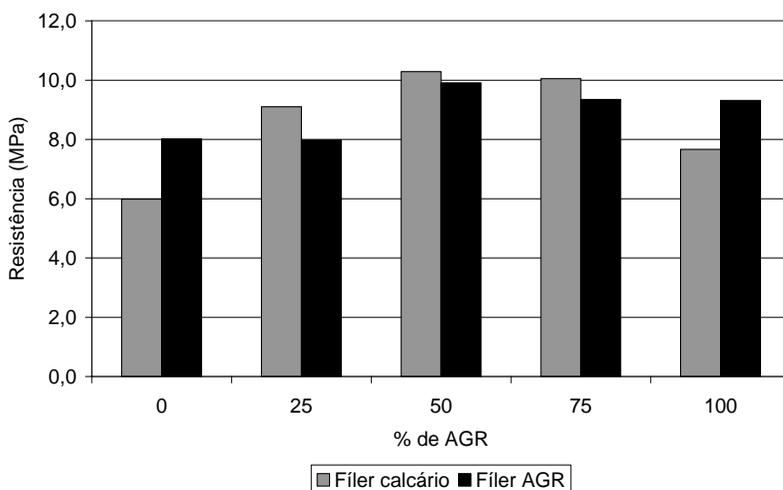


Figura 38 – Resistência à compressão dos concretos

A hipótese para tal comportamento é de que até determinado ponto, tanto a adição mineral quanto a incorporação de AGR provoque um melhor empacotamento das partículas, causando uma diminuição na porosidade da matriz e fazendo com que haja um ganho de resistência. Em determinado momento, a porosidade do material granular (principalmente o agregado reciclado) acaba exercendo maior influência sobre a resistência do que o efeito de empacotamento.

As baixas resistências alcançadas podem ser estar atreladas à uma incompatibilidade entre o aditivo superplastificante (*Tecflow 7000*) e o cimento (CP II F - 32), assim como percebido no estudo em argamassas, aonde houve uma queda brusca na resistência (em torno de 50%), quando comparadas as argamassas com mesmo traço, porém com aditivos diferentes.

13.5.3 Ensaio de absorção capilar

A partir dos resultados obtidos no ensaio de absorção capilar de concretos, baseado na NBR 9779/1995, é possível realizar algumas considerações.

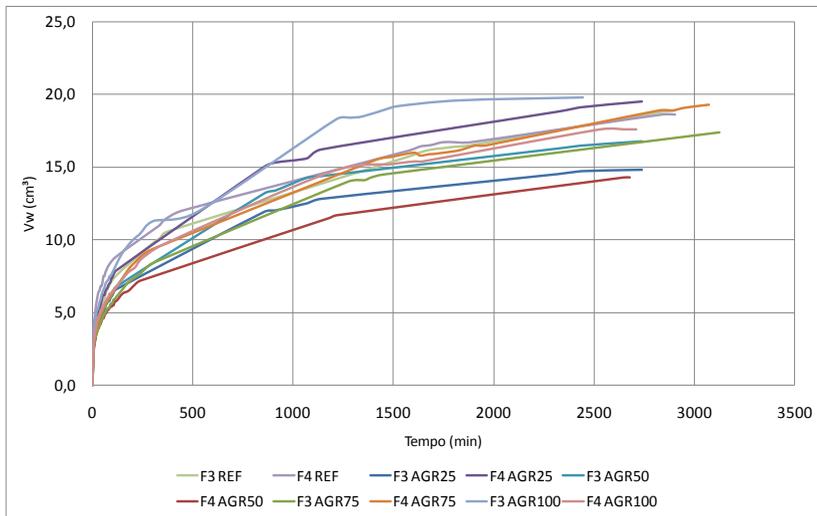


Figura 39 – Resultados do ensaio de absorção capilar em concretos

Ao contrário do verificado por Pedrozo (2008), onde o aumento de substituição de agregado natural por agregado reciclado gerou um acréscimo na absorção capilar do material, no presente trabalho, os

resultados sofreram variações, intercalando aumento e decréscimo da absorção capilar dos concretos. Assim, ao contrário de Pedrozo (2008), no presente trabalho foi prevista a absorção dos agregados, recalculando-se a quantidade de água total da mistura, além do uso de aditivo superplastificante, ausente no referido trabalho.

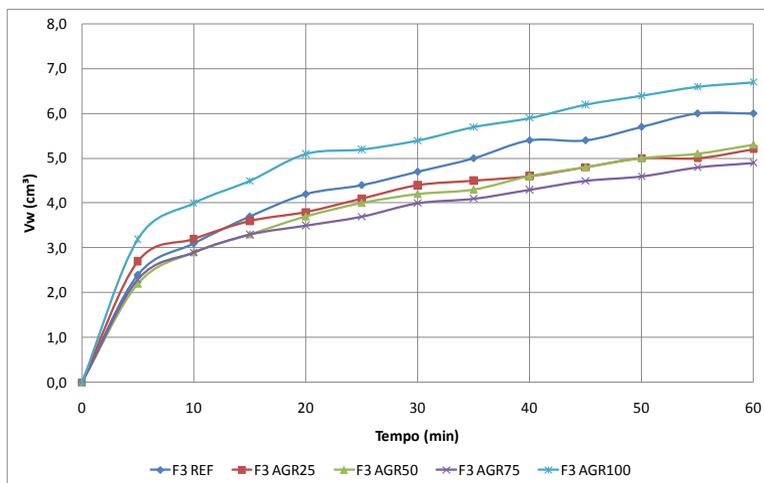


Figura 40 – Absorção capilar das amostras com fíler calcário durante a primeira hora

Na Figura 40 é possível verificar durante a primeira hora de ensaio, que a referência obteve uma maior absorção capilar que as misturas contendo agregado reciclado. Havendo assim, uma queda até o teor de substituição de 75%, voltando a aumentar para a amostra com 100% de AGR. Neste caso são analisados apenas os concretos com fíler calcário. Já as amostras com fíler de AGR têm seus resultados demonstrados na Figura 41. Nesta observa-se que a absorção capilar da referência encontra-se em um valor superior às outras misturas. De maneira análoga aos concretos com fíler calcário, houve um decréscimo nos valores de acordo com o aumento de incorporação de AGR e seguida, um aumento para teores maiores de substituição.

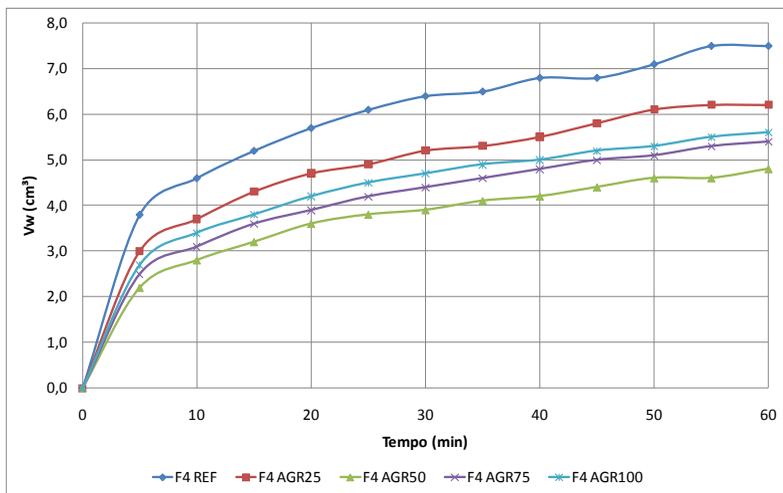


Figura 41 – absorção capilar das amostras com fíler de AGR, durante a primeira hora

Em análise aos resultados de sorptividade, nota-se uma diminuição da mesma para as amostras com incorporação de agregado reciclado e fíler calcário, com relação ao traço de referência, com um valor mínimo para o traço F3 AGR75.

Para os concretos com fíler de AGR, todas as amostras incorporando agregado reciclado, apresentaram sorptividade inferior à referência, com valor mínimo para o traço F4 AGR50. Após esse decréscimo, a sorptividade voltou a aumentar, conforme o teor de incorporação de AGR.

Apesar de apresentar uma absorção maior que a areia natural, o agregado reciclado, por ter sido utilizado no estado saturado, não apresentou uma influência direta sobre a absorção capilar nos concretos.

Tabela 24 – Resultados do ensaio de absorção capilar

Amostra	δ_{ap} (g/cm ³)	Água total absorvida (g)	Sorptividade S (g/cm ² /√t)
F3 REF	0,024	18,9	0,0045
F4 REF	0,026	18,6	0,0044
F3 AGR25	0,019	14,8	0,0036
F4 AGR25	0,022	19,5	0,0047
F3 AGR50	0,024	16,8	0,0041
F4 AGR50	0,028	14,3	0,0035
F3 AGR75	0,025	17,4	0,0040
F4 AGR75	0,027	19,3	0,0044
F3 AGR100	0,028	19,8	0,0051
F4 AGR100	0,025	17,6	0,0043

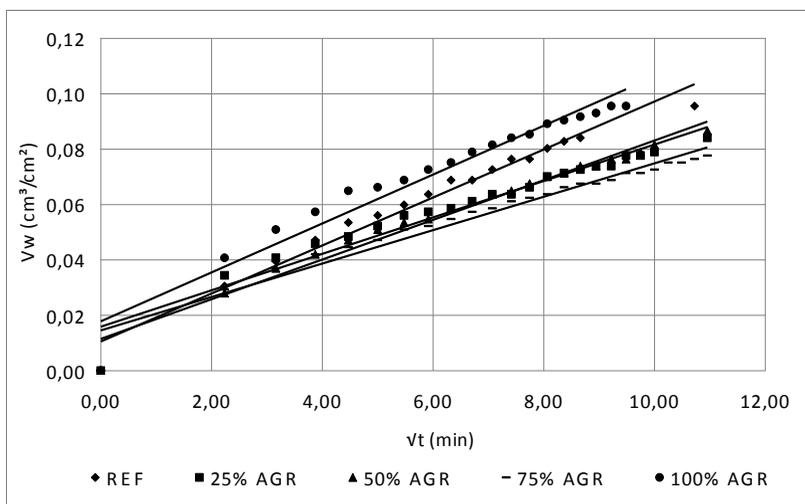


Figura 42 – Sorptividade das amostras de concreto com filer calcário

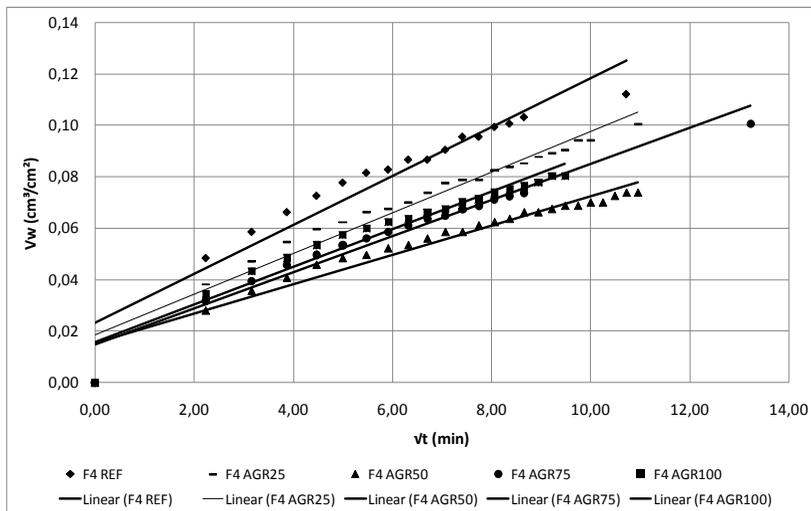


Figura 43 – Sorptividade das amostras de concreto com fíler de AGR

Na referência F3, houve uma queda da absorção quando comparada com a referência F4. A utilização do agente promotor de viscosidade e o conseqüente aprisionamento de ar, pode ter influenciado esse comportamento. As equações dos gráficos e os R^2 correspondentes a cada linha de tendência dos gráficos de sorptividade são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 – Equações e R^2 das retas de sorptividade

Amostra	Equação da reta	R^2
F3 REF	$y = 0,0087x + 0,0105$	0,973
F4 REF	$y = 0,0095x + 0,0232$	0,9137
F3 AGR 25	$y = 0,0066x + 0,0159$	0,9475
F4 AGR 25	$y = 0,0079x + 0,0183$	0,9495
F3 AGR 50	$y = 0,0072x + 0,0115$	0,9738
F4 AGR 50	$y = 0,0057x + 0,0153$	0,9425
F3 AGR 75	$y = 0,006x + 0,0145$	0,9568
F4 AGR 75	$y = 0,007x + 0,0147$	0,9538
F3 AGR 100	$y = 0,0088x + 0,0178$	0,9442
F4 AGR 100	$y = 0,0073x + 0,0157$	0,9371

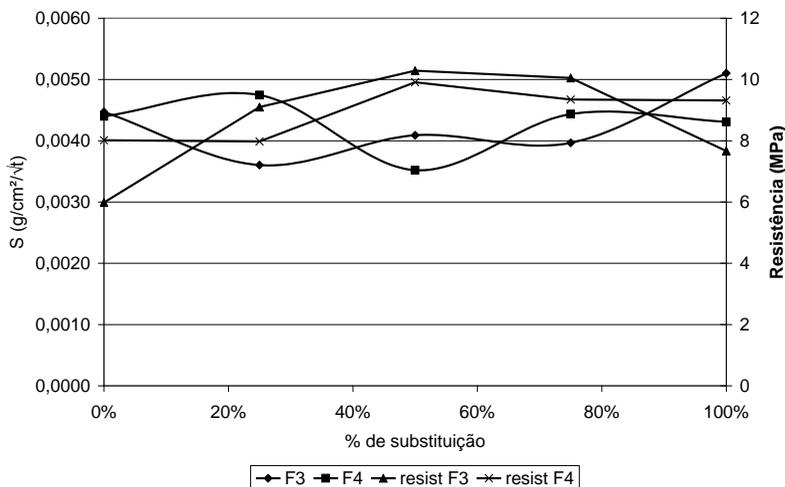


Figura 44 – Relação entre a sorptividade e a resistência à compressão

A partir do disposto na Figura 44 é possível verificar que houve uma inversão no comportamento dos concretos com filer calcário para os com filer de AGR, com relação à sorptividade. Conseguiu-se verificar uma relação entre a diminuição da resistência de acordo com o aumento da sorptividade, assim como o aumento da resistência com a diminuição de S. Isso pode ser explicado uma vez que a maior porosidade do concreto provoca a diminuição da resistência à compressão.

13.5.4 Ensaio de retração por secagem

Após passarem pelos ajustes e alcançarem as propriedades auto-adensáveis, foram realizadas novas misturas reproduzindo os traços atingidos. Essas amostras foram submetidas ao ensaio de retração por secagem, o qual avaliou o empenamento das peças, a retração longitudinal e a perda de massa das amostras.

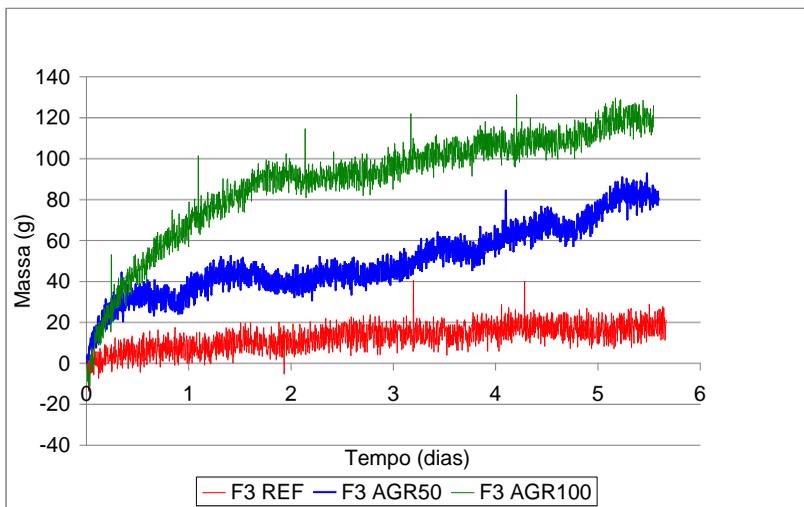


Figura 45 – Perda de massa das amostras com fíler calcário

Os resultados ilustrados na Figura 45 demonstram que houve uma maior perda de massa conforme se elevou o teor de agregado reciclado. Através do gráfico não é possível estabelecer valores exatos da perda de água por evaporação, nas primeiras horas, uma vez que houve variação nas leituras devido à trepidação da bancada por agentes externos. Entretanto, após cinco dias de ensaio, é possível estimar uma quantidade de água evaporada.

Na Figura 46, os resultados demonstram uma inversão no comportamento da perda de massa. Enquanto nas amostras contendo fíler calcário houve maior perda de massa conforme o aumento de AGR, nas amostras com fíler de AGR o resultado foi o contrário, havendo diminuição da perda de massa conforme o aumento do percentual de agregado reciclado.

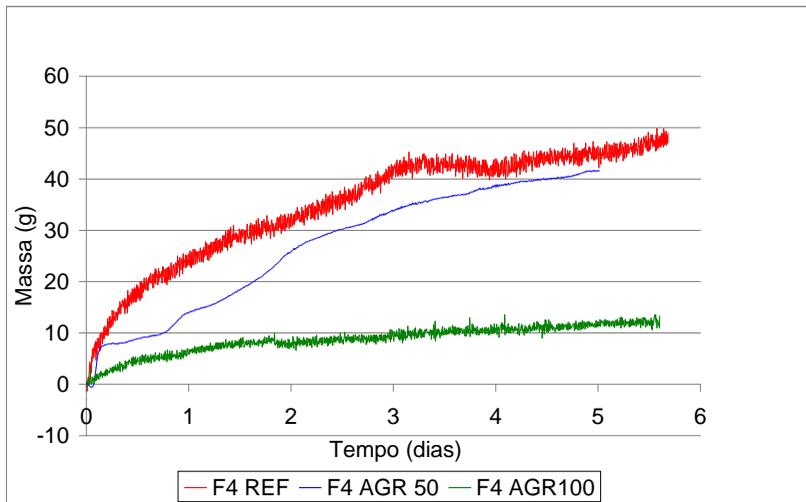


Figura 46 – Perda de massa das amostras com filer de AGR

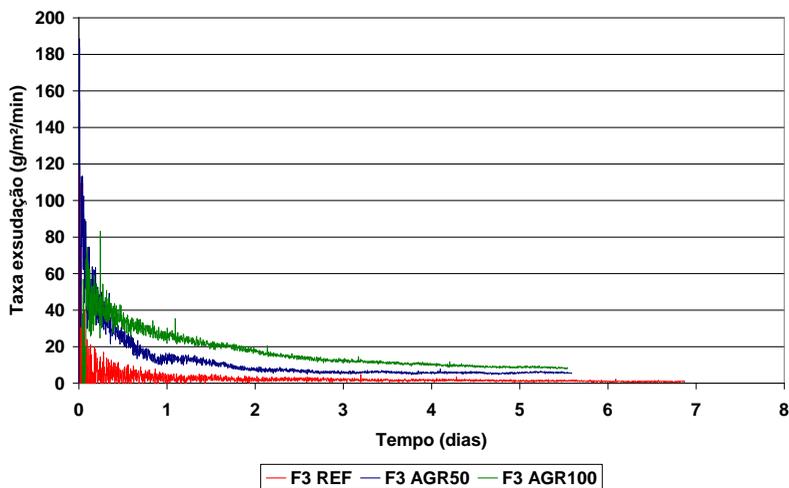


Figura 47 – Taxa de exsudação das amostras com filer calcário

Assim como a perda de massa, é possível verificar o aumento da taxa de exsudação das amostras com filer calcário, conforme o aumento do percentual de substituição de areia natural por AGR. Nas amostras com filer de AGR, o comportamento foi similar à perda de massa.

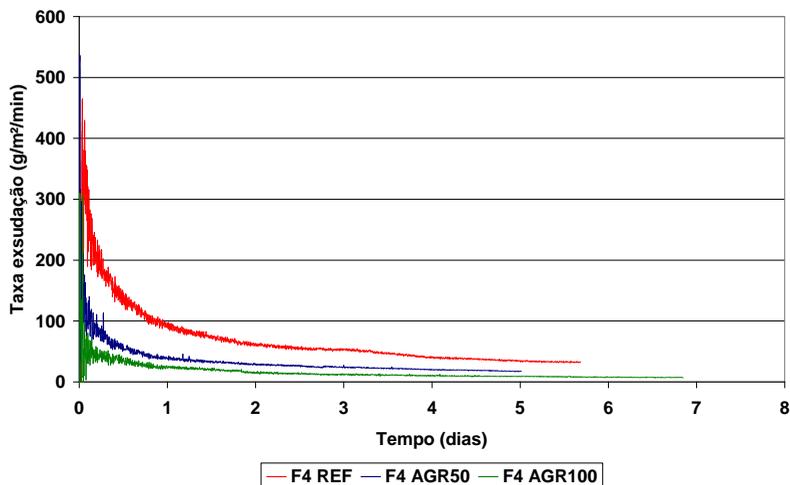


Figura 48 – Taxa de exsudação das amostras com fíler de AGR

De acordo com o disposto na Figura 49, é possível verificar que nas amostras contendo fíler calcário como adição mineral, houve um acréscimo na retração de acordo com o aumento do percentual de agregado reciclado utilizado. Entretanto, foi percebido que as amostras com 50% e 100% de AGR atingiram níveis próximos de retração aos 5 dias de idade ($\approx 70\mu\text{m/m}$).

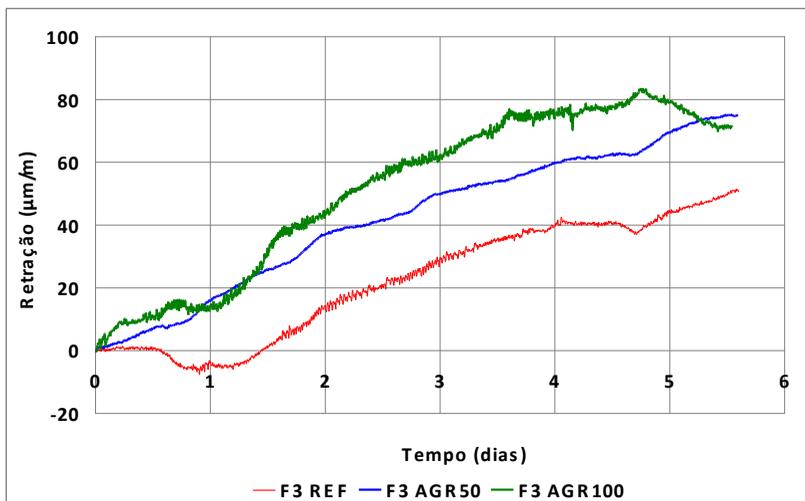


Figura 49 – Retração por secagem: amostras com filer calcário

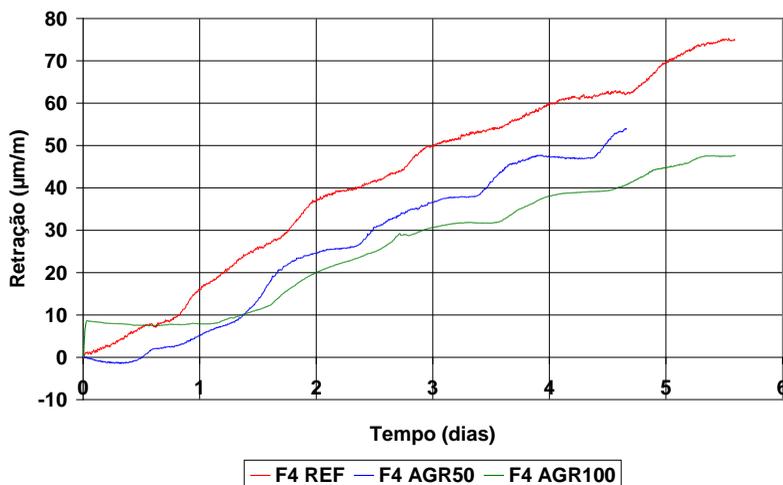


Figura 50 – Retração por secagem: amostras com filer de AGR

Nas amostras contendo filer de AGR foi percebido um valor próximo dos valores de retração para as amostras com filer calcário. Assim como na perda de massa, houve na retração uma inversão dos valores, ocorrendo uma diminuição da retração de acordo com a incorporação de AGR às misturas.

Pedrozo (2008), verificou em seus estudos um aumento da retração conforme o acréscimo de AGR nas misturas. Todavia, o autor não trabalhou prevendo a absorção de água dos agregados reciclados e corrigindo-a, assim como executado no presente estudo. A previsão da água absorvida, na atual pesquisa, foi optada por se tratar de um concreto com alta fluidez. Assim, caso não fosse repostada a água, parte da água de hidratação do cimento seria absorvida, demandando maior quantidades de aditivo superplastificante.

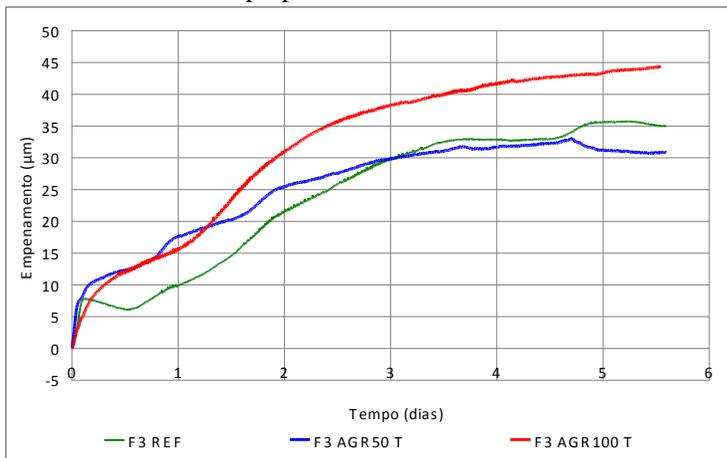


Figura 51 – Empenamento médio das amostras contendo fíler calcário

O fenômeno de empenamento das amostras, causado pela retração diferencial entre o topo e o fundo da placa seguiu praticamente o mesmo comportamento verificado para a perda de massa e para a retração, ou seja, nas amostras contendo fíler calcário houve aumento do empenamento conforme o agregado natural era substituído pelo agregado reciclado, com exceção para as amostras F3 REF e F3 AGR50, onde, próximo aos 5 dias de idade os valores de ambos se cruzaram seguido da inversão de valores.

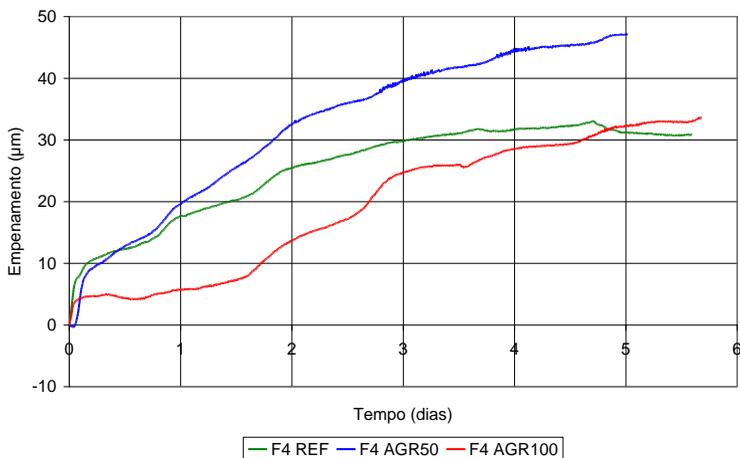


Figura 52 – Empenamento médio das amostras contendo fíler de AGR

Já nas amostras contendo fíler de AGR, foi visualizado a mesma inversão de comportamento verificado na perda de massa e na retração. Entretanto, foi verificado um maior empenamento para F4 AGR50 do que na amostra de referência.

A Figura 53 e a Figura 54 demonstram a correlação feita entre a perda de massa e a retração por secagem das amostras. Ambas apresentam boas correlações, apresentando um valor de R^2 em torno de 0,93 para ambas e demonstrando que independente do acréscimo ou decréscimo na retração conforme o tipo de fíler utilizado essas propriedades são dependentes uma da outra.

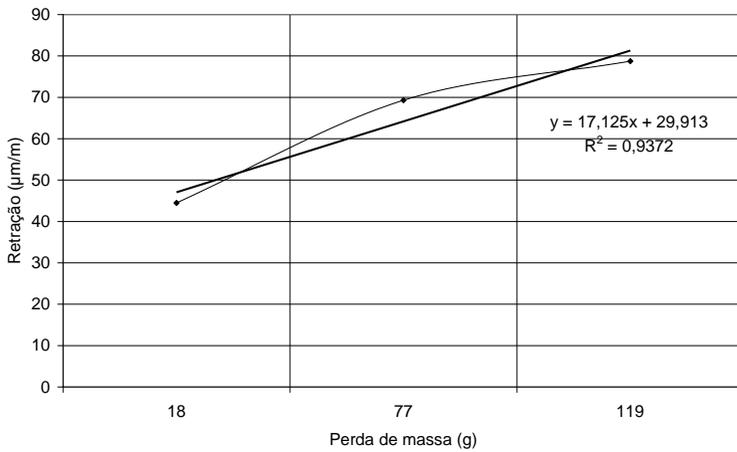


Figura 53 – Correlação: perda de massa x retração (amostras com fíler calcário)

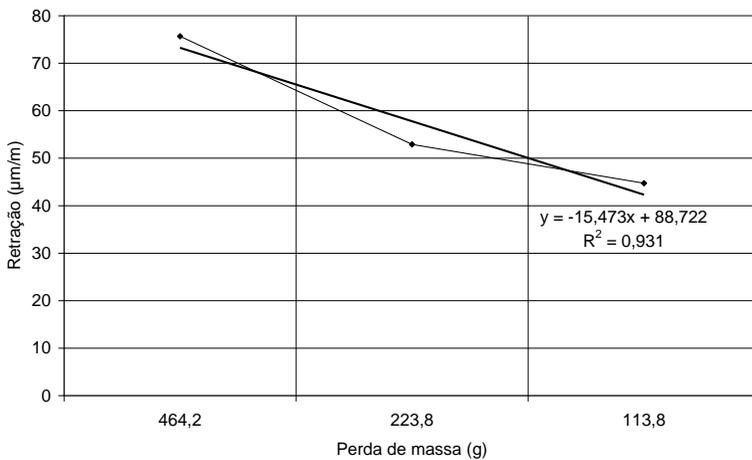


Figura 54 – Correlação: perda de massa x retração (amostras com fíler de AGR)

14. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização, nesta pesquisa, de resíduo de construção e demolição, tanto na forma de agregado reciclado, quanto na forma de fíler, possibilitou a obtenção de um primeiro entendimento do efeito destes materiais sobre o comportamento de retração por secagem.

Os resultados obtidos no estudo de demanda de água nos filers podem estar ligados à hipótese de que as partículas de tamanho inferior do fíler calcário, com relação ao fíler de AGR, tenha sido provavelmente, a causa de um fechamento dos poros do material reciclado, diminuindo a absorção de água desse material. Todavia, ainda faltam parâmetros que possam validar tal hipótese como teoria. Imagens pormenorizadas (em escala) que identifiquem a forma e a real diferença de diâmetro dos finos poderão auxiliar na confirmação dessa hipótese.

Com relação aos estudos realizados em pastas, argamassas e concretos é possível afirmar que a utilização do fíler de AGR no lugar do fíler calcário mostrou maior eficácia no combate à exsudação e à segregação. Mesmo apresentando partículas com diâmetros superiores, o material foi eficiente como promotor de viscosidade, aumentando, em todos os casos, a viscosidade da matriz. Assim, o material apresenta grande potencial de exploração, devendo, inclusive, receber maior atenção em pesquisas futuras.

Em contrapartida, sugere-se a precaução na utilização do fíler de AGR, já que as amostras contendo-o demandaram maiores quantidades de aditivo superplastificante. Essas quantidades superiores de SP, como analisadas em ensaio de calorimetria semi-adiabática, causaram um retardo demasiado nos tempos de início e fim de pega da matriz cimentícia. Desta forma, uma saída para a diminuição do teor de aditivo é o aumento do percentual de pasta de cimento, o que levaria a uma maior lubrificação interpartículas. Porém seria uma medida não econômica e, muito menos, ambientalmente correta.

Vale frisar que o AGR, tanto em formato de fíler, quanto em formato de agregado, é um material de composição variável, sendo dependente do tipo de construção do qual é proveniente.

Os altos teores de aditivo SP estão relacionados não apenas com a incorporação de RCD, mas também pelo formato das partículas da areia natural e do agregado graúdo. Em análise das imagens microscópicas, verificou-se o formato bastante angular dos grãos de areia, o que leva a um aumento da área superficial dos mesmos. O agregado graúdo disponível possui formato lamelar, fazendo com que um teor de pasta elevado seja necessário. Assim, caso fossem utilizados agregados com melhores

características físicas, provavelmente para o mesmo teor de argamassa, seriam necessárias quantidades inferiores de superplastificante.

A utilização do RCD na forma de agregado apresentou uma influência linear sobre a massa específica das argamassas e concretos, como era esperado, pelo fato do AGR possuir menor massa específica que a areia natural. Em alguns casos, o comportamento de elevação da massa específica até determinado teor de substituição e posterior decréscimo está, provavelmente atrelado ao efeito de empacotamento das partículas. Todavia, em determinado momento, a porosidade do agregado reciclado exerce maior influência sobre a massa específica dos compostos cimentícios, do que o efeito de empacotamento.

Sobre a resistência à compressão em argamassas e concretos, o comportamento foi similar ao da massa específica, onde até determinado teor de substituição o AGR promoveu um ganho de resistência, com posterior queda da mesma. Atribui-se a esse fato a mesma relação com o efeito de empacotamento das partículas, seguido da influência da porosidade dos grãos de agregado reciclado, não sendo possível estabelecer uma relação direta entre aumento de AGR e queda de resistência. Entretanto, sugere-se um estudo mais aprofundado das propriedades hidrodinâmicas do AGR em questão, conforme sugerido por Pedrozo (2008) e Duailibe (2008), para que seja possível verificar a validade de tal hipótese.

O decréscimo de resistência do concreto, fruto da troca de aditivo superplastificante está provavelmente relacionada com alguma forma de incompatibilidade do aditivo com o cimento utilizado. Para determinar quais os fatores influenciaram essa queda, faz-se necessário um estudo muito complexo, analisando diversas variáveis como: granulometria do cimento, quantidade e reatividade do C_3A , taxa de dissolução dos sulfatos, além da composição química do aditivo e as características dos outros materiais em conjunto.

Houve, no andamento dos trabalhos, a opção de priorizar as propriedades no estado fresco. Entretanto, é necessário enfatizar que a resistência à compressão é propriedade de primeira importância, por estar se tratando de um material, que na maioria dos casos, irá desempenhar função estrutural.

Com relação ao ensaio de retração, o comportamento das amostras, tanto na perda de massa quanto na retração longitudinal e no empenamento foi influenciado pela mudança do filer calcário por filer de AGR como adição mineral. Este comportamento pode estar ligado a um rearranjo das partículas causado pelas partículas de filer de AGR. Entretanto, não foram encontrados em outros trabalhos, argumentos que pos-

sam validar esta hipótese, fazendo-se assim necessário um estudo mais detalhado do fíler de AGR, envolvendo uma análise química mais detalhada, além de imagens com maior aumento, que possibilitem visualizar a forma do material.

O agregado reciclado mostrou-se mais eficiente quando utilizado em conjunto com o fíler de AGR. Nos ensaios de retração e empenamento, as amostras combinando fíler calcário com agregado reciclado apresentaram maiores valores para ambos os parâmetros medidos.

O equipamento utilizado para o ensaio de retração e empenamento mostrou rendimento satisfatório. Todavia, alguns ajustes necessitam ainda ser realizados, com o objetivo de aprimorar o aparato, diminuindo desvios e produzindo resultados mais homogêneos.

14.1 Sugestões para trabalhos futuros

Diante dos resultados obtidos nesta pesquisa e da sua análise, notou-se que outros estudos podem dar prosseguimento e aprofundamento das questões aqui levantadas, dentre os quais:

- a realização de um estudo mais aprofundado entre a interação aditivo/cimento e aditivo/fíler, variando-se os tipos de aditivos, de cimento e tipos de fíler, através do ensaio de *mini-slump flow*;
- o aumento do tempo do ensaio de retração para até 90 dias, uma vez que se trabalhou com teores elevados de aditivo superplastificante, provocando retardo nos tempos de pega;
- a fixação de mais um transdutor de deslocamento na parte central do aparato de medição da retração da placa (no sentido vertical), visando verificar a diferença entre o empenamento das bordas com o centro da placa;
- o estudo do comportamento hidrodinâmico do material granular para melhor compreensão dos efeitos dos materiais durante o ensaio da retração e empenamento.

15. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR EB – 1763**: Aditivos para concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- _____. Agregados – Determinação da composição granulométrica. **NBR 7217**. Rio de Janeiro, 1987.
- _____. Agregado graúdo – Determinação de massa específica e massa aparente. **NBR NM53**. Rio de Janeiro, 1987.
- _____. Agregados – Determinação do teor de materiais pulverulentos. **NBR 7219**. Rio de Janeiro, 1987.
- _____. Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. **NBR 9779**. Rio de Janeiro, 1995.
- _____. Determinação dos tempos de início e fim de pega do cimento Portland. **NBR 11581**. Rio de Janeiro, 1991.
- _____. Concreto – Ensaio de compressão em corpos-de-prova cilíndricos. **NBR 5739**. Rio de Janeiro, 1994.
- ANDRADE, L. B. **Metodologia de avaliação para uso de cinzas pesadas de termelétrica como agregado natural para concreto**. 2004. 245 p. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.
- ANDRADE, L. B., ROCHA, J. C., CHERIAF, M.. **Estudo comparativo do comportamento de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados secos e saturados**. I Conferência latino-americana de construção sustentável. X Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído. São Paulo, 2004.
- ARTELT, C.; GARCIA, E.. **Impact of superplasticizer concentration and of ultra-fine particles on the rheological behaviour of dense mortar suspensions**. Cement and concrete research, v. 38 p. 633 – 642, 2008.
- ASSAAD, J.; KHAYAT, K. **Kinetics of formwork pressure drop of self-consolidating concrete containing various types and contents of binder**. Cement and concrete research, v. 35, p. 1522 – 1530, March 2005.
- BANTHIA, N., GUPTA, R.. **Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete**. Cement and concrete research, v. 36, p. 1263 – 1267, 2006.
- BOSILJKOV, V. B. **SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler**. Cement and concrete research, v. 33, p. 1279 – 1286, 2003.
- CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V.C.. **Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concre-**

- tos especiais aplicados na construção civil.** Revista Cerâmica, v. 55, p. 18 – 32, 2009.
- CHOPIN, D.; LARRARD, F.; CAZACLIU, B.. **Why do HPC and SCC require a longer mixing time?.** Cement and concrete research, v. 34, p. 2237 – 2243, Fevereiro, 2004.
- CORINALDESI, V.; MORICONI, G.. **Behaviour of cimentitious containing different kinds of recycled aggregate.** Construction and Building Materials, v. 23, p. 289 – 294, Janeiro 2009.
- COSTA, N. A. A.; COSTA Jr., N. C. A.; DETONI, M. M. L.; SELIG, P. M.; ROCHA, J. C. **A reciclagem de resíduo de construção e demolição: uma aplicação da análise multivariada.** I Conferência latino-americana de construção sustentável. X Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído. São Paulo, 2004.
- CRENTSIL, K. K. S., BROWN, T., TAYLOR, A.H.. **Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate.** Cement and concrete research, v. 31, p. 707 – 712, 2001.
- DAL MOLIN, D. C. C. **Adições minerais para concreto estrutural.** In Concreto. Ensino, pesquisa e realizações, 1ª ed, vol 1. São Paulo: IBRACON, 2005.
- DO, J.; SOH, Y. **Performance of polymer-modified self-leveling mortars with high polymer–cement ratio for floor finishing.** Cement and concrete composites, v. 33, p. 1497 – 1505, 2003.
- DOMONE, P. L. **Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies.** Cement and concrete composites, v. 28, p. 197 – 208, January 2006.
- EMOTO, T.; BIER, T. A. **Rheological behavior as influenced by plasticizers and hydration kinetics.** Cement and concrete research, v. 37, p. 647 – 654, 2007.
- ETXEBERRIA, M., VÁZQUEZ, E., MARÍ, A., BARRA, M.. **Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete.** Cement and concrete research, v. 37, p. 735 – 742, 2007.
- FELEKOGLU, B. **A comparative study on the performance of sands rich and poor in fines in self-compacting concrete.** Construction and Building Materials. October. 2006.
- FELEKOGLU, B.; TOSUN, K.; BARADAN, B.; ALTUN, A.; UYULGAN, B. **The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self-compacting repair mortars.** Cement and concrete research, v. 35, p. 1719 – 1726, April 2006.

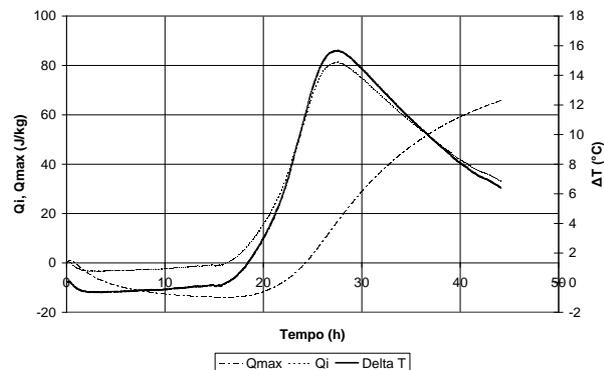
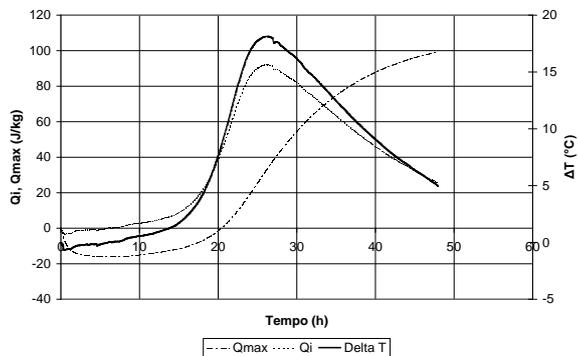
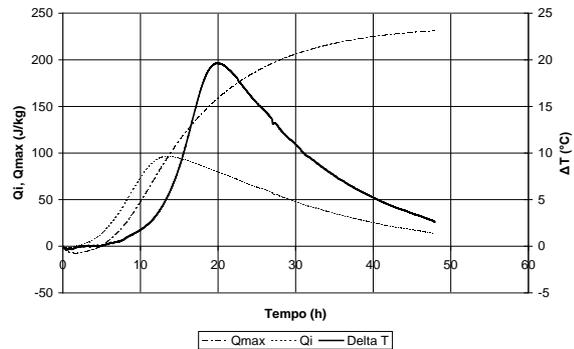
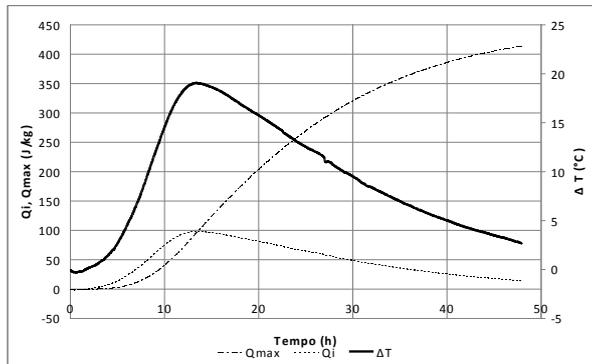
- HAQUE, M. N.; KAYALI, O. **Properties of high-strength concrete using a fine fly ash.** Cement and concrete research, v. 28, p. 1445 – 1452, July 1998.
- JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Reciclagem de resíduos da construção.** Seminário – Reciclagem de resíduos sólidos domiciliares. São Paulo, 2000.
- JOLICOEUR, C; SIMARD, M. A.. **Chemical admixture-Cement interactions: Phenomenology and physic-chemical concepts.** Cement and concrete composites, v. 20, p. 87 – 101, 1998.
- KASEMCHAIIRI, R.; TANGTERMSIRIKUL, S. **A method to determine water retainability of porous fine aggregate for design and quality control of fresh concrete.** Construction and building materials, v. 21, p. 1322 – 1334, 2007.
- LEA, F. M.. **The Chemistry of cement and concrete.** Third edition. Ed. Edward Arnold. 727 p. 1970.
- LEEMANN, A.; WINNEFELD, F.. **The effect of viscosity modifying agents on mortar and concrete.** Cement and concrete composites, v. 29, p. 341- 349. 2007.
- LEVY, S. M., HELENE, P.. **Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development.** Cement and concrete research, v. 34, p. 1975 – 1980, 2004.
- LIMBACHIYA, M.C.; MARROCCHINO, E.; KOULOURIS, A.. **Chemical-mineralogical characterization of coarse recycled concrete aggregate.** Waste management, v. 27, p. 201 – 208. 2007.
- LISBÔA, E. M. **Obtenção do concreto auto-adensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas.** 2004. 144 p. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – UFAL – Universidade Federal de Alagoas, 2004.
- MARTIN, J. F. M. **Aditivos para concreto.** In Concreto. Ensino, pesquisa e realizações, 1ª ed, vol 1. São Paulo: IBRACON, 2005.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** 1ª ed. São Paulo: PINI, 1994.
- MELO, K. A. **Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de filler calcário.** 2005. 183 p. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.
- MNAHONCAKOVA, E.; PAVIKLOVA, M.; GRZESZCZYK, S.; ROVNANIKOVA, R. C.. **Hydric, thermal and mechanical properties of self-compacting concrete containing different fillers.** Construction and building materials, v. 22, p. 1594 – 1600, 2008.

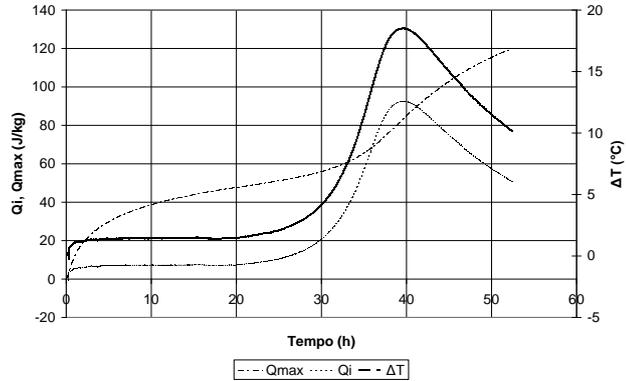
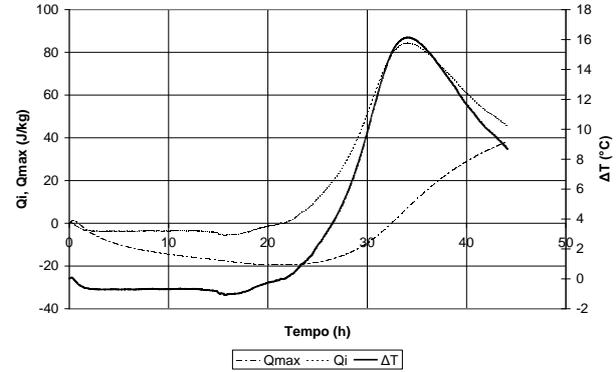
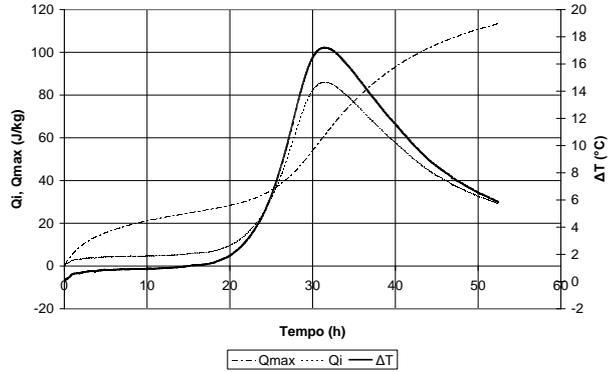
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Ed. Pini, 2ª edição. São Paulo, 1997. 828 p.
- OKAMURA, H.; OUCHI, M. **Self compacting concrete**. Journal of advanced concrete technology, v. 01, nº 01, p. 5 – 15, Abril, 2003.
- OLORUNSOGO, F. T.; PADAYACHEE, N.. **Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes**. Cement and concrete research, v. 32, p. 179 – 185, 2002.
- Cement and concrete research, v. 36, p. 1807 – 1813, 2006.
- PEDROZO, F. E. **Influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino em propriedades de argamassas e concretos**. 2008. 156 p. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.
- PÉRA, J.; AMBROISE, J. **New applications of calcium sulfoaluminate cement**. Cement and concrete research, v. 34, p. 671 – 676, 2004.
- PHAN, T. H.; CHAUCHE, M.; MORANVILLE, M. **Influence of organic admixtures on the rheological behaviour of cement pastes**.
- 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.
- POPPE, A.; SCHUTTER, G. **Cement hydration in the presence of high filler contents**. Cement and concrete research, v. 35, p. 2290 – 2299, March. 2005.
- RAIS, F.; JELIDI, A.; KAMOUN, A.; CHAABOUNI, M.; SERGENT, M.; PHAAN-TAN-LUU, R. **Use of an ellipsoidal subregion of interest in the space of mixture components to the optimization of a fluoroanhydrite-based self-leveling floor composition**. Chemometrics and intelligent laboratory systems, v. 74, p. 253 – 261, 2004.
- RAO, A.; JHA, K. N.; MISRA, S. **Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete**. Resources conservation & recycling, v. 50, p. 71 – 81, 2007.
- ROLS, S.; AMBROISE, J.; PÉRA, J. **Effects of diferents viscosity agents on the properties of self-leveling concrete**. Cement and concrete research, v. 29, n. 2, p. 261 – 266, Feb. 1999.
- SANTOS, F. I. G.; CHERIAF, M.; ROCHA, J. C. **Transferência de umidade em argamassas: estudo de caso com as cinzas pesadas**. XI Encontro nacional de tecnologia no ambiente construído. Florianópolis, 2006.

- SEALEY, B. J.; HILL, P. G. J.. **Waste management issues for the UK ready-mixed concrete industry**. Resources, Conservation and recycling, v. 32, p. 321 – 331. 2001.
- SIVAKUMAR, A., SANTHANAM, M.. **A quantitative study on the plastic shrinkage cracking in high strength hybrid fibre reinforced concrete**. Cement and concrete composites, v. 29, p. 575 – 581, 2007.
- SONEBI, M. **Rheological properties of grouts with viscosity modifying agents as diutan gum and welan gum incorporating pulverised fly ash**. Cement and concrete research, v. 36, p. 1609 – 1618, 2006.
- TAYLOR, H. F. W.. **Cement Chemistry**. Academic Press. London. 475 p. 1990.
- THE EUROPEAN FEDERATION OF SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS (EFNARC). *Specification and guidelines for self-compacting concrete*. In: EFNARC. Maio, 2005.
- TRANKLER, J. O. V.; WALKER, I.; DOHMANN, M.. **Environmental impact of demolition waste – An overview on 10 years of research and experience**. Waste management, v. 16, p. 21 – 26. 1996.
- TU, T. Y., CHEN, Y. Y., HWANG, C. L.. **Properties of HPC with recycled aggregates**. Cement and concrete research, v. 36, p. 943 – 950, 2006.
- TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis**. 2004. 149 p. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- VIEIRA, G. L.; DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo e análise de viabilidade da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. II Seminário de patologia das edificações. Porto Alegre – RS. Novembro de 2004.
- YAHIA, A.; TANIMURA, M.; SHIMOYAMA, Y. **Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio**. Cement and concrete research, v. 35, pág. 532 – 539, 2005.

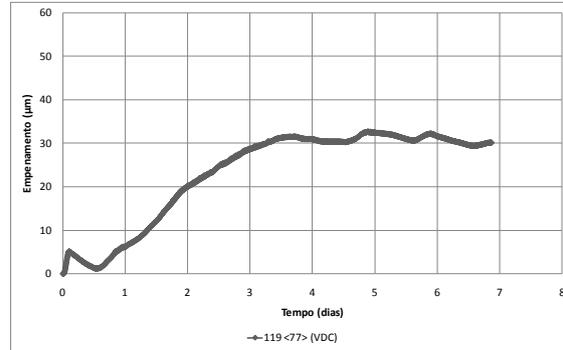
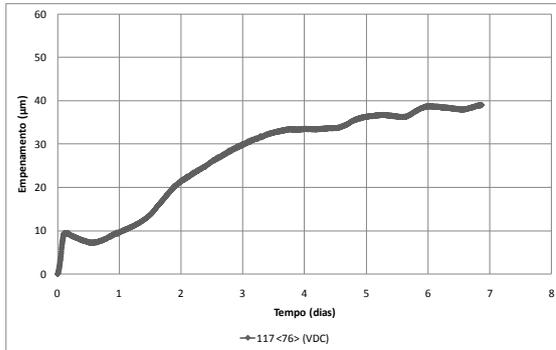
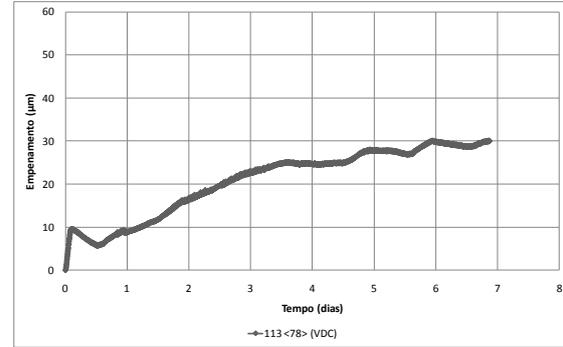
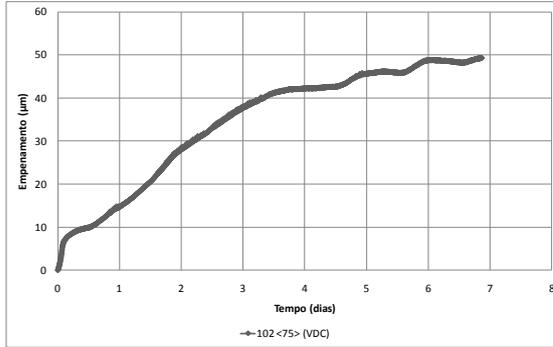
ANEXO A – Parâmetros do ensaio de calorimetria das pastas

Gráficos com os resultados de calor máximo, ΔT e Q_i , das amostras de pasta: P SP REF, P SP 0,6, P SP 0,8, P SP 1,0, P SP 1,2, P SP 1,4 e P SP 1,6.

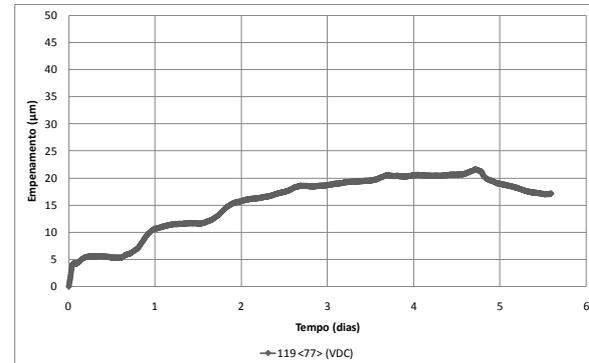
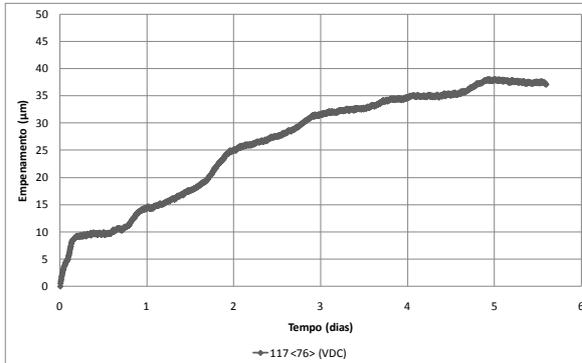
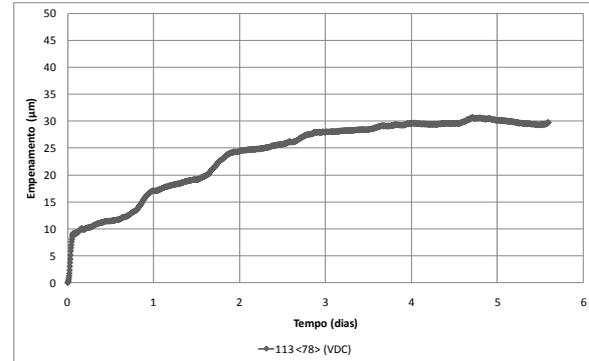
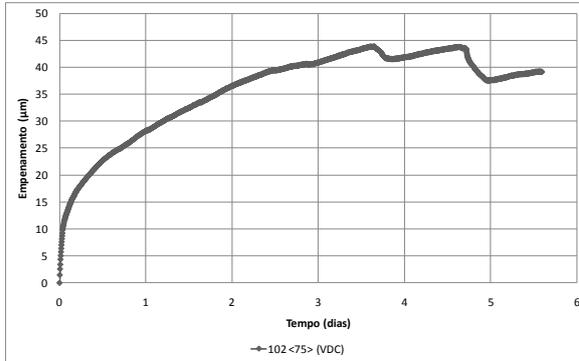




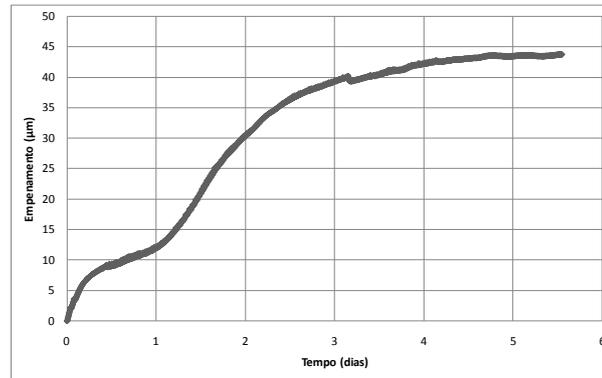
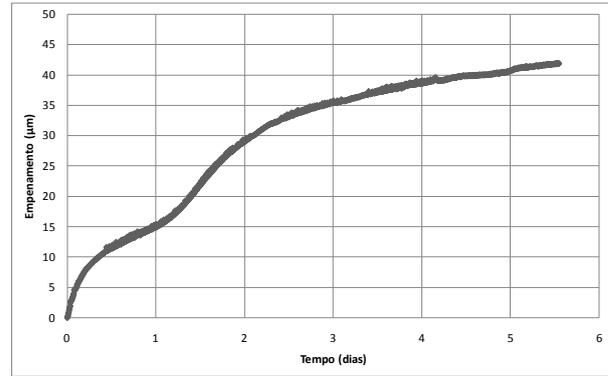
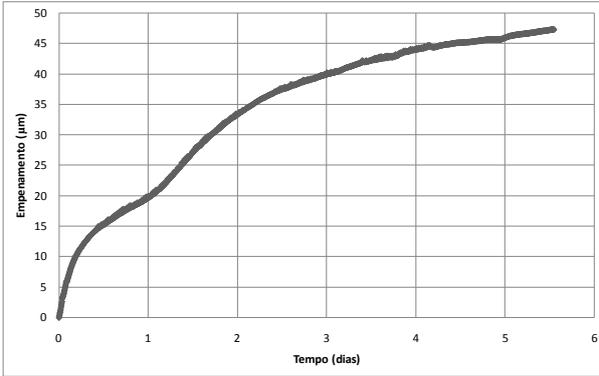
ANEXO B – Resultados dos ensaios de retração e empenamento



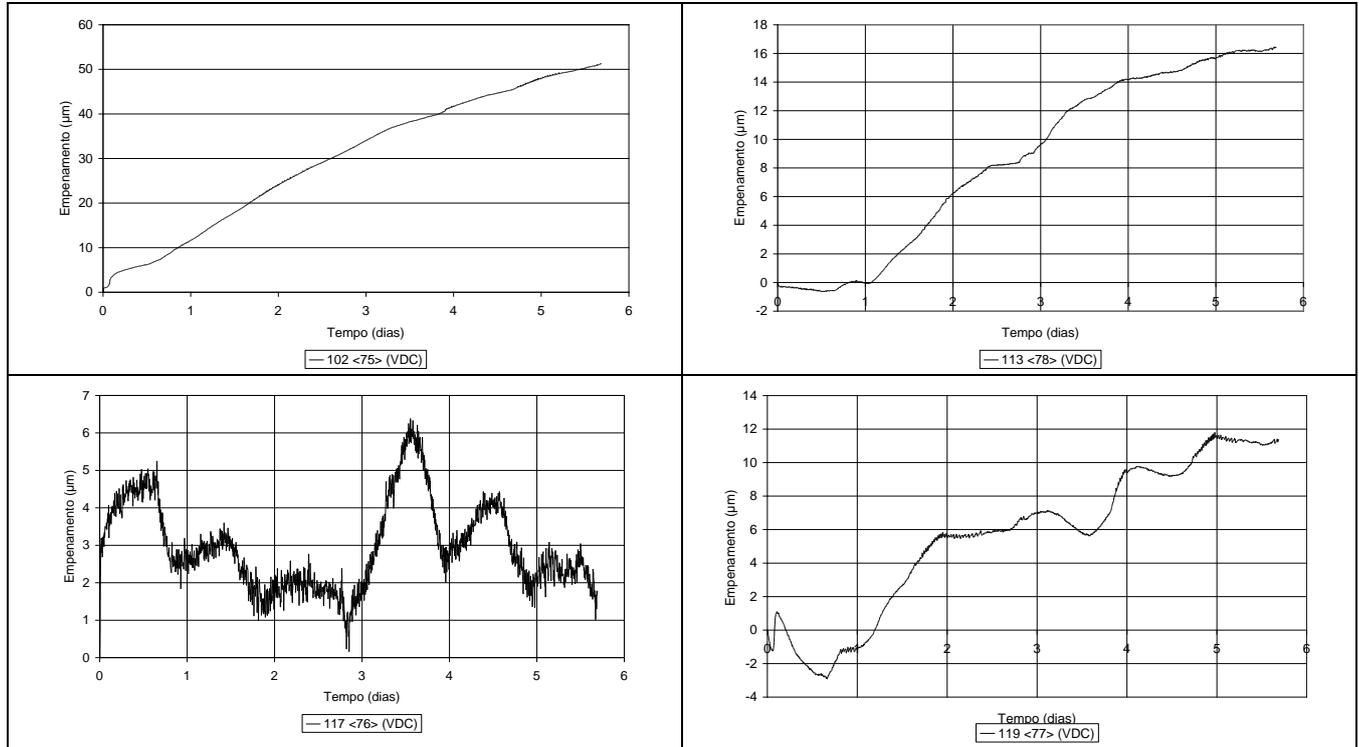
F3 REF



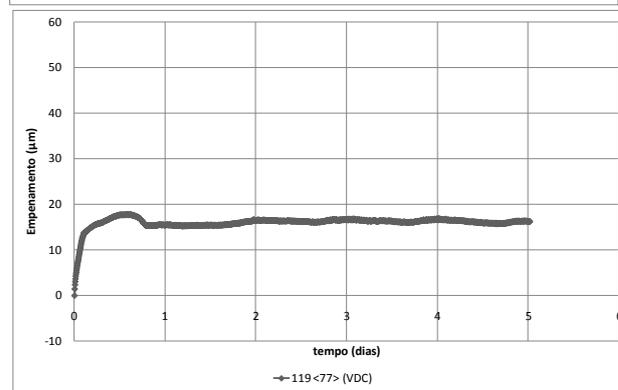
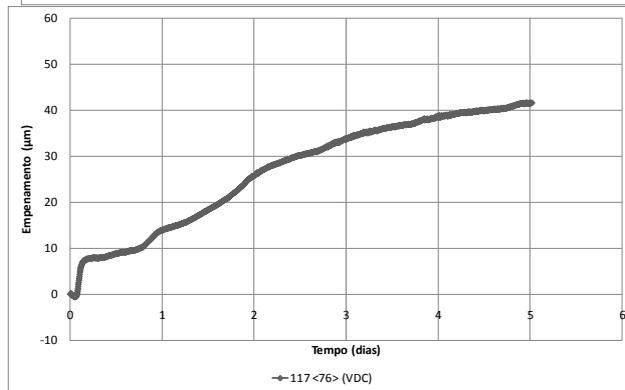
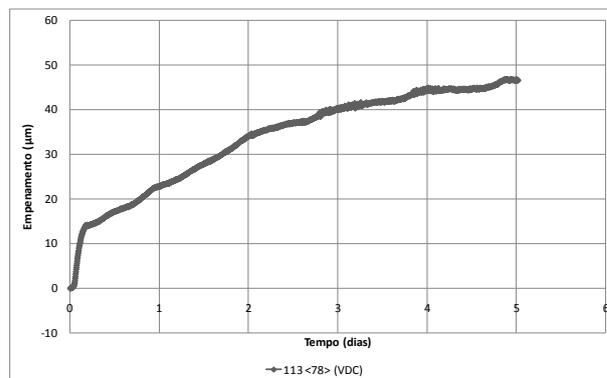
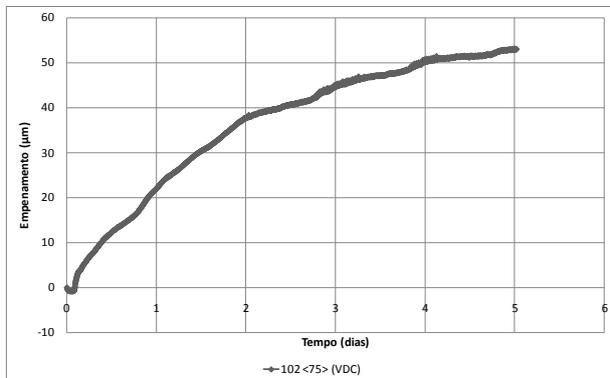
F3 AGR50



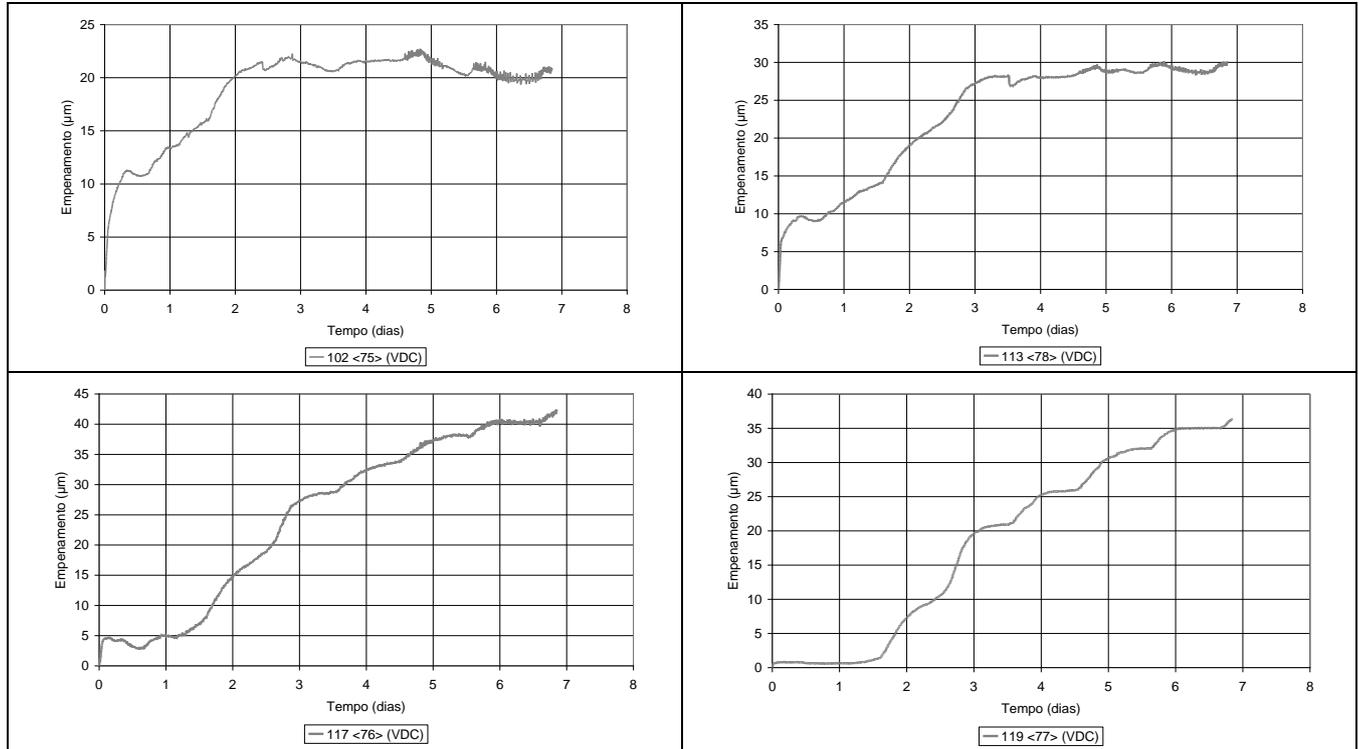
F3 AGR100



F4 REF



F4 AGR50



F4 AGR100

