



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

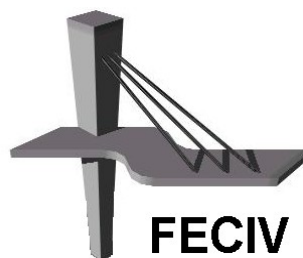
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

n.º 103

AVALIAÇÃO DE CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL COM AGREGADO RECICLADO DE TELHA CERÂMICA

WANDERLY GERALDO DA SILVA

UBERLÂNDIA, 27 DE AGOSTO DE 2012.



FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil



Wanderly Geraldo da Silva

**AVALIAÇÃO DE CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL COM
AGREGADO RECICLADO DE TELHA CERÂMICA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientador: Prof. Dr. João Fernando Dias

UBERLÂNDIA, 27 DE AGOSTO DE 2012.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ATA Nº: 103/2012

CANDIDATO: Wanderly Geraldo da Silva

ORIENTADOR: Prof. Dr. João Fernando Dias

TÍTULO: "Avaliação de concreto auto-adensável com agregado reciclado de telha cerâmica"

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Estruturas e Construção Civil

LINHA DE PESQUISA: Construção Civil

DATA DA DEFESA: 27 de agosto de 2012

LOCAL: Sala de Projeção Prof. Celso Franco de Gouvêa

HORÁRIO DE INÍCIO E TÉRMINO DA DEFESA: 9:10 - 10:45

Após avaliação do documento escrito, da exposição oral e das respostas às arguições, os membros da Banca Examinadora decidem que o candidato foi:

APROVADO

REPROVADO

OBS:

Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata que está assinada pelos membros da Banca:

Professor Orientador: **Prof. Dr. João Fernando Dias – FECIV/UFU**

Membro externo: **Prof. Dr. Eduvaldo Paulo Sichieri - USP**

Membro: **Prof. Dr. Turibio José da Silva – FECIV/UFU**

Uberlândia, 27 de AGOSTO de 2012

*Bom mesmo é ir à luta com determinação,
abraçar a vida e viver com paixão,
perder com classe e viver com ousadia.
Pois o triunfo pertence a quem se atreve e a vida
é muito bela para ser insignificante”.*

(Charles Chaplin)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os meus amigos pelo incentivo e colaboração ao longo do período.

Aos demais colegas da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, que contribuíram de forma direta e indireta para a realização deste trabalho, com destaque especial para Gercindo Ferreira, José Antônio Veloso, Maria Nazareth Teixeira e Sueli Maria Vidal.

Aos professores da Faculdade de Engenharia Civil da UFU, destacando especialmente o Dr. Turibio José da Silva e a Dra. Leila Aparecida de Castro Motta pelos ensinamentos e contribuições úteis ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. João Fernando Dias, pelas idéias e comprometimento no desenvolvimento da dissertação, além da particular amizade.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Civil, que forneceram o apoio necessário à realização da pesquisa.

SILVA, W. G. Avaliação de *concreto auto-adensável produzido com agregado reciclado de telha*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2012. 134p.

RESUMO

A crescente demanda por matéria prima na construção civil, especialmente por aquelas extraídas da natureza, é motivo de grande preocupação devido aos impactos maléficos que produz. A utilização de agregados reciclados pode ser uma alternativa sustentável e contribuir para a preservação dos recursos naturais, podendo contribuir para o desenvolvimento sustentável da construção civil. O resíduo de telha cerâmica tem sido estudado para aplicações diversas, despertando grande interesse por parte dos pesquisadores, devido à necessidade por inovação de materiais e métodos. Trabalhos publicados identificaram a geração de resíduos da fabricação de telhas, na indústria cerâmica, em quantidade considerável justificando assim a necessidade do seu aproveitamento. O concreto auto-adensável – CAA é um material que vem sendo utilizado cada vez mais na construção civil, daí o interesse em produzir este tipo de concreto com o agregado reciclado de telha – ART. Estudos anteriores demonstraram a possibilidade de produzir concreto com agregado reciclado de telha (ART) com resistências moderadas. Este trabalho teve como objetivo a avaliação de propriedades no estado fresco e no estado endurecido de um CAA, produzido com a fração graúda do ART e os finos passantes na peneira de abertura 0,15mm deste mesmo material, mediante o emprego de aditivo superplastificante de última geração, como forma de agregar valor a este resíduo e contribuir para a sustentabilidade do setor. A dosagem foi realizada por um método desenvolvido para este tipo de agregado baseado em métodos existentes. No estado fresco foram realizados os ensaios de massa específica, teor de ar incorporado, espalhamento, teste da Caixa L e teste do tubo U. No estado endurecido foram realizados os ensaios de velocidade de propagação da onda ultrassônica, resistência à compressão axial, módulo estático de elasticidade à compressão, massa específica aparente, absorção de água e índice de vazios. Os resultados obtidos indicam que é viável a utilização do ART em CAA para determinadas finalidades.

Palavras chave: Agregado Reciclado de Telha, Concreto Auto Adensável, Resíduo da Construção Civil.

SILVA, W. G. *Evaluation of self-compacting concrete produced with the recycled aggregate tile*, College of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, 2012. 134p.

ABSTRACT

The increasing demand for raw materials in construction, especially those drawn from nature, is of great concern due to harmful impacts it produces. The use of recycled aggregates can be a sustainable and contribute to the preservation of natural resources, contributing to the sustainable development of the construction industry. The residue from the ceramic tile has been studied for various applications, attracting great interest from researchers due to the need for innovation in materials and methods. Published works have identified the generation of waste from the manufacture of tiles, the ceramic industry in considerable amount thus justifying the need for its use. The self-compacting concrete - CAA is a material that has been used increasingly in construction, hence the interest in producing this type of recycled aggregate concrete with tile - ART. Previous studies have demonstrated the ability to produce recycled aggregate concrete tile (ART) with moderate resistance. This study aimed to evaluate properties in fresh and hardened state in a CAA produced with a fraction of thick ART and bystanders in thin 0.15 mm sieve opening of this same material, by the use of superplasticizer last generation as a way of adding value to this waste and contribute to the sustainability of the sector. The measurement was performed by a method developed for this type of aggregate based on existing methods. In the fresh state tests were performed density, air content embedded scattering, Box U test and test tube U. In the hardened condition assays were performed velocity of ultrasonic wave propagation, resistance to axial compression, static modulus of elasticity in compression, density, water absorption and void index. The results indicate that it is feasible to use in ART CAA for certain purposes.

Keywords: Aggregate Recycled Tile Ceramic, Self-Compacting Concrete, Civil construction residues

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	18
INTRODUÇÃO.....	18
1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA	18
1.2 OBJETIVOS.....	21
1.2.1 Objetivo principal.....	21
1.2.2 Objetivos específicos.....	22
CAPÍTULO 2	23
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 INTRODUÇÃO.....	23
2.2 RESÍDUOS E CONSTRUÇÃO CIVIL	26
2.3 AGREGADOS	27
2.3.1 Agregados Naturais	29
2.3.2 Agregados Reciclados	31
2.3.3 Agregado Reciclado de Telha – ART.....	33
2.4 CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL - CAA	37
2.4.1 Vantagens e Desvantagens	39
2.4.2 Aplicações	39
2.4.3 Ensaios.....	40
2.4.3.1 Teste do Espalhamento.....	41
2.4.3.2 Teste do Funil V	43
2.4.3.3 Teste da Caixa L.....	45
2.4.3.4 Teste da Caixa U.....	48
2.4.3.5 Teste de Preenchimento da Caixa.....	51
2.4.3.6 Teste do Tubo U	53
2.4.4 MÉTODOS DE DOSAGEM.....	54
2.4.4.1 Método de Okamura	55
2.4.4.2 Método de <i>Su et al</i>	57
2.4.4.3 Método de Gomes.....	63
2.4.4.4 Método Tutikian (2004)	69

2.5 ADITIVOS	72
2.6 CONCRETO DE REFERÊNCIA – CCV (FONSECA, 2006).....	73
CAPÍTULO 3	77
MATERIAIS E MÉTODOS.....	77
3.1 INTRODUÇÃO.....	77
3.2 MATERIAIS CONSTITUINTES	78
3.2.1 Cimento	78
3.2.2 Agregados.....	78
3.2.3 Aditivo.....	83
3.3 MÉTODOS.....	84
3.3.1 Introdução.....	84
3.3.2 Amostragem do ART	84
3.3.3 Caracterização do ART	85
3.3.4 Comportamento do concreto em função da dimensão máxima característica do ART	86
3.3.5 Comparação de concreto auto-adensável com ART e com agregado graúdo basáltico	88
3.3.6 Produção preliminar do concreto auto-adensável com o agregado reciclado de telha	89
3.3.7 Obtenção do ponto de saturação do aditivo superplastificante.....	90
3.3.8 Composição do esqueleto granular.....	92
3.3.9 Produção do Concreto auto-adensável com agregado reciclado de telha.....	92
CAPÍTULO 4	95
RESULTADOS E ANÁLISES	95
4.1 RESULTADOS DOS ESTUDOS PRELIMINARES	95
4.1.1 Caracterização do ART	95
4.1.2 Comportamento do concreto em função da dimensão máxima característica do ART	97
4.1.3 Comparação de concreto auto-adensável com ART e com agregado graúdo basáltico	98
4.1.4 Obtenção do ponto de saturação do aditivo superplastificante.....	101

4.1.5 Composição do esqueleto granular.....	102
4.1.6 Produção do concreto auto-adensável com agregado reciclado de telha.....	106
4.2 PROCEDIMENTO E FLUXOGRAMA PARA O MÉTODO DE DOSAGEM UTILIZADO.....	108
4.3 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO.....	109
4.3.1 Determinação da massa específica e do teor de ar incorporado.....	109
4.3.2 Teste de Espalhamento.....	110
4.3.3 Teste da Caixa L.....	111
4.3.4 Teste do Tubo U.....	112
4.4 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO.....	114
4.4.1 Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica – UPV.....	114
4.4.2 Resistência à compressão e módulo estático de elasticidade à compressão.....	116
4.4.3 Determinação da massa específica aparente, da absorção de água e do índice de vazios.....	119
CAPÍTULO 5.....	122
CONCLUSÕES.....	122
5.1 AVALIAÇÃO DO CAA COM ART.....	122
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	124
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	126

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Descarte de resíduo cerâmico.....	20
Figura 2.1 – Deposição clandestina de cacos de telhas na periferia da cidade de Monte Carmelo.....	33
Figura 2.2 – Deposição clandestina de cacos de telhas na periferia da cidade de Monte Carmelo em 2010.....	34
Figura 2.3 – CAA sem segregação.....	43
Figura 2.4 – CAA tendendo a segregar.....	43
Figura 2.5 – CAA segregado.....	43
Figura 2.6 – Aparelho adaptado para o Teste do Funil V.....	44
Figura 2.7 – Medidas da Caixa L recomendadas.....	46
Figura 2.8 – Ensaio da Caixa L em andamento.....	47
Figura 2.9 – Caixa U com medidas recomendadas pelo EFNARC.....	49
Figura 2.10 – Ensaio da Caixa U em andamento.....	50
Figura 2.11 – Medidas do <i>fill box</i> recomendadas.....	52
Figura 2.12 – Medidas recomendadas e ilustração do Tubo U.....	54
Figura 2.13 – Esquema do procedimento de dosagem.....	56
Figura 2.14 – Ccomparação das dosagens de CC e CAA.....	56
Figura 2.15 – Espalhamento para argamassas.....	57

Figura 2.16 – Funil V para argamassas.....	57
Figura 2.17 – Diagrama do método de dosagem de Gomes.....	65
Figura 2.18 – Dimensões do Cone de Marsh.....	67
Figura 2.19 – Aparato do mini slump.....	67
Figura 2.20 – Modelo de comportamento.....	70
Figura 2.21 – Passo-a-passo para a dosagem do CAA.....	71
Figura 2.22 – Diagrama de dosagem da propriedade de resistência à compressão do concreto de referência e dos concretos com ART, aos 28 dias.....	75
Figura 3.1 – Curva granulométrica da areia lavada.....	80
Figura 3.2 – Curva granulométrica do ART _{finos}	81
Figura 3.3 – Curva granulométrica do ART graúdo.....	83
Figura 3.4– Agregado Reciclado de Telha armazenado no laboratório.....	84
Figura 3.5 – (a) Extração de corpo-de-prova de caco de telha; (b) caco de telha após a extração de corpo-de-prova; (c) corpos-de-prova extraídos e (d) capeamento dos corpos-de-prova.....	85
Figura 3.6 – ART após peneiramento, graduação B0.....	86
Figura 3.7 – Máquina Universal de Ensaio e corpos-de-prova cilíndricos utilizados para a determinação da resistência à compressão aos 28 dias de idade.....	87
Figura 3.8 – Aparatos para a realização do ensaio de fluidez da pasta.....	91
Figura 3.9 – Medida da fluidez da pasta.....	91

Figura 4.1 – Curva de distribuição normal dos valores de resistência à compressão dos corpos-de-prova extraídos dos cacos de telha.....	96
Figura 4.2 – Histograma dos valores de resistência à compressão dos corpos-de-prova extraídos dos cacos de telha.....	96
Figura 4.3 – Ilustração de ruptura do agregado na graduação da B1.....	97
Figura 4.4 – Ilustração de ruptura do agregado na graduação da B0.....	98
Figura 4.5 – Espalhamento do concreto de referência.....	98
Figura 4.6 – Espalhamento do concreto de estudo.....	98
Figura 4.7 – Gráfico para a determinação do ponto de saturação do aditivo superplastificante	102
Figura 4.8 – Massa unitária e massa específica da mistura areia e ART.....	103
Figura 4.9 – Índice de vazios da mistura areia e ART.....	103
Figura 4.10 – Massa específica e massa unitária da mistura ART/areia/ART _{finos}	105
Figura 4.11 – Índice de vazios da mistura ART/areia/ART _{finos}	105
Figura 4.12 – Preparação inicial do CAA.....	107
Figura 4.13 – Determinação do espalhamento do concreto inicial	107
Figura 4.14 – Espalhamento do concreto final.....	108
Figura 4.15 – Procedimento para a obtenção do CAA com ART.....	109
Figura 4.16 – Aparelho medidor de ar incorporado	109
Figura 4.17 – Teste do espalhamento, determinação do diâmetro final D _f	111
Figura 4.18 – Teste da Caixa L	111

Figura 4.19 – Teste do tubo U.....	112
Figura 4.20 – Trecho horizontal do teste do Tubo U.....	113
Figura 4.21 – Detalhe de concentração do ART no ponto de curva	113
Figura 4.22 – Ensaio de Ultrassom.....	114
Figura 4.23 – Aparência da superfície lixada do topo do corpo-de-prova.....	114
Figura 4.24 – Evolução da velocidade de propagação da onda ultrassônica.....	116
Figura 4.25 – Ensaio de resistência à compressão.....	118
Figura 4.26 – Ensaio do módulo estático de elasticidade à compressão.....	118
Figura 4.27 – Evolução da resistência à compressão com a idade.....	118
Figura 4.28 – Evolução do módulo estático de elasticidade à compressão com a idade ..	119
Figura 4.29 – Valores de ensaios de absorção e índice de vazios do CAA e do CCV.....	121
Figura 4.30 – Valores de ensaios de massa específica do CAA e do CCV.....	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Classificação dos municípios brasileiros de acordo com a geração de RCD pela população urbana.....	27
Tabela 2-2 – Tabela 1 – Limites granulométricos de agregado miúdo.....	30
Tabela 2-3 – Limites granulométricos de agregado graúdo.....	30
Tabela 2-4 – Classificação de agregados.....	32
Tabela 2-5 – Propriedades caracterizadas no ART.....	36
Tabela 2-6 – Aptidões e praticidade dos ensaios para a medição da trabalhabilidade do CAA.....	40
Tabela 2-7 – Limites dos ensaios com CAA.....	41
Tabela 2-8 – Limites de resultados e dimensões para o teste do Funil V.....	45
Tabela 2-9 – Limites de resultados e dimensões para o teste da Caixa L.....	48
Tabela 2-10 – Limites de resultados e dimensões para o teste da Caixa U.....	51
Tabela 2-11 – Limites de resultados e dimensões para o teste <i>Fill Box</i>	53
Tabela 2-12 – Especificação para CAA.....	58
Tabela 2-13 – Faixa dos parâmetros que asseguram o auto-adensamento dos concretos....	68
Tabela 2-14 – Traços de concretos com ART graúdo.....	74
Tabela 2-15 – Resultados de ensaios de massa específica no estado fresco e abatimento do tronco de cone	74
Tabela 2-16 – Resultados de ensaios de resistência à compressão, módulo de deformação, massa específica seca, absorção de água e índice de vazios.....	75

Tabela 3-1 – Ensaio e resultados de caracterização do cimento.....	78
Tabela 3-2 – Ensaio de caracterização da areia lavada.....	79
Tabela 3-3 – Composição granulométrica da areia lavada.....	79
Tabela 3-4 – Ensaio de caracterização do ART _{finos}	81
Tabela 3-5 – Composição granulométrica do ART _{finos}	81
Tabela 3-6 – Resultados de ensaios de caracterização do ART.....	82
Tabela 3-7 – Composição granulométrica do ART.....	82
Tabela 3-8 – Características do aditivo superplastificante.....	83
Tabela 3-9 – Traço e resistência à compressão dos concretos.....	87
Tabela 3-10 – Traço e propriedade do concreto de referência.....	88
Tabela 4-1 – Resistência à compressão do material constituinte do ART.....	95
Tabela 4-2 – Resistência à compressão aos 28 dias.....	97
Tabela 4-3 – Características dos concretos no estado fresco.....	99
Tabela 4-4 – Resultados dos ensaios no estado endurecido.....	99
Tabela 4-5 – Resultados dos ensaios de fluidez.....	101
Tabela 4-6 – Determinação da massa unitária em estado solto, massa específica e índice de vazios da mistura ART/areia.....	102
Tabela 4-7 – Determinação da massa unitária em estado solto, massa específica e índice de vazios da mistura ART/areia/ART _{finos}	104
Tabela 4-8 – Determinação da proporção de substituição do agregado miúdo pelo ART _{finos}	106

Tabela 4-9 – Resultados dos ensaios de determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica (UPV).....	115
Tabela 4-10 – Resultados dos ensaios de determinação da resistência à compressão e do módulo estático de elasticidade à compressão.....	117
Tabela 4-11 – Resultados dos ensaios de determinação da absorção de água. índice de vazios, massa específica aparente.....	120

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA

O modelo de desenvolvimento tradicionalmente adotado no mundo converge para políticas de extrativismo de recursos naturais sem a inserção eqüitativa de benefícios sociais e econômicos para o ser humano, sendo este chamado de desenvolvimento explorador. Diante desta situação, faz-se necessário que um novo modelo de desenvolvimento seja adotado, para que as gerações humanas futuras possam desfrutar dos benefícios dispostos na natureza. Esse novo modelo de desenvolvimento vem sendo chamado de desenvolvimento sustentável (CABRAL, 2007).

A filosofia do desenvolvimento sustentável baseia-se na conservação ambiental, admitindo-se o aproveitamento dos bens e recursos que constituem o ecossistema, em extensão e ritmo tais que permitam sua recomposição, de forma induzida ou natural. Esta postura difere da filosofia da preservação ambiental na qual se adota o critério da intocabilidade da natureza e do ecossistema pelo homem. O desenvolvimento sustentável propõe então atender às necessidades da atual geração sem comprometer o direito das futuras atenderem às suas próprias necessidades (VALLE, 2004).

Em trabalhos de diversos pesquisadores, dentre eles Hansen (1992), Hendriks *et al.* (1998b), Pinto (1999), John (2000) e Dias *et al.* (2001), percebe-se a concordância sobre a

necessidade de reestruturação do modelo linear de desenvolvimento para que se possa garantir a preservação ambiental e até mesmo a sobrevivência da espécie humana. Esses estudiosos alertam sobre a necessidade de se avaliarem todos os impactos das atividades de produção e de consumo, desde a extração da matéria-prima e os processos industriais, até o transporte e o destino dos resíduos de produção, além, é claro, do destino que se dará aos produtos após sua utilização.

A utilização de resíduo na indústria da construção civil constitui não apenas uma resposta racional na melhora da gestão ambiental de atividade industrial, se não também uma necessidade, como se tem assumido em boa parte da indústria da construção em países como, por exemplo, Holanda e Japão. O uso de resíduos industriais, como os provenientes das indústrias metalúrgicas e termoelétricas, como componente do concreto tem crescido em todo mundo. Seu emprego geralmente proporciona ao concreto melhores desempenhos no estado fresco e endurecido (LISBOA, 2004).

A fabricação de telha cerâmica gera resíduos após a queima (ilustração na Figura 1.1), constituídos por peças defeituosas que não podem ser comercializadas e são descartadas sem uma destinação definida (DIAS, 2004b).

De acordo com a Associação Brasileira de Cerâmica, existiam em 2003 cerca de 7 mil indústrias de cerâmica vermelha no país, com uma produção média por indústria em torno de 365 mil peças por mês.

Segundo pesquisa realizada por Dias (2004b), a quantidade de resíduos gerados na fabricação de telhas cerâmicas era volumosa e justificava a reciclagem. Esse autor estimou que 3% da produção de cerâmica representavam um percentual médio da geração desses resíduos no parque cerâmico de Monte Carmelo, Minas Gerais. Com a estimativa da época seriam, em média, aproximadamente onze mil peças descartadas, ou cerca de dezenove mil quilos mensais por indústria cerâmica. Quaresma (1990) indicou que as perdas no processo de fabricação das indústrias de cerâmica vermelha, no estado de Santa Catarina, atingiam percentuais acima de 10%, para 17% das empresas, tendo como principal causa o manuseio de produto intermediário e final. Já Henriques *et al.* (1993) indicavam que as perdas de produto em fornos tipo Caieiras poderiam atingir em média 30%.

Considerando somente o volume de resíduo cerâmico gerado na cidade de Monte Carmelo, com 40 indústrias, Dias (2004b) estimou a possibilidade de suprir o consumo de agregado reciclado de telha para a construção de 32 casas populares de 44 m², por ano por indústria, em média, totalizando 1299 casas por ano.

A produção de concretos com agregados reciclados tem sido tema de pesquisa de grande interesse entre diversos pesquisadores. Dentre as grandes preocupações com o emprego destes agregados na produção de concreto, está na necessidade de obtenção de concretos cada vez mais duráveis. Assim, os agregados deixam de exercer apenas um papel econômico na composição dos concretos, podendo não só influenciar as características deste no estado fresco, como nas propriedades no estado endurecido e, conseqüentemente, na sua durabilidade.



Figura 1.1 – Descarte de resíduo cerâmico

Dias (2004b) coletou, em diversas indústrias no parque fabril de Monte Carmelo, aproximadamente dez toneladas de resíduos de telhas cerâmicas; com esses resíduos, através de britagem produziu agregado reciclado.

Esse agregado produzido foi classificado granulometricamente nas frações miúda e graúda, e foi utilizado na pesquisa de Dias (2004b) para o emprego em camadas de pavimentos de

baixo volume de tráfego. Neste estudo o autor ressalta características interessantes desse material como, por exemplo, a baixa massa específica, comparada com os agregados naturais. O material remanescente dessa pesquisa ficou estocado no Laboratório de Materiais de Construção Civil da FECIV-UFU para trabalhos futuros.

Estudando o emprego em concreto, Fonseca (2006) utilizou o agregado reciclado de telha na fração graúda e concluiu ser possível atingir resistências moderadas, na ordem de 23,0 MPa, potencializando seu uso.

Esses dados dão a dimensão da importância de se desenvolver estudos para a reciclagem desses resíduos na construção civil, visualizando-se benefícios para a atividade fabril, para a construção civil e para a natureza.

Neste trabalho os estudos foram direcionados para a utilização do agregado reciclado de telha na fração graúda, em substituição ao agregado natural, sendo uma sequência da pesquisa de Fonseca (2006), incluindo a partir de agora os finos do agregado reciclado, aqueles passantes na peneira de abertura 0,15 mm, para produzir um concreto auto-adensável.

A intenção foi obter um concreto auto-adensável compatível com as aplicações que não exigem resistência mecânica elevada, como por exemplo, na produção de painéis de fechamento, pois se estima que teriam grande aplicação, devido o momento de intensa atividade da construção civil, especificamente na produção de habitação de interesse social.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo principal

O objetivo deste trabalho foi analisar o uso do agregado reciclado de telha cerâmica (ART) para a produção de concreto auto-adensável, por meio da realização de ensaios no estado fresco e no estado endurecido.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Verificar a influência do ART na resistência do concreto;
- Analisar o comportamento do concreto com ART em função da dimensão máxima do agregado graúdo
- Obter a dosagem adequada do aditivo superplastificante;
- Obter o percentual ótimo de adição de ART_{finos};
- Avaliar as propriedades do CAA no estado fresco tais como teste do espalhamento, determinação do teor de ar aprisionado e da massa específica, teste da caixa L e teste do Tubo U;
- Avaliar as propriedades CAA no estado endurecido, tais como absorção de água, massa específica aparente, índice de vazios, resistência à compressão e módulo estático de elasticidade à compressão.

Na sequência deste trabalho apresentam-se, no capítulo 2 a Revisão Bibliográfica, onde são abordados aspectos relacionados à reciclagem e resíduos na construção civil, agregados naturais e reciclados, o agregado reciclado de telha (ART), o concreto auto-adensável (CAA) com os principais ensaios e alguns dos métodos de dosagem do CAA. No capítulo 3 Materiais e Métodos, onde são descritos os materiais utilizados, os métodos e ensaios para dosagem do CAA e o estudo para obtenção do CAA utilizando o ART. No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos na pesquisa e finalmente no capítulo 5 são realizadas as análises e conclusões. Por fim, estão relacionadas as referências bibliográficas.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

A pedra, a madeira e o barro eram utilizados pelo homem como materiais de construção desde as civilizações primitivas. Aos poucos, as exigências do homem foram aumentando, passando a demandar materiais de maior resistência, maior durabilidade e melhor aparência. Desta forma, surgiu o concreto, trabalhável como barro e resistente como pedra (VERÇOSA, 2003).

Dentre os materiais mais importantes de todas as épocas para a civilização, aparecem os materiais cimentícios por terem suprido a necessidade de edificações e obras de infraestruturas. A constatação é simples: a natureza forneceu matérias-primas abundantes e o homem, pela sua inerente capacidade de elaborar relações de causa-efeito, estabeleceu interações entre as necessidades existentes e as possibilidades de aplicação que esses materiais disponibilizaram para solução de seus problemas imediatos (ISAIA, 2005).

O uso do concreto remonta à época dos Romanos, quando era utilizado um material semelhante, tendo como aglomerante uma mistura de cal e cinza vulcânica (pozolana natural), com o qual foram realizadas notáveis obras de engenharia (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 1997).

Sendo o concreto o material de construção mais utilizado no mundo, não se pode mais considerar apenas o estudo de concretos convencionais. O mercado e as técnicas

construtivas exigem concretos que apresentem características especiais. Helene (2005) cita os de alta resistência, de alto desempenho, auto-adensáveis, aparentes, coloridos, brancos, sustentáveis, entre outros.

Foi desenvolvido no Japão, em 1988, um concreto de alto desempenho com uma excelente deformabilidade no estado fresco e alta resistência à segregação. Este concreto, que possui a capacidade de se moldar nas fôrmas sem vibração ou compactação, passando coeso através das armaduras, foi denominado de concreto auto-adensável (CAA) (SU *et al.*, 2001; COPPOLA, 2000; OKAMURA, 1997).

A evolução é significativa, já que se passou do concreto convencional com quatro componentes básicos, cimento, agregado miúdo e graúdo e água, para o auto-adensável com seis componentes, somando-se a estes materiais os aditivos (superplastificantes e, ocasionalmente, modificadores de viscosidade) e os materiais finos (pozolânicos ou não) (ARAÚJO *et al.*, 2003).

A maneira de modificar a trabalhabilidade do concreto, mantendo-se inalteradas as características do material endurecido, tem muita importância prática para os profissionais da construção civil. Para um mesmo desempenho, o construtor apreciará misturas mais trabalháveis, que requerem menor tempo e esforço e, conseqüentemente, menores custo de lançamento (TUTIKIAN, 2004).

O concreto auto-adensável pode ser classificado como um avançado material de construção. Sua composição inclui materiais inorgânicos de granulação fina, oferecendo a possibilidade de se utilizar pó de agregado extremamente fino, o qual é considerado rejeito, sem aplicação na indústria e que demanda custo para descarte. Este concreto surgiu da necessidade de se dispensar o difícil e oneroso trabalho de vibração do concreto lançado às fôrmas, o que mostra que as principais causas da sua origem foram a economia de mão de obra e a durabilidade das estruturas.

De acordo com Okamura (1997), um adensamento adequado do concreto por operários treinados era importante para obter estruturas duráveis; entretanto, tais operários seriam extremamente dispendiosos, pois fora o correto treinamento, ainda havia o custo da utilização de tal serviço.

Embora estivesse cada dia mais consagrado o uso do CAA, existia uma lacuna muito grande nesta área, que era a inexistência de métodos experimentais de dosagem. Para dosar um CAA, pesquisadores valiam-se de métodos baseados em tabelas prontas que foram produzidas, muitas vezes, em outros países, com materiais bem diferentes dos nossos. Ou seja, necessitava-se fazer adaptações baseadas no método da tentativa e erro, gastava-se tempo sem a certeza de que o concreto produzido fosse, realmente, um concreto econômico e dosado de uma forma que minimizasse futuras manifestações patológicas, como, por exemplo, a retração (TUTIKIAN, 2004).

Segundo ainda Tutikian (2004), no Brasil, poucos estudos sobre o uso do concreto auto-adensável haviam sido realizados. Uma das razões disso devia-se ao custo deste tipo de concreto, que poderia chegar ao dobro do de concretos convencionais (AMBROISE *et al.*, 1999). No entanto, Ambroise *et al.* (1999) testaram alguns CAA que tiveram um aumento de apenas 20% no custo dos materiais em relação ao concreto convencional – CC, e, levando-se em consideração a diminuição do custo com lançamento e adensamento, o valor final provavelmente decairia.

Segundo Grauers (1998), o custo dos materiais do CAA era apenas 10% superior ao dos materiais do CC, para uma mesma faixa de resistência à compressão. Na Suécia, o CAA foi utilizado em lajes para residências e a produtividade aumentou em 60% (PERSSON, 2001). Conforme Proske e Graubner (2002), a racionalização do processo de fabricação, somado ao aumento de produtividade e qualidade do CAA, compensaria a elevação do custo unitário dos materiais.

Pesquisas vêm mostrando que, erroneamente, profissionais tomadores de decisão escolhem outro tipo de concreto ao CAA, devido ao seu custo ser, teoricamente, mais elevado. Ou então, justificam eles, deixam de utilizar este concreto porque algumas propriedades no estado endurecido podem comprometer o desempenho da estrutura, como o módulo de elasticidade. Sabe-se, no entanto, que o CAA só pode ser diferente do CC até que a mistura passe do estado fresco para o endurecido, logo suas propriedades mecânicas e de durabilidade serão, simplesmente, o efeito da proporção dos materiais constituintes. Os materiais são parecidos com os do CC, assim como as propriedades no estado endurecido, quando não superiores (TUTIKIAN, 2007).

2.2 RESÍDUOS E CONSTRUÇÃO CIVIL

O setor da Construção Civil é reconhecido como um dos mais importantes ramos de atividade para o desenvolvimento econômico e social, e, por outro lado, comporta-se como grande gerador de impactos ambientais, quer seja pelo consumo de recursos naturais, pela modificação da paisagem ou pela geração de resíduos sólidos. Em razão disso, este setor tem um grande desafio que é de buscar conciliar uma atividade produtiva de grande magnitude com as condições que conduzam a um desenvolvimento sustentável consciente, menos agressivo ao meio ambiente.

Sendo um dos maiores consumidores de recursos naturais do planeta, a construção civil é responsável por um consumo entre 14% e 50% desses recursos, segundo Sjöström (1996). No Brasil, segundo John (2000), pode-se estimar um consumo anual de 210 milhões de toneladas de agregados somente para a produção de concretos e argamassas.

Os resíduos da construção e demolição (RCD), também denominados de entulhos da construção, tinham sua geração estimada entre 230 a 760 kg/hab.ano, representando entre 41% e 70% do resíduo sólido municipal, segundo dados das pesquisas de Pinto (1999), em 10 cidades brasileiras. Coloca ainda este autor, que a geração de resíduos na cadeia produtiva do setor da construção civil também é significativa, tendo sua origem na indústria de insumos até seu emprego nas construções propriamente ditas.

Está representada na Tabela 2-1 uma estimativa realizada a partir de dados da população urbana dos municípios brasileiros medida pelo IBGE em 1996, admitindo-se uma geração de RCD de 0,51 ton/hab.ano, que corresponde a mediana dos valores medidos por Pinto (1999), com ano típico com 300 dias úteis. Das 4974 áreas urbanas, 152 apresentavam geração estimada de resíduo acima de 200 toneladas por dia útil. Nestes municípios com mais de 120 mil habitantes residem 56% da população urbana brasileira e, como regra geral, quanto maior a cidade, mais grave é a questão dos resíduos de construção (JOHN, 2000).

Tabela 2-1 – Classificação dos municípios brasileiros de acordo com a geração de RCD pela população urbana (PINTO, 2000).

População (mil)	RCD (tonelada/dia)	Numero de municípios	População		RCD médio (ton/dia)
			%	Média	
□120	□200	4822	44,2	11281	18
120 a 300	200 a 500	103	16,0	190873	318
300 a 600	500 a 1000	25	8,3	410865	684
600 a 3000	1000 a 5000	22	19,3	1082086	1803
□3000	□5000	2	12,1	7471325	12452

Na cidade de Uberlândia, os resíduos da construção civil somavam mil toneladas por dia ou aproximadamente 2 kg/hab.dia (DIAS, 2004a), quantidades vultosas que exigem medidas de minimização da geração e também de gestão dos resíduos.

O consumo de agregados pela construção civil é alto, e sendo estes materiais naturais não renováveis, acabam se tornando escassos em algumas regiões do país. Por outro lado, a geração e descarte de resíduos sólidos pelas atividades ligadas à construção civil, e também por outras atividades de produção, causam impactos ambientais de diversas ordens. A reciclagem dos resíduos na construção civil surge como uma necessidade para a preservação do meio ambiente e é uma das possíveis alternativas para suprir a demanda de agregados para emprego na construção civil (FONSECA 2006).

Na década de 90, surgia a reciclagem como forma de trazer vantagens ambientais e econômicas. No Brasil, a reciclagem vinha recebendo um grande impulso com a implantação de recicladoras em municípios médios e grandes. Empresários passaram a se interessar pelo assunto, individualmente ou em parcerias com prefeituras, pois parecia ser este o caminho mais indicado. Institutos de Pesquisas e Universidades passaram também a estudar os agregados reciclados e seus usos, gerando embasamento técnico e teórico importantes para o emprego desses materiais (PINTO, 1999).

2.3 AGREGADOS

Agregados são os insumos mais consumidos pela indústria da construção civil em todo o mundo, classificados como materiais granulares, sem forma ou volumes definidos, geralmente inertes, de dimensões e propriedades adequadas para uso em obras de

engenharia. São agregados as rochas britadas, os fragmentos rolados no leito dos cursos d'água e os materiais encontrados em jazidas, provenientes de alterações de rochas (PETRUCCI, 1998).

Ainda conforme Petrucci (1998), estes agregados, quando utilizados na produção de concreto, são divididos em dois grupos, em razão da dimensão máxima de suas partículas: 1) agregados miúdos, que basicamente são as areais ou pedriscos resultantes do britamento de rochas instáveis, com tamanho das partículas tais que, no máximo, 15% ficam retidos na peneira de 4,8 mm. 2) agregados graúdos que são pedregulhos naturais, seixos rolados ou pedras provenientes do britamento de rochas estáveis, com um máximo de 15% passando na peneira 4,8 mm. Admite-se por motivos econômicos o emprego de britas provenientes de rochas, tais como o diorito, gabro, diabásio, calcário, quartzito e arenito. No Brasil, porém, dado o uso preponderante de brita, por questões de resistência mecânica e durabilidade, empregam-se na maioria das estruturas, concretos produzidos com pedra britada obtida do granito, basalto e gnaisse.

Para Neville (1997), todas as partículas de agregados são originárias de fragmentação de rochas, seja por meios naturais através de intemperismo e abrasão, seja a partir da fragmentação de rochas por meio de britagem. Isto faz com que muitas das propriedades dos agregados dependam inteiramente das propriedades da rocha-mãe, como cor, densidade, composição química e mineralógica, características petrográficas, densidade de massa, dureza, resistência, estabilidade química e física e estrutura dos poros. Em contrapartida, existem algumas propriedades dos agregados que não dependem da rocha-mãe, como a forma e o tamanho das partículas, a textura superficial e a absorção. Estas propriedades podem ter influência positiva ou negativa na qualidade tanto dos concretos frescos como endurecidos. Porém, um agregado cujas propriedades sejam satisfatórias não necessariamente poderá produzir bons concretos, isso porque é necessário que se faça uma avaliação quanto ao desempenho do concreto.

Pesquisadores da área da construção civil têm buscado alternativas para a obtenção de concretos cada vez mais duráveis e mais resistentes. Isso levou a investigações mais detidas sobre as propriedades dos agregados, que deixaram de exercer um papel apenas econômico na composição do concreto, mas passaram a representar uma alternativa,

influenciando positivamente não só na trabalhabilidade, como nas propriedades físicas e mecânicas do concreto, bem como na sua durabilidade (LEVY, 2002).

Existem várias características consideradas importantes, segundo Mehta e Monteiro (2008), e que devem ser estudadas para a utilização de agregados em concretos: a granulometria, a absorção de água, a forma e a textura, a resistência à compressão, o módulo de elasticidade e os tipos de substâncias deletérias presentes nos materiais. Quando se estuda a utilização de agregados para a produção de concretos, todas essas características devem ser levadas em consideração, principalmente quando se trata de novos materiais, como é o caso do agregado reciclado. Afinal, a viabilidade técnica de sua utilização dependerá do total conhecimento de seu comportamento na estrutura do concreto.

2.3.1 Agregados Naturais

Os agregados naturais são os que se encontram de forma particulada na natureza, tais como as areias, cascalhos ou pedregulhos. São formados por materiais detríticos resultantes da decomposição de rochas que sofreram processos de intemperismo e que se acumulam em depósitos sedimentares pela ação de agentes transportadores naturais. São constituídos por grânulos de quartzo, chamados areias e de fragmentos de quartzo, arenitos silificados e de quartzitos, chamados de cascalho. A areia e o cascalho constituem materiais detríticos e são muito resistentes às intempéries (OLIVEIRA, 2006).

Estes agregados são provenientes de rochas que existem na crosta terrestre, as quais estão sujeitas ao intemperismo, resultado dos gradientes de temperatura que ocorrem durante o dia e à noite, pela umidade das chuvas, pelos efeitos dos ventos etc. Os sedimentos provenientes do intemperismo podem formar três grandes grupos de solos, diferenciados pela composição granulométrica e pela natureza dos grãos de solos que o compõem. São eles: os solos argilosos, compostos essencialmente por argilo-minerais, com granulometria extremamente fina, como, por exemplo, os solos de mangue; os solos arenosos, compostos predominantemente de minerais de natureza não-argilosa, com granulometria acima de 0,075 mm, como, por exemplo, os solos dos desertos ou os solos de praias ou dunas; por último, os solos argilo-arenosos ou areno-argilosos, que são compostos por uma mistura

com predominância de um dos dois tipos anteriormente citados; por exemplo: solos em climas temperados tendo rocha-mãe granítica (NIEBEL, 2008).

Os agregados miúdos, normalmente, devem cumprir os limites de somente uma das zonas indicadas na Tabela 2-2 extraída da ABNT NBR 7211:2009.

Tabela 2-2 – Limites granulométricos de agregado miúdo

Peneira ABNT (mm)	Porcentagem em massa retida acumulada			
	Limites Inferiores		Limites Superiores	
	Zona Utilizável	Zona Ótima	Zona Utilizável	Zona Ótima
9,5	0	0	0	0
6,3	0	0	0	7
4,8	0	0	5	10
2,4	0	10	20	25
1,2	5	20	30	50
0,6	15	35	55	70
0,3	50	65	85	95
0,15	85	90	95	100

Nota

1 – o módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90

2 – o módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20

3 – o módulo de finura da zona utilizável superior varia 2,90 a 3,50

Fonte: ABNT NBR 7211:2009 – Agregado para concreto.

A granulometria, determinada segundo a ABNT NBR NM 248:2003, apresenta os requisitos granulométricos do agregado, indicados na Tabela 2-3 (Tabela 2 da ABNT NBR 7211:2009 – Agregado para concreto, para a graduação respectiva).

Tabela 2-3 – Limites granulométricos de agregado graúdo.

Abertura da malha (mm)	Porcentagem em massa retida acumulada				
	Zona Granulométrica d/D ¹				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75	-	-	-	-	0-5
63	-	-	-	-	5-30
50	-	-	-	0-5	75-100
37,5	-	-	-	5-30	90-100
31,5	-	-	0-5	75-100	95-100
25	-	0-5	5-25 ²	87-100	-
19	-	2-15 ²	65 ² -95 ²	95-100	-
12,5	0-5	40 ² -65 ²	92-100	-	-
9,5	2-15 ²	80 ² -100	95-100	-	-
6,3	40 ² -65 ²	92-100	-	-	-
4,8	80 ² -100	95-100	-	-	-
2,4	95-100	-	-	-	-

Notas

¹ Zona granulométrica correspondente à menor (d) e maior (D) dimensões do agregado graúdo

² Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados com ². Essa variação pode também estar distribuída em vários desses limites.

Fonte: ABNT NBR 7211:2009 – Agregado para concreto.

2.3.2 Agregados Reciclados

De acordo com a ABNT NBR 15116:2004, agregado reciclado é definido como sendo material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção e demolição de obras civis, que apresentem características técnicas para a aplicação em obras de edificação e infraestrutura.

A resolução CONAMA (2002) prescreve que os resíduos de construção que podem ser reutilizados ou reciclados para a produção de agregados, são aqueles que enquadram na chamada “Classe A”. Esta categoria engloba os resíduos provenientes de: (a) construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação de obras de infraestrutura, incluindo solos provenientes de terraplanagem; (b) construção, demolição, reforma e reparo de edificações tais como componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento, etc.) argamassa e concreto; (c) processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios, etc.), produzidas nos canteiros de obra.

Agregados reciclados, em geral, podem apresentar forma mais irregular e textura superficial mais áspera e porosa quando comparados aos agregados naturais. Desta forma, propriedades como resistência à compressão, resistência à tração e absorção de água do agregado reciclado, podem fornecer informações importantes à respeito do comportamento mecânico do concreto produzido com este material e de sua durabilidade (OLIVEIRA, 2006).

Na Tabela 2-4, apresentam-se as principais características de três tipos de agregados reciclados, conforme sua origem, possibilidade de conter impurezas e potencial de resistência mecânica, segundo Levy (2001).

Tabela 2-4 – Classificação de agregados

Tipo de agregado	Origem	Impurezas	Resistência à compressão
Provenientes de resíduos de alvenaria	Obtidos a partir da britagem de fragmentos de materiais minerais, extraídos de materiais de demolição, ou resíduos de construção.	Podem ou não estar contaminados com resíduos de tinta, gipsita e outras substâncias em menor ou maior teor.	É inferior à resistência a compressão de agregados naturais; poderão, ou não, conforme sua qualidade e sua granulometria, desenvolver reação pozolânica..
Tipo de agregado	Origem	Impurezas	Resistência à compressão
Provenientes de resíduos de concreto	Obtidos a partir da britagem de fragmentos de materiais minerais extraídos da demolição de estruturas de concreto fresco, endurecido ou rejeitado	Poderão estar contaminados por agentes agressivos como cloretos e ou sulfatos, dependendo somente da origem dos fragmentos. Podem ou não estar contaminados com resíduos de tinta	Em geral, sua resistência à compressão dependerá da resistência à compressão dos agregados naturais utilizados na produção do concreto original
Provenientes de resíduos compostos	obtidos a partir da britagem de fragmentos de materiais minerais extraídos de demolição de obras convencionais, de estruturas de concreto e de vedações de alvenaria revestidas ou aparentes.	Poderão estar contaminados por agentes agressivos, como cloretos e ou sulfatos. Podem ou não estar contaminados também com resíduos de tinta.	Em geral sua resistência à compressão dependerá da resistência à compressão dos agregados naturais utilizados na produção do concreto original.

Algumas utilizações dos agregados reciclados já são bem difundidas, como a utilização em base e sub-base de pavimentos, produção de concretos magros sem fins estruturais, produção de blocos de concreto, utilização em projetos de drenagem, entre outros. Todavia, muitos autores concordam que o mercado dos resíduos de construção deve crescer e, em paralelo a isso, que a sua utilização no concreto é sem dúvida uma das melhores alternativas para que tal propósito seja alcançado (HANSEN, 1992).

Em seu trabalho sobre o uso de agregado reciclado para a composição de concreto, Barra (1996) afirmou que “a maior heterogeneidade, a menor resistência da matriz (concreto original) e a maior porosidade são consideradas as principais diferenças entre o agregado reciclado de concreto e o agregado natural”. Essas características podem ser aplicadas para os diversos tipos de agregados reciclados de construção e demolição disponíveis.

2.3.3 Agregado Reciclado de Telha – ART.

Resíduos da fabricação de telhas cerâmicas foram diagnosticados por Dias (2004b) na região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, local onde se concentram várias indústrias cerâmicas, sendo a quantidade gerada considerada significativa, justificando assim a realização de estudos para seu aproveitamento.

As cidades de Monte Carmelo e Ituiutaba estão localizadas no Triângulo Mineiro, em Minas Gerais, próximas de alguns grandes centros consumidores como Brasília, Goiânia, Belo Horizonte, Uberlândia, Uberaba e outros. A atividade industrial de cerâmica vermelha é tradicional nesses municípios, remontando seu crescimento ao tempo da construção da capital da república.

Dados da época mostram que os parques cerâmicos existentes no Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba congregavam mais de cem indústrias de cerâmica vermelha, segundo o Sindicato das Indústrias de Cerâmica e Olaria do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba – SINCOTAP/Ituiutaba e a Associação dos Ceramistas de Monte Carmelo - ACEMC / Monte Carmelo. Na cidade de Ituiutaba, eram dezesseis indústrias e, em Monte Carmelo cerca de quarenta, caracterizando dois importantes pólos industriais na região (DIAS, 2004b).

Na Figura 2.1 ilustra-se a prática de descarte dos resíduos na periferia de Monte Carmelo, diagnosticado por Dias (2004b).



Figura 2.1 – Deposição clandestina de cacos de telhas na periferia da cidade de Monte Carmelo Fonte: Dias (2004b)

Em visitas realizadas à cidade de Monte Carmelo, verificou-se que o problema do descarte e a deposição clandestina dos cacos de telha ainda permanecem, conforme pode ser observado na Figura 2.2.



Figura 2.2 – Deposição clandestina de cacos de telhas na periferia da cidade de Monte Carmelo em 2011

Dias (2004b) produziu e avaliou agregados reciclados de telhas (ART) e concluiu ser possível seu aproveitamento em camadas de pavimentos de baixo volume de tráfego.

Ao caracterizar o ART vislumbrou outras utilizações na construção civil, dentre elas o emprego em concretos, o que poderia agregar valor a estes materiais que se inserem num grupo específico de resíduos, pois são constituídos de uma única fase, ao contrário dos agregados reciclados de resíduos da construção e demolição que são polifásicos; outra característica ressaltada pelo autor é que o resíduo é gerado após a queima das telhas e sai dos fornos sem contaminação, facilitando sua reciclagem.

Diversas propriedades do ART foram investigadas por Dias (2004b). Embora o estudo não tenha sido em razão da aplicação deste material na produção de concreto, essas propriedades trouxeram importantes informações sobre este material, quando comparadas com valores referenciais recomendados pelas normas ou encontradas em pesquisas com materiais naturais. Assim, apresentam-se aqui os resultados obtidos por Dias (2004b) para o agregado reciclado de telha, referentes às seguintes características: resistência à abrasão Los Angeles; resistência ao esmagamento; perda ao choque no aparelho Treton; índice de

degradação após o Proctor; desgaste após fervura e potencial pozolânico, densidade, absorção de água e porosidade.

Foram ensaiados dois agregados reciclados caracterizados por Dias (2004a), denominados ART-1 e ART-2, e seus valores estão relacionados na Tabela 2-5.

O sobrescrito 1 refere-se ao ensaio de determinação de resistência à abrasão Los Angeles, realizado segundo a Norma ABNT NBR NM 51:2001 e pelo método da norma DNER-ME 222/94. O valor da resistência à abrasão Los Angeles, obtido por Dias (2004b) foi de 41%, observando-se que não representa um valor negativo, pois comparado com alguns materiais naturais representa valor de mesma ordem de grandeza.

O sobrescrito 2 se refere à resistência ao esmagamento, que foi determinada pela norma ABNT NBR 9938:1987, com valores limites indicados por IPR (1998). Nesse quesito, o material também não foi avaliado negativamente (FONSECA, 2006).

O sobrescrito 3 se refere à Perda ao choque no aparelho Treton, afirmando o autor que o resultado não foi uma característica negativa comparada com o limite de tentativa indicado por IPR (1998), de perda $\leq 60\%$.

O sobrescrito 4 indica o Índice de degradação após o Proctor e verifica-se que nesse ensaio o ART apresenta deficiência de desempenho quando comparada com o limite de tentativa sugerido por IPR (1998), em que o limite é de 6% (para melhores esclarecimentos consultar a tese de Dias (2004b). No entanto, ressalta-se que nesse caso os esforços aplicados no material são dinâmicos.

O sobrescrito nº 5 refere-se ao ensaio de desgaste por fervura e, segundo o autor, os resultados atingiram os limites de tentativa indicados por IPR (1998). Esse ensaio revela se o material cerâmico foi calcinado convenientemente para tornar-se resistente.

O sobrescrito 6 está se referindo ao potencial pozolânico do ART determinado através do ensaio Chapelle, no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT-SP). Segundo a literatura, os materiais cerâmicos com um consumo mínimo de 330 mg de CaO/g, têm potencial pozolânico que pode ser aproveitado; dessa forma, as amostras apresentaram potencial pozolânico limitado, devido ao baixo consumo de CaO.

Complementando essa análise, no ensaio de raios X os resultados indicaram a redução dos picos por volta de $2\theta \approx 13^\circ$ e $2\theta \approx 25^\circ$, evidenciando a amorfização da caulinita.

Dessa forma, Dias (2004b) concluiu que o ART apresentou potencial pozolânico, ainda que baixo, mas para o aproveitamento dessa característica o assunto deve ser mais investigado, levando em consideração que esse potencial somente é ativado para superfícies específicas muito elevadas.

O ART apresentou massa específica de $1,81 \text{ g/cm}^3$, conforme pode ser notado na Tabela 2-5. Ao se empregar agregados reciclados, normalmente mais leves do que os naturais tradicionais, como por exemplo o basalto, com massa específica em torno de $2,88 \text{ g/cm}^3$, espera-se influência negativa na resistência do concreto. Segundo Neville (1997) deve-se considerar que a resistência da pasta do concreto não pode ser significativamente maior do que a do agregado utilizado, o que pode ser observado quando ocorre ruptura na maior parte do agregado.

Tabela 2-5 – Propriedades caracterizadas no ART – Fonte Fonseca (2006)

Materiais	Propriedades	Resultados	Método de Ensaios
ART 1	Resistência a Abrasão Los Angeles ¹	40,5 %	NBR 6465 (1984)
		36,3 %	DNER – ME 222/94
ART 2	Resistência a Abrasão Los Angeles	35,5 %	NBR 6465 (1984)
		35,5 %	DNER – ME 222/94
ART 1	Resistência Ao esmagamento ²	36,7 %	NBR 9938 (1997)
ART 2	Resistência ao esmagamento	33,0 %	NBR 9938 (1997)
ART 1	Perda ao choque no aparelho Treton ³	41,2 %	IPR (1998)
ART	Índice de degradação após o Proctor ⁴	14,4 %	IPR (1998)
ART 1	Desgaste após fervura ⁵	4,3 % peneira n°10	IPR (1998)
		2,6 % peneira n°40	IPR (1998)
ART 2	Desgaste após fervura	3,3 % peneira n°10	IPR (1998)
		0,4 % peneira n°10	IPR (1998)
Amostra -1	Potencial Pozolânico	235,8 mg	Chapelle (IPT)
Amostra -2		288,5 mg	
ART	Massa específica aparente	$1,81 \text{ g/m}^3$	Ensaios realizados
ART	Absorção de água	17,1 %	
ART	Porosidade	32,5 %	

Os agregados naturais são geralmente densos e resistentes, portanto, a porosidade da matriz, bem como a zona de transição entre a matriz e o agregado graúdo é que

normalmente determinam a característica de resistência dos concretos convencionais (METHA; MONTEIRO, 1994). Com isso, pode se afirmar que as propriedades destes concretos sofrerão forte influência com a substituição dos agregados naturais por agregados reciclados, como no caso do agregado reciclado de telha cerâmica, material menos denso e resistente que os agregados naturais.

De fato, Fonseca (2006) identificou queda de até 42% para valores de resistência à compressão aos 28 dias, em concretos com 100% de agregado graúdo reciclado em comparação com concreto com agregado graúdo natural. Esta autora concluiu que a substituição total do agregado graúdo natural pelo ART, leva à queda significativa da resistência à compressão.

2.4 CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL - CAA

A frequente busca por inovação de métodos e técnicas de construção, tem despertado o interesse de muitos pesquisadores e neste contexto aparece o concreto auto-adensável como um material inovador com nova amplitude para emprego na construção civil.

O concreto auto-adensável é o concreto que tem capacidade de preencher os espaços vazios das formas e se auto-adensar apenas sob o efeito da gravidade e de sua própria capacidade de fluxo. Esta auto-adensabilidade do concreto no estado fresco é descrita como a habilidade deste material de preencher espaços e envolver as barras de aço e outros obstáculos, através da ação da força da gravidade mantendo uma homogeneidade adequada (BOSILJKOV, 2003).

O CAA foi desenvolvido na Universidade de Tóquio entre 1986 e 1988, devido à necessidade de manter a durabilidade e qualidade nas construções japonesas em frente à sensível queda na quantidade de mão de obra qualificada (OKAMURA e OUCHI, 2003). A capacidade de se auto-adensar é obtida com o equilíbrio entre alta fluidez com grande mobilidade e moderada viscosidade e coesão entre as partículas do concreto fresco. A alta fluidez é alcançada com a utilização de aditivos superplastificantes de última geração e a moderada viscosidade e coesão entre suas partículas é conseguida com o incremento de um percentual adequado de adição mineral de granulometria muito fina. Um alto volume de

pasta, aliado a menor dimensão máxima característica do agregado graúdo, são também características importantes para obtenção de CAA.

O concreto para ser considerado auto-adensável tem que satisfazer determinadas propriedades no estado fresco, preencher todos os espaços das formas sobre o efeito apenas do seu próprio peso; passar entre obstáculos sem sofrer bloqueio, preenchendo todos os espaços das formas, mesmo os mais confinados pela concentração de armaduras e manter a estabilidade, sem sofrer segregação de seus componentes, até o momento pós-lançamento. Este concreto precisa ainda atender aos mesmos requisitos de resistência e durabilidade dos concretos convencional e de alto desempenho (EFNARC, 2002; GOMES, 2002; ROONEY, 2002).

Okamura (2003) propôs estudos iniciais sobre CAA no sentido de se obter estruturas mais duráveis e de maior confiabilidade, tendo em vista que o Japão teve severas experiências de problemas de durabilidade nas construções devido ao reduzido número de trabalhadores preparados na vibração mecânica do concreto. O concreto auto-adensável foi a solução encontrada para se obter estruturas duráveis, sem a necessidade de mão de obra qualificada em adensamento mecânico. A falta desse tipo de trabalhadores não foi à única causa dos problemas de durabilidade. A baixa trabalhabilidade dos concretos também dificultava o adensamento dos mesmos em elementos estruturais com formas complexas e com alta taxa de armaduras (BILLBERG, 1999).

No Brasil, a publicação da norma ABNT NBR 15823:2010, em abril de 2010 foi um importante passo para aumentar o uso do CAA. Esta norma define este concreto como: “Concreto que é capaz de fluir, auto-adensar pelo seu peso próprio, preencher a forma e passar por embutimentos (armaduras, dutos e insertos), enquanto mantém sua homogeneidade (ausência de segregação) nas etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento”.

A norma está dividida em seis partes, sendo que em sua primeira parte são estabelecidos os requisitos para a classificação do CAA no estado fresco e determina as metodologias de ensaios para a comprovação das suas propriedades, além de prever seu controle em laboratório. Em seu texto são definidos os termos utilizados, classifica o material quando

ao comportamento e desempenho, estabelecendo os ensaios de realização obrigatória. Da segunda à sexta parte são descritos e detalhados os ensaios exigidos.

No estado fresco, a norma estabelece que o CAA deve passar pelos ensaios de habilidade passante na Caixa L, de determinação da viscosidade por meio do método do Funil V e da determinação da resistência à segregação por meio do método da coluna de segregação.

Também estabelece esta norma que o CAA, ao chegar no canteiro de obras, deve ser submetido aos ensaios de espalhamento e habilidade passante através do emprego do método do anel J.

2.4.1 Vantagens e Desvantagens

O concreto auto-adensável tem como principais vantagens: redução do custo de aplicação por metro cúbico de concreto; garantia de excelente acabamento em concreto aparente; permite bombeamento em grandes distâncias horizontais e verticais; otimização de mão de obra; maior rapidez na execução da obra; melhoria nas condições de segurança na obra; eliminação do ruído provocado pelo vibrador; eliminação da necessidade de espalhamento e de vibração; aumento das possibilidades de trabalho com formas de pequenas dimensões; redução do custo final da obra em comparação ao sistema de concretagem convencional (CAMARGOS, 2002).

Existe uma busca constante para se obter o CAA através de pesquisas com novos materiais, de forma que o mesmo se torne cada vez mais viável, embora possa apresentar algumas desvantagens, possíveis de ser contornadas. Dentre elas, a condição de que este concreto não é fácil de ser obtido, precisando de mão de obra especializada para sua confecção, controle tecnológico e aplicação; tem maior necessidade de controle, durante sua aplicação, do que o concreto convencional; necessita de cuidados especiais com o transporte, para evitar a segregação; apresenta menor tempo disponível para aplicação em relação ao concreto convencional (LISBÔA, 2004).

2.4.2 Aplicações

O CAA também tem sido bastante utilizado em elementos pré-fabricados, principalmente naqueles com grande concentração de armaduras, onde o concreto convencional tem certa

dificuldade de preencher seus vazios. Dentre as principais indicações para o uso do CAA estão: fundações executadas por hélice contínua, paredes, vigas e colunas, paredes diafragma, estações, reservatórios de água e piscinas, pisos, contrapisos, lajes, pilares, muros, painéis, obras com acabamento em concreto aparente, obras de concreto em locais de difícil acesso, em peças pequenas, com muitos detalhes ou com formatos não convencionais, onde seja difícil a utilização de vibradores (CAMARGOS, 2002).

2.4.3 Ensaios

Os ensaios mais comuns utilizados para se analisar as propriedades dos CAA, segundo Gomes (2003), são: o teste de espalhamento, com o cone de Abrams (*slump flow*); o teste do Funil-V, o teste da Caixa-L e o teste do Tubo U. O teste de espalhamento é o mais utilizado, ou melhor, na maioria das vezes o único utilizado, sendo um equívoco quando o concreto em seu lançamento necessitar ultrapassar obstáculos.

As principais propriedades que são necessárias de medir no CAA são a fluidez, ou seja, a capacidade deste fluir coeso e íntegro entre obstáculos, e a resistência à segregação. Para cada um destes pontos há um grupo de equipamentos, uns mais aptos que outros e uns mais práticos que outros, conforme pode ser observado na Tabela 2.6

Tabela 2-6 – Aptidões e praticidade dos ensaios para a medição da trabalhabilidade do CAA.

Ensaio	Utilização		Propriedades Avaliadas		
	Laboratório	Obra	Fluidez	Habilidade de passar por obstáculos	Coesão
Espalhamento	X	X	XXX	N	X
Espalhamento t_{50}	X	X	XXX	N	X
Funil V	X	X	XX	N	X
Funil V 5 min	X	X	X	N	XXX
Caixa L	X	N	N	XXX	XX
Caixa U	X	N	N	XXX	XX
Tubo U	X	N	X	N	XXX

XXX – altamente recomendável; XX – recomendável; X – pouco recomendável; N – não relevante

(Fonte: PETERSSSEN, 1999, adaptado)

Na Tabela 2-7 são demonstrados os principais ensaios praticados por pesquisadores e seus respectivos limites para a definição da auto-compactabilidade do concreto.

Tabela 2-7 – Limites dos ensaios com o CAA (fonte: EFENARC, 2002; GOMES, 2002; RAVINDRA *et al.*, 2004)

Propriedades	Ensaio	Parâmetros	Faixa ideal
Capacidade de preenchimento	Teste de espalhamento	D_f	60 a 80 cm
		T_{50}	2 a 7 s
	Funil-V	T_v	6 a 13 s
Capacidade de passagem	Caixa-L	TL_{20}	≤ 2 s
		TL_{40}	≤ 4 s
		$R = H_2 / H_1$	0,80 a 085
Estabilidade à segregação	Tubo-U	$RS = M_1 / M_2$	$\geq 0,90$

No ensaio de determinação do espalhamento são determinados o diâmetro final de abertura do concreto (D_f) e o tempo (T_{50}) que este leva para atingir uma marca na base referente à um diâmetro de 50 cm. No ensaio do Funil V é determinado o tempo (T_v) em que o concreto aumenta seu tempo de escoamento pelo equipamento em relação à primeira determinação depois de decorridos 5 minutos. No ensaio da Caixa L são determinados os tempos TL_{20} e TL_{40} , que serão os tempos em que o concreto gasta para atingir as marcas horizontais referentes às distâncias de 20 cm e 40 cm do ponto inicial. Neste ensaio determina-se também a relação altura no ponto inicial (H_1) e altura no ponto final (H_2), conforme poderá ser observado mais adiante na ilustração do ensaio. Com relação aos ensaios para a determinação da segregação, o Tubo U determina a relação entre as massas M_1 e M_2 em diferentes pontos do aparelho.

Para que a execução de alguns dos ensaios de medição da trabalhabilidade do CAA seja realizada rapidamente e com um pequeno volume de material, Rigueira Victor *et al* (2003) propuseram alguns destes ensaios em tamanho reduzido. Eles testaram o Teste do Espalhamento (*Slump flow*), Funil V e Caixa L, e baseados nos resultados obtidos, concluíram que os aparelhos usuais podem ser substituídos pelos reduzidos.

2.4.3.1 Teste do Espalhamento

Para a determinação do ensaio de Espalhamento é preenchido o cone de Abrams com concreto sem compactar, em seguida é levantado, lentamente, deixando o concreto se estender em forma quase circular. As médias de duas medidas perpendiculares do concreto

espraiado resultam nos valores dos parâmetros extensão final do fluxo. E o tempo medido em segundos, para o concreto alcançar um diâmetro de 50 cm, é chamado de T_{50} .

O método do Teste do Espalhamento tem sua descrição baseada em EFNARC (2002), Peterssen (1998), FURNAS (2004a), Tviksta (2000) e Gomes (2002). Este ensaio é utilizado para medir a capacidade do concreto auto-adensável de fluir livremente sem segregar. Foi desenvolvido primeiramente no Japão, para ser usado em concretos submersos. A medida de fluidez a ser obtida do CAA é o diâmetro do círculo formado pelo concreto. Para concretos convencionais, a trabalhabilidade é medida pela ABNT NBR NM 67:1998: concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone – método de ensaio, ou pela ABNT NBR NM 68: 1998: concreto – Determinação da consistência pelo espalhamento na mesa de *Graff*.

De acordo com Ravindra *et al.* (2004), este ensaio de espalhamento foi adotado no Japão em 1990 como norma (JSCE-F503) e recomendado pelo EFNARC em 2002. O objetivo deste ensaio é medir quantitativamente a capacidade de fluir do concreto (D_f , diâmetro final de espalhamento), sobre efeitos de seu peso próprio, e qualitativamente a segregação com uma análise visual do concreto. O concreto, ao se espalhar, tende a segregar-se concentrando o agregado graúdo no centro e a presença de pasta e calda de cimento em todo o perímetro da amostra (MENDES, 2009).

A determinação da consistência do concreto, pelo espalhamento da mesa de *Graff*, é aplicável para misturas que atinjam o espalhamento mínimo de 350 milímetros, mas limitado ao tamanho da mesa, de 700 milímetros. Pode-se afirmar, a grosso modo, que o Teste do Espalhamento é uma adaptação destes dois ensaios, para um concreto excessivamente fluido (TUTIKIAN, 2004).

O Teste do Espalhamento também permite observar, visualmente, se o concreto está segregando ou não. As Figuras 2.3, 2.4 e 2.5 ilustram o resultado do ensaio realizado com três CAA, o primeiro sem apresentar segregação, o segundo tendendo a segregar e o terceiro com segregação visível. Nota-se que à medida que o concreto vai segregando, o agregado graúdo vai formando uma pilha central, enquanto ar vai sendo incorporado e apenas a argamassa vai fluindo para as extremidades, formando uma auréola. Se este concreto da figura 2.5 fosse aplicado em estruturas reais, certamente o agregado graúdo

iria para o fundo das fôrmas, então a argamassa e a água subiriam para a superfície, o que provocaria grandes falhas de concretagem, diminuindo a durabilidade e a resistência mecânica das peças (TUTIKIAN, 2004).



Figura 2.3 – CAA sem segregação



Figura 2.4 – CAA tendendo a segregar

(fonteTUTIKIAN, 2004).

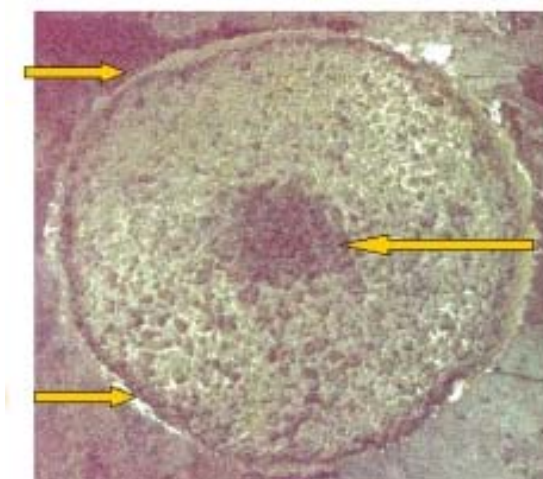


Figura 2.5 – CAA segregado (fonte TUTIKIAN, 2004).

2.4.3.2 Teste do Funil V

A realização dos ensaios do Funil V consiste em medir o tempo que amostras de aproximadamente 10 litros de concreto, gastam para fluir totalmente através do orifício inferior do funil. A seção do orifício inferior deverá ter uma dimensão mínima de 3 vezes o

tamanho máximo do agregado graúdo e , para os CAA, estas dimensões deverão variar de 6,5 cm a 7,5 cm.

Este ensaio tem o seu detalhamento fundamentado nos procedimentos de EFNARC (2002), Peterssen (1998), FURNAS (2004b) e Gomes (2002). Desenvolvido no Japão por Ozawa, este equipamento mede a fluidez do concreto, assim como o Teste do Espalhamento e o Teste do Espalhamento T_{50} cm para agregados graúdos de diâmetro máximo de 20 mm.

Na Figura 2.6, adaptada de Gomes (2002), mostra duas possibilidades de formatos para o aparelho. Na extremidade inferior do equipamento retangular existe uma porta, que pode ser deslizante ou com dobradiça, para que mantenha o concreto no interior do aparelho e seja aberta para iniciar o ensaio. A medida é o tempo em que o material leva para escoar do funil.

Após a execução do ensaio, pode-se preencher novamente o funil com concreto e esperar 5 minutos para a repetição do procedimento, para que se teste a resistência à segregação, já que se o CAA estiver segregando, o tempo de escoamento irá aumentar significativamente. Um cuidado a se observar é que este aparelho é bastante simples e ainda não se sabe de alguma influência provocada pelo ângulo interno e as paredes internas na fluidez do concreto.

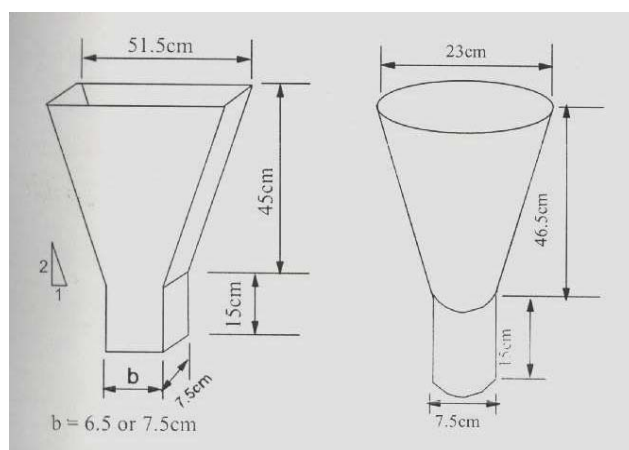


Figura 2.6 – Aparelho adaptado para o Teste do Funil V (fonte: GOMES, 2002)

Da mesma forma que nos outros ensaios, o equipamento deve ser firmemente fixado e nivelado, de forma a não se movimentar ao longo da execução do ensaio. Inicialmente deve-se umedecer todo o equipamento, para que a água do concreto não seja absorvida indevidamente. Com a concha côncava, encher o funil com concreto coletado de acordo

com a ABNT NBR NM 33:1998, novamente sem compactação ou vibração de espécie alguma, e, com a espátula, nivelar o topo do aparelho e retirar o excesso de concreto. Abrir a porta inferior do funil, permitindo que o material escoe unicamente sob a ação da gravidade. O tempo que o concreto leva para esvaziar completamente o funil é o resultado deste ensaio. Para um concreto ser considerado auto-adensável, o tempo de escoamento deve se situar em um intervalo apropriado, e na Tabela 2-8 estão indicados alguns valores propostos por diversos pesquisadores. Quando da repetição do ensaio, é aconselhável que o tempo em que o concreto escoe aumente em, no máximo, três segundos.

Tabela 2-8 – Limites de resultados e dimensões para o Teste do Funil V, segundo diversas referências.

Referência	Tempo (s)		Dimensões (mm)			
	Mínimo	Máximo	A	B	C	D
EFNARC (2002)	6	12	490	425	150	65
FURNAS (2004)	-	-	515	450	150	65
Gomes (2002)	10	15	515	450	150	65 ou 75
Gomes <i>et al</i> (2003a)	7	13	515	450	150	65
Araújo <i>et al</i> (2003)	6	12	-	-	-	-
Noor e Uomoto (1999)	9,5	9,5	490	425	150	70
Peterssen (1998 e 1999)	5	15	550	450	120	75
Coppola (2000)	-	-	500	425	150	65

(fonte: TUTIKIAN, 2004)

2.4.3.3 Teste da Caixa L

O ensaio da Caixa L tem como finalidade medir a fluidez do concreto simultaneamente com a habilidade de passar por obstáculos, permanecendo coeso.

É descrito por EFNARC (2002), FURNAS (2004c), Tviksta (2000) e Gomes (2002) da seguinte forma: o equipamento consiste em uma caixa em forma de L, com uma porta móvel separando a parte vertical da horizontal e, junto a esta divisória, barras de aço que simulam a armadura real da estrutura, criando um obstáculo à passagem do concreto. É importante salientar que o espaçamento e a bitola das barras de aço, no ensaio, dependem, basicamente, das condições reais da estrutura em que o concreto será aplicado.

A Caixa L é utilizada para estabelecer os parâmetros de fluidez e de capacidade de passagem por armaduras. Consiste em preencher o cômodo vertical da caixa com a amostra de concreto, de aproximadamente 12 litros, após a abertura da porta da caixa, são medidos os parâmetros TL20, TL40 e H2/H1, que são respectivamente, o tempo para o concreto em

fluxo alcançar um comprimento horizontal de 20 e 40 cm, e a relação final entre as alturas do concreto no final do trecho horizontal e a altura do concreto remanescente do trecho vertical da caixa.

Embora muitos autores defendam uma normalização deste procedimento, o mais correto seria padronizar apenas a parte fixa do equipamento, enquanto as armaduras seriam escolhidas para cada situação. A Figura 2.7 ilustra as medidas da Caixa L com 3 barras de aço de 12,5 mm de diâmetro, espaçadas em 40,6 mm entre si, por serem as mais usuais, como pode-se observar na Tabela 2-9, que ilustra limites defendidos por diversos autores. Aconselha-se utilizar agregados graúdos com diâmetro máximo de 12,50 mm, um terço do valor do espaçamento das armaduras (TUTIKIAN, 2004).

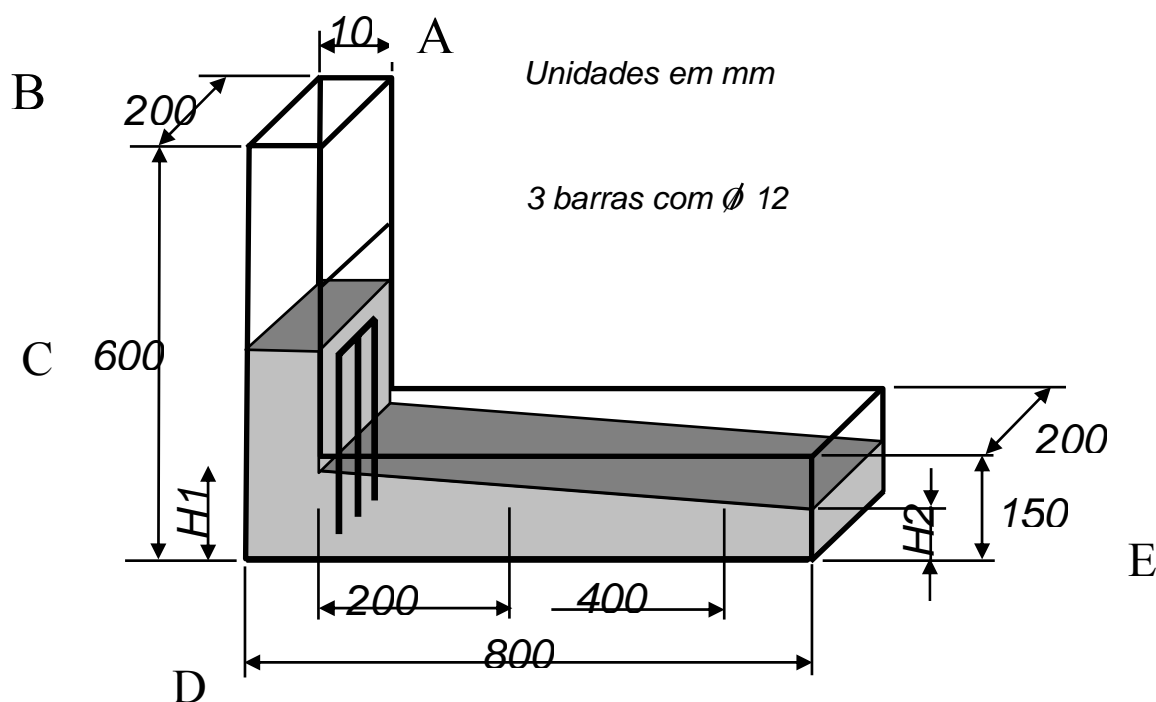


Figura 2.7 – Medidas da Caixa L recomendadas
(fonte: EFNARC, 2002)

Para a execução deste ensaio são necessários a Caixa L, feita com material não absorvente e de superfície lisa, espátula, pá côncava, trena e cronômetro para a medição do tempo em que o concreto chega aos 20 cm e aos 40 cm, que devem ser marcados no trecho horizontal

do aparelho. A cronometragem destes tempos não é obrigatória nem recomendada por todos os autores, pois estes tempos são pequenos e de difícil marcação, a não ser que se utilize uma pessoa para marcar cada um dos tempos, o que dificulta o ensaio.

Devido às suas dimensões e características, é recomendado o uso da Caixa L apenas em laboratório, sendo de difícil utilização em campo. São necessários cerca de 12 litros de concreto para preencher a parte vertical do equipamento. Deve-se fixar a Caixa L em solo firme e nivelado, umedecer as paredes do equipamento e testar o portão móvel, para ter certeza que este se erguerá mesmo com a pressão do concreto. Preencher a parte vertical e deixar o material se acomodar por 1 minuto. Após levantar o portão pode-se cronometrar o tempo em que o concreto alcança a marca de 20 cm e 40 cm na horizontal se for o caso, e medir as alturas H1 e H2, indicadas na Figura 2-7 (TUTIKIAN, 2004). A Figura 2.8 ilustra o ensaio da Caixa L em andamento.



Figura 2.8: Ensaio da Caixa L em andamento (fonte: TUTIKIAN, 2004)

Tabela 2-9 – Limites de resultados e dimensões para o Teste da Caixa L, segundo diversas referências.

Referência	Medidas			Dimensões (mm)				
	h1/h2	T ₂₀ (s)	T ₄₀ (s)	A	B	C	D	E
EFNARC (2002)	0,80	-	-	100	200	600	800	150
FURNAS (2004)	-	-	-	100	200	600	700	150
Gomes (2002)	0,80	1	2	100	200	600	700	150
Gomes <i>et al</i> (2003a)	0,80	0,5-1,5	2-3	100	200	600	700	50
Araújo <i>et al</i> (2003)	0,80	-	-					-
Rigueira Victor <i>et al.</i> (2003)	0,80	1,5	3,5					-
Peterssen (1998 e 1999)	0,80	-	-	100	200	600	700	150
Barbosa <i>et al.</i> (2002)	-	-	-	00	-	600	700	150
Tviksta (2000)	0,85	-	-	100	-	600	-	150
Coppola (2000)	0,90		-	120	-	600	780	200
Palma (2001)	0,80	-	3 a 6	-	-	-	-	-

(fonte: TUTIKIAN, 2004)

2.4.3.4 Teste da Caixa U

Este ensaio foi utilizado por EFNARC (2002), FURNAS (2004d) e Gomes (2002). Desenvolvido pela *Technology Research Centre of the Taisei Corporation in Japan*, o Teste da Caixa U também pode ser chamado de *Box shaped test* e serve para medir a fluidez e a habilidade do concreto passar por obstáculos sem segregar. O equipamento ilustrado na Figura 2.9 exibe dois compartimentos separados por um portão móvel e barras de aço de diâmetro de 12,5 mm espaçadas entre si em 40,6 mm. Segundo Tutikian (2004), também podem ser utilizadas as medidas e intervalos propostos por outros pesquisadores, ilustrados na Tabela 2-10.

Este ensaio tem como finalidade principal avaliar a capacidade do CAA em ultrapassar aberturas estreitas e a facilidade com o que leva para preencher a caixa apenas pelo seu peso próprio (RAVINDRA *et al.*, 2004; GOMES 2002).

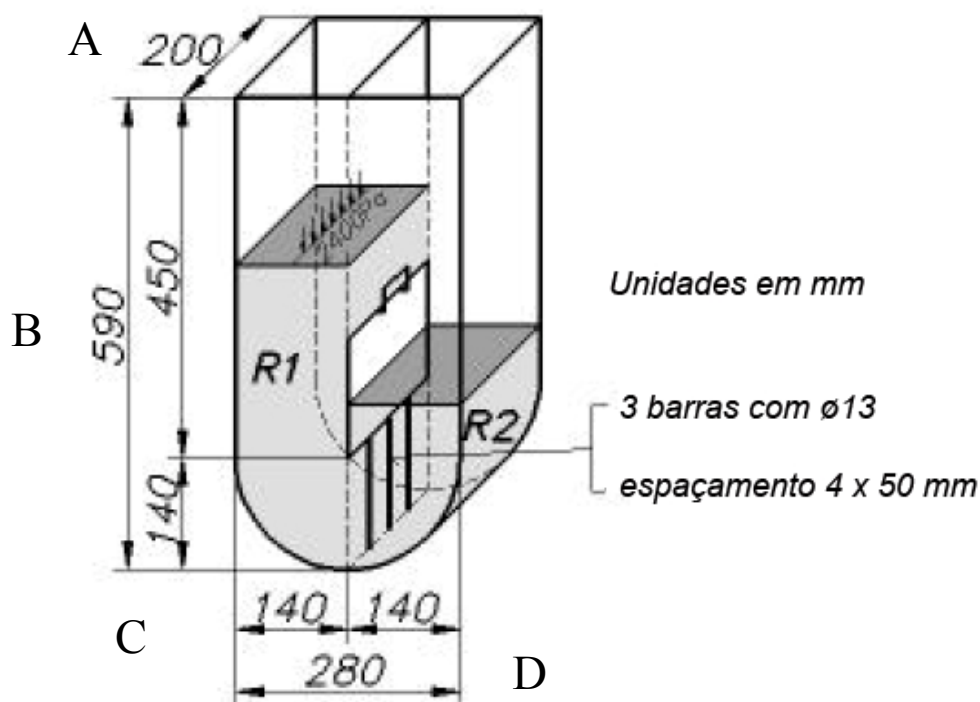


Figura 2.9 – Caixa U com medidas recomendadas pelo EFNARC
(fonte: EFNARC, 2002)

Tutikian (2204) comenta que, assim como no Teste da Caixa L as armaduras devem ser projetadas caso a caso, a fim de se ter uma precisão maior nos resultados dos testes. Quando o concreto passa de um compartimento para o outro sofre uma resistência ao movimento, e quanto mais íntegro e coeso passar, sem segregar, mais auto-adensável está mostrando ser. Este equipamento é de difícil confecção e depois de pronto pode ser frágil, dependendo do material, o que dificulta seu uso em campo, sendo mais apropriado para uso em laboratório.

Na execução deste ensaio são necessários uma concha côncava, uma espátula, uma trena e cerca de 16 litros de concreto no estado fresco, que devem ser colocados sem vibração ou compactação externa de qualquer natureza no compartimento da esquerda do aparato, com o portão fechado. É importante que antes da colocação da mistura, se umedeça o equipamento para que este não absorva água do concreto, assim como se teste o portão, para que nenhuma partícula dificulte sua abertura durante o ensaio. O equipamento deve estar sobre um chão firme e nivelado e após o preenchimento, a mistura deve descansar por

1 minuto e só então o portão deve ser aberto, fazendo com que o concreto escoe através das armaduras para o outro compartimento. Assim que o movimento se estabilizar, deve-se medir as alturas R1 e R2, respectivamente a altura do material que ficou no compartimento da esquerda e da direita, e determinar o valor $R1 - R2$. Quanto mais fluida a mistura for, mais próximo do zero esta subtração irá resultar, indicando que o concreto é auto-adensável, sendo que o limite máximo pode variar de 24,2 mm até 80 mm de diferença, como pode ser observado na Tabela 2.10, sendo que Coppola (2000) descreve os valores em percentual.

Novamente a observação do movimento da mistura é muito importante para identificar algum tipo de segregação, uma vez que o concreto coeso deve sempre fluir uniformemente, com todos os seus componentes unidos, sem separação (TUTIKIAN, 2004). Na Figura 2.10 observa-se o Teste da Caixa U em andamento.



Figura 2.10 – Ensaio da Caixa U em andamento. (fonte: TUTIKIAN, 2004)

Tabela 2-10 – Limites de resultados e dimensões para o Teste da Caixa U segundo diversas referências

Referência	R1 – R2 (mm)		Dimensões (mm)			
	Mínimo	Máximo	A	B	C	D
EFNARC (2002)	0	30	200	590	140	140
FURNAS (2004f)	-	-	200	680	190	140
Gomes (2002)	0	80	200	680	190	140
Araújo <i>et al</i> (2003)	0	30	-	-	-	-
Noor e Uomoto (1999)	0	24,2	200	680	190	140
Shindoh e Matsuoka (2003)	0	80	200	680	190	140
Coppola (2000)	90%	100%	200	680	190	140

(fonte: TUTIKIAN, 2004)

2.4.3.5 Teste de Preenchimento da Caixa

Este equipamento é utilizado por EFNARC (2002), FURNAS (2004b) e Gomes (2002), e é conhecido por *Fill Box*, método de *Kajima* ou *vessel test*. Este equipamento mede a capacidade do concreto passar coeso, sem segregar, por obstáculos como armaduras e eletrodutos. O aparato, ilustrado na Figura 2.11, consiste em uma caixa transparente de 50 cm de comprimento, por 30 cm de altura e 30 cm de largura, com 35 barras de PVC de 20 mm de diâmetro espaçadas 5 cm de eixo a eixo, distribuídas ao longo da caixa. Insere-se no topo do aparelho um tubo de 100 mm de diâmetro com um funil de 200 mm de diâmetro, que será a entrada da amostra de concreto, de aproximadamente 45 litros e coletada de acordo com a ABNT NBR NM 33: 1998. A altura do material nas duas extremidades do equipamento é H1 e H2, e a capacidade de preenchimento 'F' do concreto é calculado de acordo com a equação 1 (TUTIKIAN, 2004).

$$F = 100 * \frac{H1+H2}{2-H1} \quad (\text{eq. 1})$$

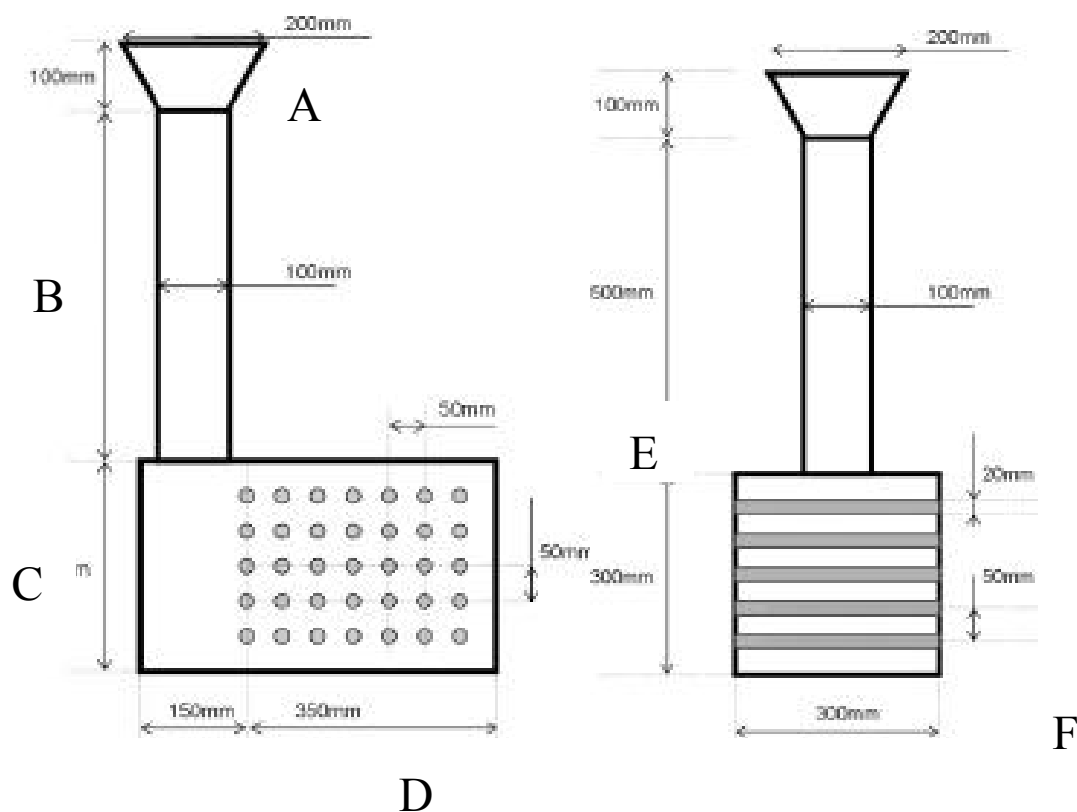


Figura 2.11: medidas do *Fill Box* recomendadas (fonte: EFNARC, 2002)

Para a realização deste ensaio é necessário o equipamento com as medidas já determinadas, com material transparente e que não absorva indevidamente a água do concreto, uma concha côncava de capacidade entre 1,5 litros e 2 litros de material e uma trena. Apenas um operador é suficiente. Primeiramente, deve-se colocar o equipamento em um solo firme e nivelado, para depois umedecer suas paredes sem que algum excesso de água permaneça. Preencher o *Fill Box* com a amostra de concreto, cuidando para que seja derramada uma concha côncava a cada 5 segundos, e até que a mistura envolva a última barra de PVC da primeira linha. Medir duas alturas em cada face com a trena e a média aritmética destas duas será o H1 e o H2 e, então, calcular 'F'. Todo o ensaio deve ser executado em menos de oito minutos (TUTIKIAN, 2004).

Segundo ainda este autor, no caso da capacidade de preenchimento da mistura for inferior a 90%, significa que o concreto deve ser ajustado para que alcance tal exigência, devendo ser fluidificado mantendo a coesão. Durante o procedimento, é importante a observação de ocorrência ou não de segregação, pois o concreto deve estar coeso ao passar pelas barras de PVC, ou seja, se a argamassa chegar à extremidade da caixa oposta ao local de sua

colocação, antes do agregado graúdo, significa que a mistura está segregando e alguma correção é necessária. Para a mistura ser considerada auto-adensável, 'F' deve estar situada entre 90% e 100%, por ser uma unanimidade entre outros autores, como mostra a Tabela 2-11.

Tabela 2-11 – Limites de resultados e dimensões para o teste *Fill Box*, segundo diversas referências

Referência	F (%)		Dimensões (mm)					
	Mínimo	Máximo	A	B	C	D	E	F
EFNARC (2002)	90	100	200	500	300	500	50	300
FURNAS (2004b)	-	-	200	500	300	500	50	300
Gomes (2002)	-	-	-	-	300	500	50	-
Araújo <i>et al</i> (2003)	90	100	-	-	-	-	-	-
Palma (2001)	-	100	-	500	-	-	50	-

(fonte: TUTIKIAN, 2004)

2.4.3.6 Teste do Tubo U

Este procedimento foi totalmente desenvolvido por Gomes (2002), e serve para mensurar a segregação de um concreto auto-adensável. Resistência à segregação significa que a distribuição dos agregados graúdos deve ser em todos os lugares e níveis, ou seja, o concreto não pode segregar nem horizontal e nem verticalmente, por isso é necessário que exista um método rápido e simples para o teste da coesão da mistura (BUI *et al.*, 2002).

Os parâmetros de ausência de segregação dos concretos são estabelecidos através de ensaios com o tubo em U, de 16 cm de diâmetro. Os ensaios consistem em fazer fluir amostras de concreto sem sofrer compactação, através do tubo e após algum tempo, quando os concretos já se encontram em estado de semi-endurecimento, são cortados, em cada caso, três fatias de 10 cm de espessura: a primeira no início do tubo de entrada, a segunda no início do trecho horizontal e a terceira no final do trecho horizontal do tubo. Após a retirada das argamassas através de processos de lavagem das fatias sobre peneiras de 5 mm, são pesados os agregados de cada conjunto de três fatias. As Relações de Segregação (RS), são obtidas dividindo-se a massa dos agregados existentes, após a lavagem e enxugamento com papel toalha, da segunda fatia pela primeira fatia e o mesmo com a terceira pela primeira fatia. O menor valor das duas relações é a Relação de Segregação, que deve ser maior ou igual a 0,90 (LISBÔA, 2004).

Uma das vantagens deste equipamento é que necessita de poucos recursos para construí-lo, é fácil de manejar e limpar, assim como o procedimento é simples. Mas apenas concretos fluidos podem ter sua segregação testada e o tempo de duração depende do início de pega de cada aglomerante. O Tubo U é composto por três tubos de PVC de diâmetro interno de 156 mm, conforme a Figura 2.12. O primeiro e o terceiro tubo têm 570 mm de comprimento, enquanto o segundo mede 800 mm, e todos são serrados ao meio e presos com braçadeiras metálicas, para que possam ser abertos sem danificar o concreto que está no interior. Cerca de 32 litros da mistura, coletadas de acordo com a ABNT NBR NM 33: 1998a são necessárias para a execução do teste, que nada mais é que uma comparação entre três corpos-de-prova retirados de três locais diferentes do ‘U’ (TUTIKIAN, 2004).

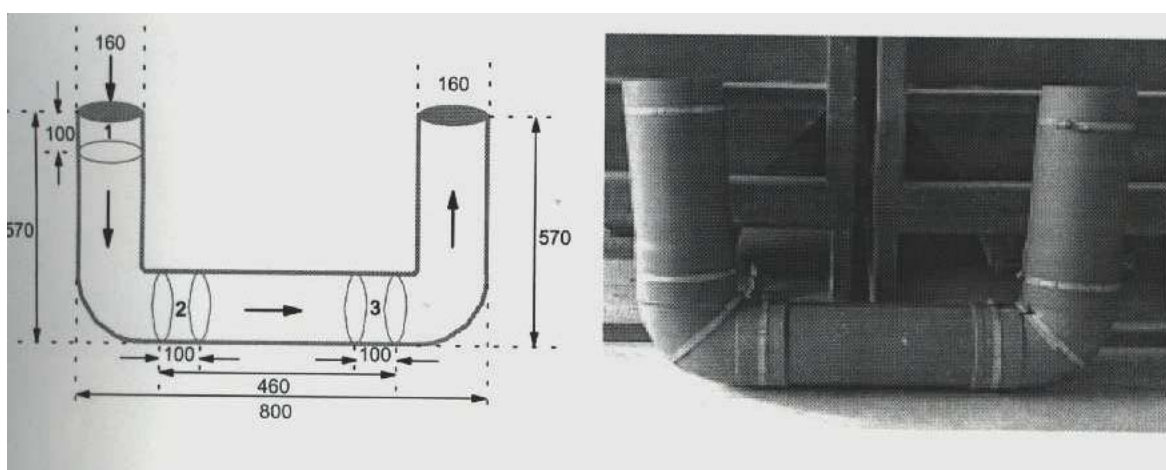


Figura 2.12 – Medidas recomendadas e ilustração do Tubo U (fonte: TUTIKIAN, 2004).

2.4.4 MÉTODOS DE DOSAGEM.

Um dos fatores que pode estar retardando o uso do concreto auto-adensável em edificações, no Brasil e no mundo, é a falta de métodos de dosagem eficientes, que permitam o uso irrestrito da mistura com materiais locais viáveis, tanto econômica quanto tecnicamente. Osawa desenvolveu o CAA em 1988, baseado em pontos específicos propostos por Okamura, os quais continuam sendo seguidos por muitos pesquisadores e grupos, como EFNARC (2002) e Bosiljkov (2003), mas os parâmetros de dosagem foram estimados através de ensaios realizados na época com o intuito de obter algum ponto de partida, ou seja, devem ser aprimorados e ajustados para os materiais disponíveis atualmente, pois alguns componentes não existiam ou foram melhorados, como os aditivos (TUTIKIAN, 2004).

Alguns métodos de dosagens para CAA, tais como de Okamura (1995), de Gomes (2002) e de Su *et al* (2001) serão descritos resumidamente, por serem os mais fáceis de se reproduzir ou por serem considerados os mais importantes para o desenvolvimento desta pesquisa. Serão ressaltadas algumas das vantagens e desvantagens de cada método proposto.

2.4.4.1 Método de Okamura

Okamura desenvolveu um método de proporcionamento para o concreto auto-adensável em 1995 (OKAMURA e OUCHI, 2003), ao aprimorar suas premissas definidas em 1986, com o intuito de resolver o problema da baixa durabilidade das construções japonesas e diminuir o número de trabalhadores qualificados nos canteiros de obra. Para um concreto ser dosado de modo que cumpra os requisitos da auto-adensabilidade, deve possuir (OKAMURA e OUCHI, 2003):

- Limitada quantidade de agregados,
- Baixa relação água/cimento,
- Altas dosagens de aditivos superplastificantes.

No método são fixadas a quantidade de agregado graúdo em 50% do volume total de sólidos da mistura, e a quantidade de agregado miúdo em 40% do volume da argamassa. Um esquema do procedimento da dosagem de Okamura está representado na Figura 2.13, onde estas quantidades estão representadas. A dosagem do aditivo superplastificante e a relação água/cimento não foram quantificadas, embora Okamura (1997) especifique que a relação a/c deve se situar entre 0,90 e 1,00, em volume, dependendo das propriedades dos finos, enquanto o aditivo é determinado experimentalmente, até o material apresentar as características esperadas.

Na Figura 2.14 pode-se analisar, segundo Okamura e Ouchi (2003), um comparativo entre as proporções dos materiais do CAA e do concreto convencional. Observa-se que as quantidades de ar incorporado, água e agregado miúdo ficam constantes, aumentam os finos (cimento, filer, adições e outros) do CAA em relação ao consumo de cimento do concreto convencional, e este aumento é compensado com a diminuição do agregado graúdo. Ou seja, simplesmente troca-se brita por finos e adiciona-se aditivo para a obtenção do CAA (TUTIKIAN, 2004).

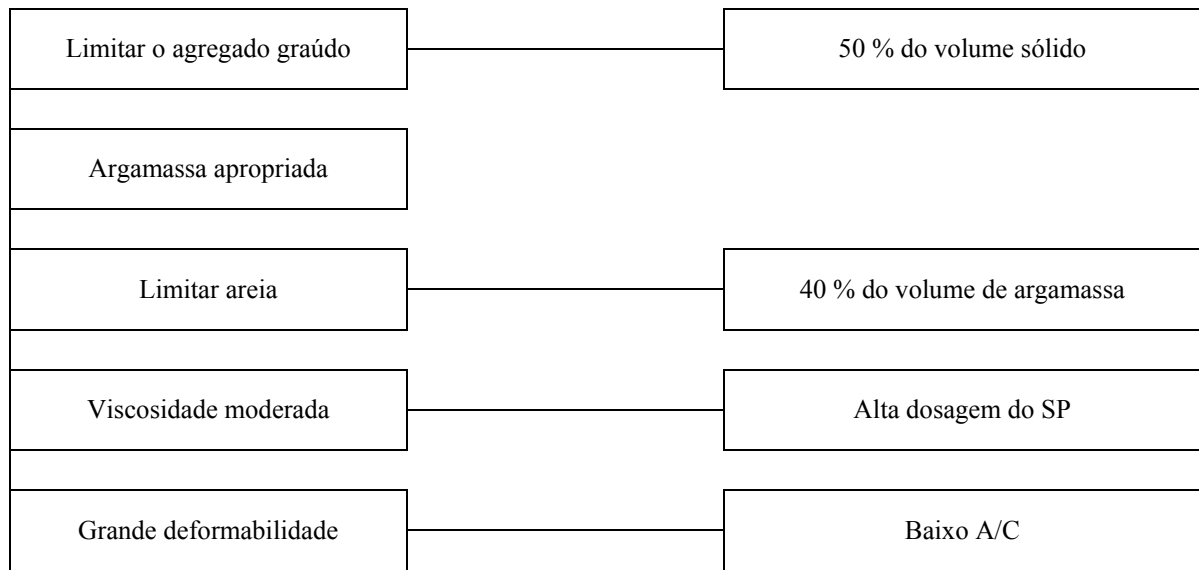


Figura 2.13 – Esquema do procedimento de dosagem (fonte: OKAMURA e OUCHI, 2003)



Figura 2.14 – Comparação das dosagens de CC e CAA (fonte: OKAMURA e OUCHI, 2003)

Os ensaios sugeridos por Okamura para controle deste método de dosagem são: Caixa U, Funil V e Teste do Espalhamento, para verificação se o concreto é auto-adensável para a estrutura a concretar, se a dosagem esta adequada e para caracterização dos concretos. Os ensaios de Espalhamento e Funil V em escala reduzida, apresentados na Figura 2.15 e na Figura 2.16, respectivamente, devem ser aplicados caso a mistura necessite de correções (MENDES, 2009).

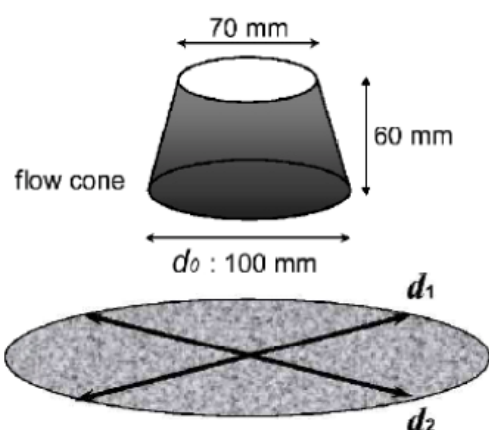


Figura 2.15 - Espalhamento para argamassas
(fonte: OKAMURA e OUCHI, 2003)

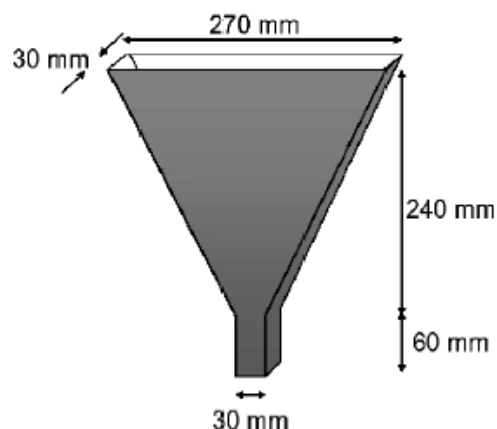


Figura 2.16 - Funil V para argamassas
(fonte: OKAMURA e OUCHI, 2003)

As considerações iniciais de Okamura em 1986, que posteriormente transformar-se-iam em um método de dosagem, em 1995, foram muito importantes para o desenvolvimento do moderno concreto auto-adensável. Estas considerações foram a base do estudo e sem elas, provavelmente, não existiria atualmente este tipo de mistura. Mas são apenas os primeiros passos, não devendo serem mais utilizadas, pois não há como dosar um concreto apenas com limites superiores de quantidade e com termos altamente abrangentes, como alta dosagem de aditivo superplastificante e baixa relação a/c. Este método também não considera a utilização de finos pozolânicos, como sílica ativa, metacaulim ou cinza volante e aditivos modificadores de viscosidade. Também não possui uma sequencia clara de passos a serem seguidos, fazendo com que, se um responsável por dosagem utilizar este método, teria de realizar inúmeras tentativas para alcançar os requisitos esperados. Também observa-se que, apesar de Okamura propor a execução de ensaios para medir a trabalhabilidade da argamassa em tamanho reduzido, não se conhece os limites esperados (TUTIKIAN, 2004).

2.4.4.2 Método de Su et al

Este método é a descrição de um passo-a-passo com o objetivo de se obter uma primeira mistura de um concreto auto-adensável, cuja principal consideração é o preenchimento do vazio do esqueleto dos agregados graúdos pouco compactados com argamassa. Normalmente a taxa de compactação de agregados graúdos é de 52 a 58%, ou seja, há de 42 a 48% de vazios que necessitam ser ocupados pela argamassa do concreto. Segundo Tutikian (2004), com este método é preciso somente que se escolha materiais adequados, faça os cálculos, os testes de trabalhabilidade e ajustes finais de traço e se obterá um

concreto auto-adensável com elevada fluidez e resistência à segregação, segundo as especificações da *Japanese Society of Civil Engineering (JSCE) apud Su et al.*(2001), ilustradas na Tabela 2-12.

Tabela 2-12 – Especificações para o CAA.

Classe de fluidez do concreto		1	2	3
Condições de construção	Abertura crítica (mm)	30-60	60-200	≥200
	Taxa de armadura (kg/m ³)	≥350	100-350	≤100
Caixa U (mm)		≥300	≥300	≥300
Volume absoluto de agregado graúdo por volume de CAA (m ³ /m ³)		0,28-0,30	0,30-0,33	0,30-0,36
Fluidez	Espalhamento (mm)	650-700	600-700	500-650
Resistência à segregação	Funil V (s)	10-20	7-20	7-20
	Espalhamento T ₅₀ cm (s)	5-25	3-15	3-15

(fonte: *Japanese Society of Civil Engineering (JSCE) apud SU et al.*, 2001)

Inicialmente são calculadas as massas de agregados miúdos e graúdos, através das equações 1 e 2. A dimensão máxima do agregado graúdo pode ser de 15 mm, 20 mm e 25 mm, mas a de 20 mm é a mais comum.

$$M_g = FV * M_{unitg} * (1 - S/m) \quad (\text{eq. 1})$$

$$M_a = FV * M_{unita} * (1 - S) \quad (\text{eq. 2})$$

Onde:

- M_g é a massa do agregado graúdo (kg/m³);
- M_a é a massa do agregado miúdo (kg/m³);
- FV é a fração de volume dos agregados compactados;
- M_{unitg} é a massa unitária do agregado graúdo no estado solto;
- M_{unita} é a massa unitária do agregado miúdo no estado solto;
- S/m é o fator de agregados miúdos em relação ao total de agregados, que varia de 50 a 57%.

Em seguida é calculado o consumo de cimento mediante da equação 3. Os autores recomendam que seja utilizado no mínimo 270-290 kg/m³ para garantir estruturas com alta durabilidade, mas deve-se ter cuidado, pois alta quantidade de cimento aumenta a retração do concreto. Em Taiwan, utiliza-se a relação 0,14 MPa/kg ou 20 psi/kg de cimento.

$$C = \frac{f_c}{0,14} \quad (\text{eq. 3})$$

Onde:

- f_c é a resistência à compressão requerida;
- C é o consumo de cimento (kg/m³).

A parte seguinte, do cálculo da quantidade de água na mistura, o método é bastante similar ao cálculo com o concreto convencional. Com a quantidade de cimento já determinada, deve-se estabelecer a relação água/cimento em função das solicitações locais, e calcular a água através da equação 4.

$$A = \frac{a}{c} * C \quad (\text{eq. 4})$$

Onde:

- A é a quantidade de água (kg/m³);
- a/c é a relação água/cimento;
- C é a quantidade de cimento (kg/m³).

Na próxima etapa são realizados os cálculos das quantidades de cinza volante e escória de alto forno. No concreto auto-adensável é necessário uma grande quantidade de materiais finos para aumentar a fluidez e facilitar a auto-adensabilidade, mas deve-se ter cuidado pois o excesso de cimento aumenta o custo do concreto, bem como a retração e ainda deve aumentar a resistência à compressão a níveis acima do desejado. Por isto, este método utiliza a relação a/c e a quantidade de cimento para alcançar as características de projeto, e a cinza volante e escória alto forno para garantir a resistência à segregação e elevar a

porcentagem de pasta. Como já se tem as quantidades de todos os outros componentes do CAA, o volume que falta para completar 1m^3 pertence a estas duas adições, como ilustra a equação 5.

$$V_{pcv} + V_{pes} = 1 + \frac{Mg}{1000M_{espg}} - \frac{Ma}{1000M_{espa}} - \frac{C}{1000M_{espc}} - \frac{A}{1000M_{espa}} - Var \quad (\text{eq. 5})$$

Onde:

- V_{pcv} é o volume de cinza volante (m^3);
- V_{pes} é o volume de escória de alto forno (m^3);
- M_{espg} é massa específica do agregado graúdo (kg/m^3);
- M_{espa} é a massa específica do agregado miúdo (kg/m^3);
- M_{espc} é a massa específica do cimento (kg/m^3);
- M_{espa} é a massa unitária da água (kg/m^3);
- Var é o volume de ar incorporado ao CAA (%).

na equação 6 tem-se:

$$V_{pcv} + V_{pes} = \left(1 + \frac{a}{cv}\right) * CV\% * \frac{Mt}{1000M_{espcv}} + \left(1 + \frac{a}{es}\right) * ES * \frac{Mt}{1000M_{espes}} \quad (\text{eq. 6})$$

Onde:

- Mt a massa total dos materiais pozolânicos (kg);
- CV é a porcentagem de cinza volante;
- ES é a porcentagem de escória de alto forno;
- a/cv é a relação água/cinza volante;
- a/es é a relação água/escória de alto forno;

- M_{espcv} é a massa específica da cinza volante;
- M_{espes} é a massa específica da escória de alto forno.

Os autores consideram que a relação água/cimento é igual à relação água/cinza volante e água/escória, as massas específicas se obtêm através de ensaios normalizados, através da ABNT NBR NM 23: 2001 e a porcentagem de cinza volante e a porcentagem de escória de alto forno são definidas pela experiência do profissional ou pelas características dos materiais. O cálculo das massas das adições é feito diretamente pelas equações 7 e 8.

$$M_{cv} = CV\% * M_t \quad (\text{eq. 7})$$

$$M_{es} = ES\% * M_t \quad (\text{eq. 8})$$

Onde:

- M_{cv} é massa de cinza volante;
- M_{es} é massa de escória de alto forno.

A água requerida para a mistura devido a estes materiais é dada pelas equações 9 e 10.

$$A_{cv} = \frac{a}{c} * M_{cv} \quad (\text{eq. 9})$$

$$A_{es} = \frac{a}{es} * M_{es} \quad (\text{eq. 10})$$

Onde:

- A_{cv} é a água requerida pela cinza volante;
- A_{es} é a água requerida pela escória de alto-forno;

A etapa seguinte é o cálculo da quantidade total da água, que é a soma de água requerida pelo cimento, cinza volante e escória alto-forno, como mostra a equação 11, e se recomenda que fique entre 160 e 185 kg/m³.

$$At = Ac + Acv + Aes \quad (\text{eq. 11})$$

Onde:

- At é a quantidade de água total;

Na próxima etapa é calculada a dosagem de aditivo superplastificante (SP). Ao se adicionar corretamente o aditivo, pode-se aumentar a fluidez, a habilidade do CAA passar por obstáculos e a resistência à segregação, permitindo alcançar as características esperadas. O aditivo é composto por partículas sólidas ($m\%$) e água (A_{sp}), a qual deve ser descontada da água da mistura. A dosagem do SP é igual a $n\%$ da massa dos aglomerantes, assim as equações 12 e 13 permitem o cálculo da massa do aditivo (M_{sp}) e da quantidade de água presente (A_{sp}).

$$M_{sp} = n\%(C + M_{cv} + M_{es}) \quad (\text{eq. 12})$$

$$A_{sp} = (1 - m\%) * M_{sp} \quad (\text{eq. 13})$$

Onde:

- M_{sp} é a massa de superplastificante;
- A_{sp} é massa de água presente no superplastificante;

Na sequencia é calculada a real quantidade de água que deve ser ajustada caso os agregados utilizados estejam úmidos.

Nesta etapa os primeiros traços devem ser preparados para que se observe se a mistura está de acordo com o planejado e para que se realize os ensaios de trabalhabilidade propostos, ou seja, os resultados do Espalhamento, da Caixa U, da Caixa L e do Funil V devem estar dentro das especificações já comentadas, a exsudação e segregação devem ser satisfatórias, a relação a/agl deve satisfazer os requisitos de desempenho e durabilidade e o ar incorporado deve estar de acordo com o programado.

Por último é realizado o ajuste final da mistura. Caso algum dos requisitos acima não estejam sendo atendidos, ajustes devem ser feitos de modo que o concreto se enquadre nos limites de auto-adensabilidade. Por exemplo, se a mistura estiver pouco fluida, deve-se

aumentar a dosagem de aditivo ou a argamassa do concreto, para aumentar a trabalhabilidade.

Segundo Tutikian (2004), este método, proposto por Su *et al.* (2001), é o mais usual para dosagem de concretos auto-adensáveis de resistências à compressão convencionais, pois é simples e considera algumas variações dos materiais, o que o torna mais confiável. Este autor conclui ainda que este procedimento possui alguns pontos que merecem serem estudados profundamente, como as incógnitas de cálculo da quantidade de agregados, o cálculo do consumo de cimento, da cinza volante e da escória alto forno e suas proporções.

É necessário que se determine vários parâmetros para o cálculo da quantidade de agregados do CAA, como a fração de volume dos agregados compactados, suas massas unitárias e a relação agregado miúdo/total de agregados. Para alcançar este objetivo, é necessária a execução de testes específicos para tal ou então utilizar valores encontrados por outros pesquisadores, realizados com outros materiais, que nem sempre são parecidos com os valores reais. Outro ponto questionável é o cálculo do consumo de cimento, que depende exclusivamente da resistência à compressão requerida.

Sabe-se que existem diversos tipos de cimentos, de agregados, de adições e de aditivos que influem na resistência final. Se for pretendido estabelecer uma equação universal para o cálculo do consumo de cimento, certamente todas estas variáveis devem ser incluídas. Finalmente, o método permite apenas a utilização de cinza volante e escória alto forno como adições, quando se sabe que existem outras disponíveis, como sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz, e dependendo do local da dosagem, estas últimas podem ser mais econômicas, sendo interessante seu uso. E, de acordo com o método, se calcula a soma de consumo da cinza volante e da escória alto forno, onde a porcentagem de cada uma das adições é determinada pela experiência do responsável pela dosagem, ou seja, pode acontecer de se ter de fazer dezenas de experimentos para que se encontre a melhor relação entre as adições (TUTIKIAN, 2004).

2.4.4.3 Método de Gomes

O método desenvolvido por Gomes (2002) é voltado para a dosagem de CAA de alta resistência (CADAR) e o procedimento está ilustrado na Figura 2.17. O concreto de alta

resistência (CAR) já era uma realidade em muitos países, devido suas elevadas propriedades mecânicas e de durabilidade. Assim acredita-se que, se as vantagens do CAA forem acrescentadas às do CAR, o CADAR terá um futuro promissor (TUTIKIAN, 2004).

No método são designadas as relações água/cimento (a/c), sílica ativa/cimento (sf/c), superplastificante sólido/cimento (sp/c) e filer/cimento (f/c). No caso de um concreto de alta resistência, a dosagem de sílica ativa ou microssílica ou fumo de sílica deverá ser fixado em 10 % em massa de cimento, levando em consideração que este é um percentual ótimo para um concreto de alta resistência em termos de benefícios e custo (LISBÔA, 2004).

O procedimento considera o concreto composto por duas fases, sendo uma fase a pasta e a outra o esqueleto granular, e estas fases podem ser obtidas e otimizadas separadamente, buscando as propriedades desejadas do material. De acordo com Gomes (2002), para ser considerado de alta resistência, o CAA deve alcançar os 50 MPa aos 7 dias, resistências baseadas nas pesquisas anteriores realizadas por De Larrard, em 1992, e Toralles-Carbonari *et al.* em 1996 (Gomes, 2002). Os seguintes parâmetros deverão ser obedecidos:

- a) apresentar baixa relação água/aglomerante ($a/agl < 0,40$);
- b) aperfeiçoar as relações aditivo superplastificante / cimento (sp/c) e finos / cimento (f/c) para que se obtenha pasta com alta fluidez e boa coesão;
- c) determinar um esqueleto granular com mínimo de vazios possível;
- d) determinar uma pasta que atenda os requisitos de CAA no estado fresco, como capacidade de preenchimento das fôrmas, capacidade de passar obstáculos, resistência à segregação e resistência à compressão no estado endurecido.

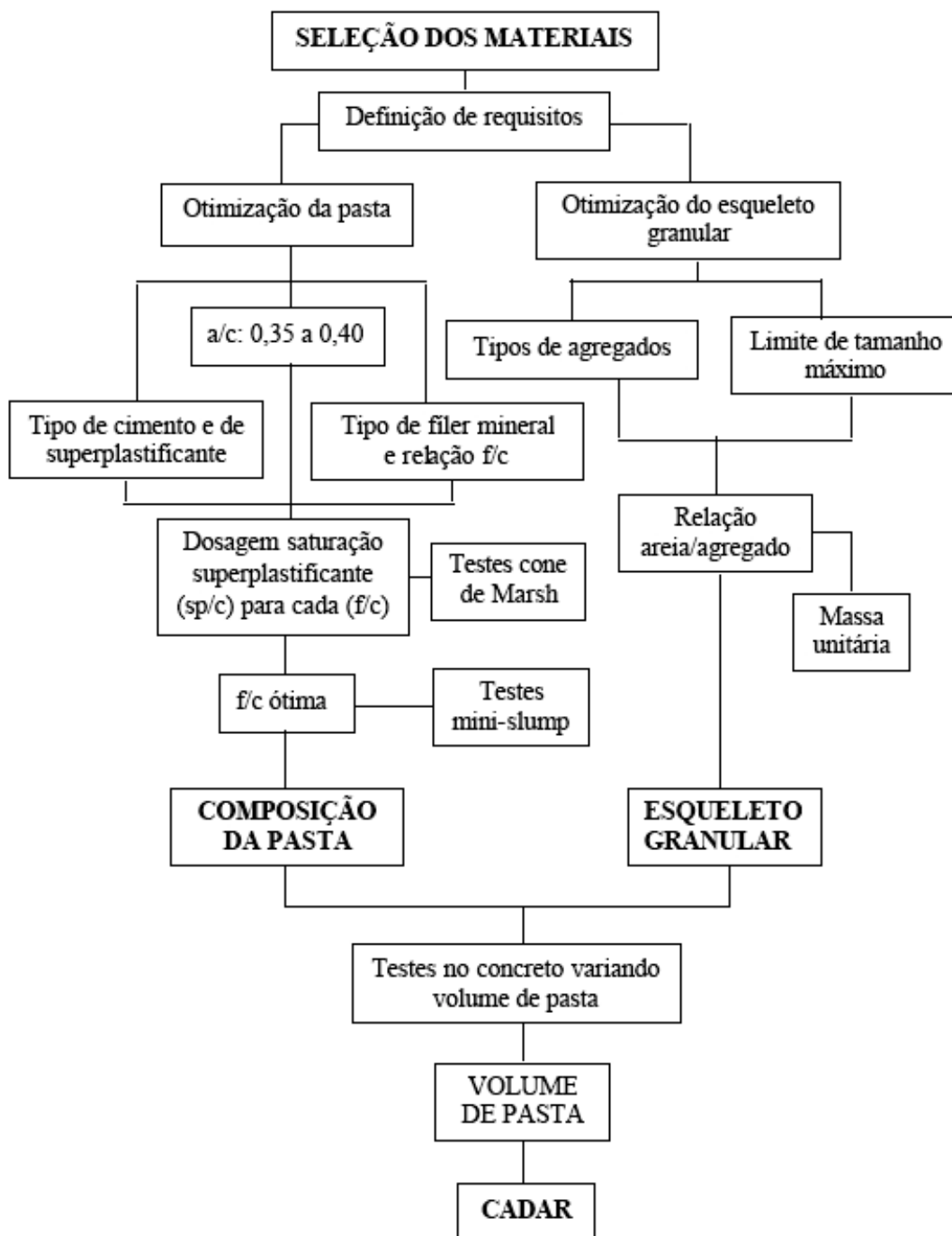


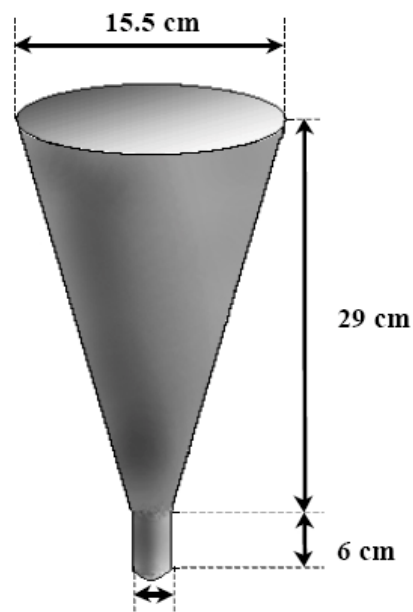
Figura 2.17 – Diagrama do método de dosagem de Gomes
(fonte: LISBÔA, 2004)

Para a realização deste estudo, Gomes utilizou um cimento de alta resistência inicial; foi utilizado juntamente com uma sílica ativa com baixa demanda de água, um superplastificante copolímero de última geração, um filler com tamanho máximo das partículas em torno de 80µm e baixa demanda de água e agregados com baixo coeficiente de absorção.

A composição da pasta é definida pela quantidade de cimento e das relações a/c, sp/c, sf/c e f/c. Como já foi exposto anteriormente, para um concreto de alta resistência, é fixado, a princípio, a relação água/finos = 0,4 (limite superior) e a relação sf/c = 0,1 (10 % da massa do cimento), sendo que, em função disso, os parâmetros a serem determinados neste caso são as relações sp/c e f/c.

Para determinar a dosagem de superplastificante é utilizado o ensaios do cone de Marsh, com abertura de saída de 8 mm de diâmetro conforme Figura 2.18. Tal procedimento consiste em introduzir 1 litro de pasta no cone e medir o tempo (T) que passa, para 500 ml de pasta fluir completamente pela abertura inferior do cone. A quantidade de cimento, água e filer foram fixadas, anteriormente, a variável é a quantidade sólida de superplastificante. O ponto de saturação significa a relação sp/c para a qual um incremento da dosagem de superplastificante não provoca nenhuma melhora significativa na fluidez da pasta. Mas, a dosagem de superplastificante correspondente ao ponto de saturação, depende da relação f/c da pasta, das quais devem ser realizados ensaios para distintos valores da relação citada, de forma que podem ser adotados valores de 0,1 a 0,5 para f/c.

Para a obtenção da dosagem ótima de filer utilizou-se o ensaio de mini-slump. O equipamento, proposto por Kantro, 1980 (GOMES, 2002), consiste de um molde em forma de tronco de cone, como mostra a Figura 2.19. No ensaio se mede o diâmetro da extensão final, em paralelo com o tempo gasto para se alcançar um diâmetro de 115 mm, denominado de T₁₁₅. Os ensaios são realizados com diferentes relações f/c, cada uma com sua dosagem de superplastificante, correspondente ao ponto de saturação, já determinada, anteriormente, com ensaios do cone de Marsh, já citados anteriormente. A relação f/c ótima, da pasta, é aquela que apresenta um diâmetro de extensão final de 180 ± 10 mm e um tempo T₁₁₅ no intervalo de 2 a 3,5 s. Os ensaios das pastas com o cone de Marsh e o mini-slump permitem obter as respectivas relações de sp/c e f/c, que geram misturas de concreto, com fluidez máxima, sem segregação e com alto nível de coesão interna, coesão essa, que não prejudique significativamente a fluidez do material (GOMES, 2002).



Diâmetro da abertura: 8 mm para pasta de cimento
12,5 mm para argamassa

Figura 2.18 – Dimensões do cone de *Marsh*
(fonte: GOMES, 2002)

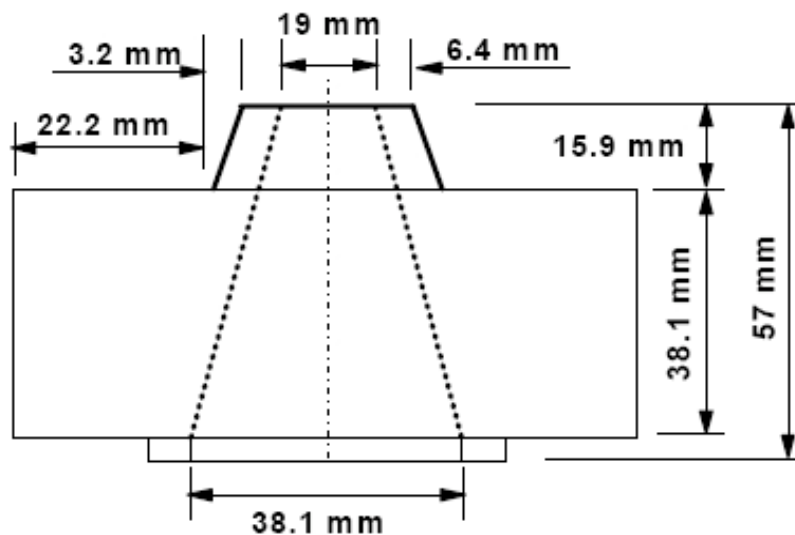


Figura 2.19 – Aparato do mini slump
(fonte: GOMES, 2002)

Para a definição do esqueleto granular, determina-se a relação areia/brita, segundo um critério de máxima densidade em seco e sem compactação, no sentido de ser obtida uma mínima quantidade de vazios entre os dois materiais. O ensaio consiste em preencher um recipiente com 5 litros de uma mistura seca com uma certa relação areia/brita. A partir dos

dados dos dois materiais, densidades e peso de cada componente, obtêm-se a massa unitária e o volume de vazios de cada mistura. O ensaio é realizado para várias relações entre os componentes, até se chegar a conclusão de qual relação entre eles, apresenta maior densidade e menor volume de vazios.

Determinadas as relações ótimas de sp/c e f/c para a pasta e a relação areia/brita, segundo o critério de maior densidade com menor volume de vazio, se faz necessária a obtenção do volume de pasta ótimo para satisfazer as condições de resistência e auto-adensamento exigidos pelo concreto. Em função de tais parâmetros pré-estabelecidos, são produzidos concretos com diferentes quantidades ótimas de pasta, em função de cada tipo de aplicação. A quantidade mínima de pasta deve preencher os vazios do esqueleto granular, proporcionando a característica de auto-adensamento no estado fresco e a resistência a compressão desejada no estado endurecido. Desta forma, os concretos devem ser submetidos aos diversos ensaios no estado fresco, no sentido de satisfazer as faixas de parâmetros, que confirmam sua característica de auto-adensamento. Os parâmetros que conferem o auto adensamento são estabelecidos através de ensaios, de acordo com os critérios de capacidade de preenchimento, capacidade de passagem entre armaduras e estabilidade ou ausência de segregação. Para o estabelecimento dos parâmetros da capacidade de preenchimento são utilizados os ensaios de Espalhamento (cone de Abrams) e Funil V, para os parâmetros da capacidade de passagem por armaduras é usada a Caixa L e finalmente para os parâmetros de ausência de segregação é utilizado o ensaio do Tubo em U. Na Tabela 2-13 estão apresentados os parâmetros estabelecidos para o atendimento dos critérios citados (LISBÔA, 2004).

Tabela 2-13 – Faixa dos parâmetros que asseguraram o auto-adensamento dos concretos.

Propriedades	Ensaio	Parâmetros	Faixa ideal
Capacidade de preenchimento	<i>Slump Flow</i>	Extensão final de fluxo	60 a 75 cm
		T_{50}	5 ± 2 s.
	Funil V	Tempo total de fluxo	10 ± 3 s.
Capacidade de passagem	Caixa L	T_{L20}	$1 \pm 0,5$ s.
		T_{L40}	1,5 s. a 3,0 s.
		$RB=H_2/H_1$	= 80
Estabilidade	Tubo em U	Relação de segregação	= 90

2.4.4.4 Método Tutikian (2004)

Este método tem como objetivo principal desenvolver um método de dosagem que atenda os requisitos necessários para a produção do CAA em qualquer região do Brasil, ou seja, independente do local aproveitar os materiais disponíveis da região e no caso mais extremo trazer de fora um dos componentes necessários. Basea-se no método IPT/EPUSP para concretos convencionais (TUTIKIAN, 2004).

Ainda de acordo com esse objetivo vem a tentativa de trazer a todos os construtores uma alternativa na hora de decidir qual concreto utilizar em sua obra, e na composição da argamassa rica em finos, a possibilidade de utilização de resíduos de diversas indústrias, como os pozolânicos (cinza de casca de arroz, sílica ativa, metacaulim, escória alto forno e outros), ou não pozolânicos (cerâmica moída, fíler calcáreo e outros) desde que tenham uma área superficial maior do que a dos elementos que estão substituindo (TUTIKIAN, 2004).

O método IPT/EPUSP baseia-se em montar um modelo de comportamento conforme Figura 2.20 que através da trabalhabilidade determina-se a relação a/c , a quantidade de agregado (m), o consumo de cimento por m^3 de concreto e a resistência do concreto.

A partir dos resultados do concreto, elabora-se o diagrama de dosagem composto por quadrantes nos quais obtém por meio analítico de cálculo as leis de comportamento dos concretos elaborados com os mesmos materiais segundo Helene e Terzian (1992). Um quadrante relaciona a relação água/cimento com a resistência à compressão segundo a Lei de Abrams. Outro quadrante relaciona o relação água/cimento com o teor de agregados segundo a Lei de Lyse. Um terceiro quadrante, relaciona o teor de agregados com o consumo de cimento, seguindo a equação de Molinari.

Este método leva em consideração num estudo de dosagem quatro materiais: cimento, água, agregado miúdo e agregado graúdo, quantidade esta que dificulta a montagem do modelo de comportamento, segundo Helene e Terzian (1992), e quando este método é estendido para o CAA é adicionado mais dois componentes: finos e aditivos. A Figura 2.21 mostra um resumo das etapas para a montagem de uma dosagem de CAA sugerida por Tutikian (2004).

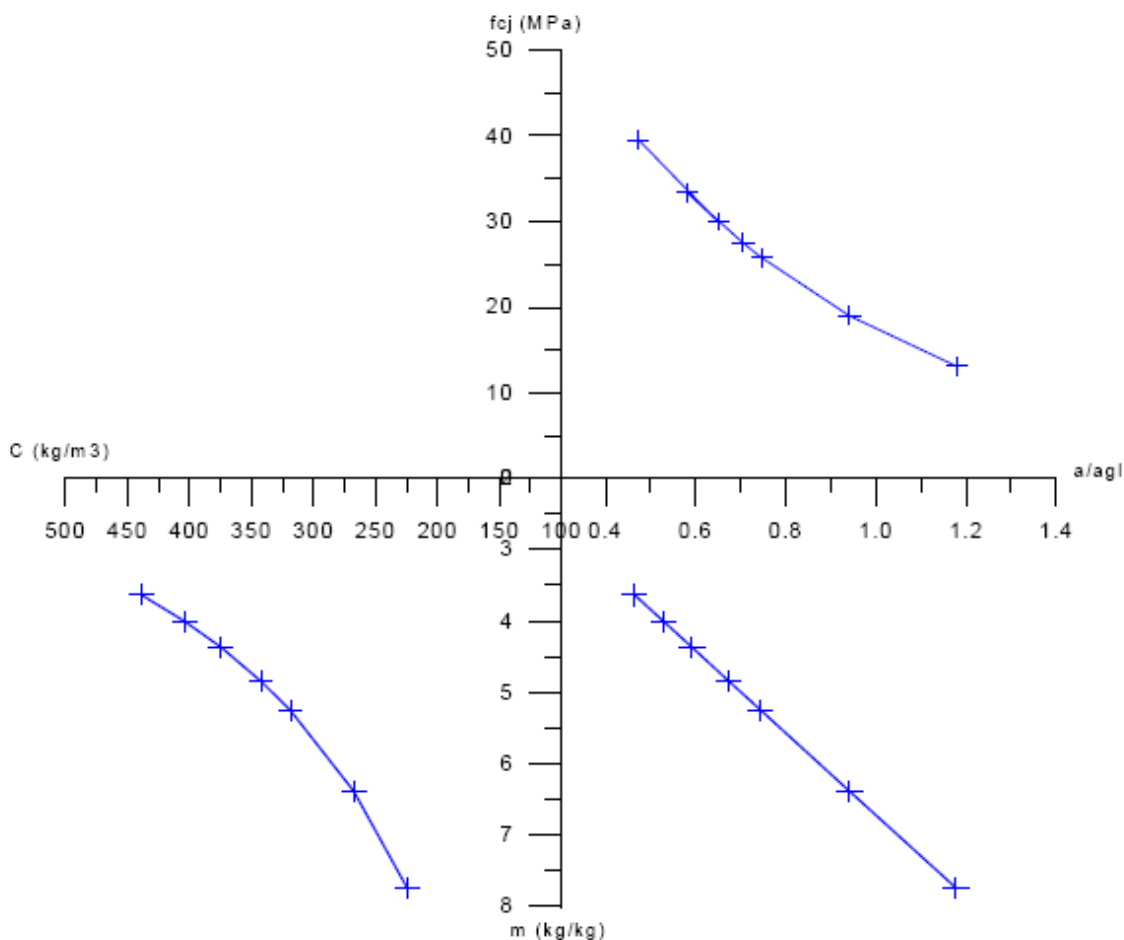


Figura 2.20– Modelo de comportamento
(fonte: TUTIKIAN, 2004)

Para este autor a escolha do agregado graúdo deve limitar a dimensão máxima do agregado a 20 mm e no máximo um terço do espaçamento das barras de aço da estrutura a ser concretada com CAA. Em modo geral deve-se optar por materiais abundantes na região e que o responsável pela dosagem já tenha um conhecimento.

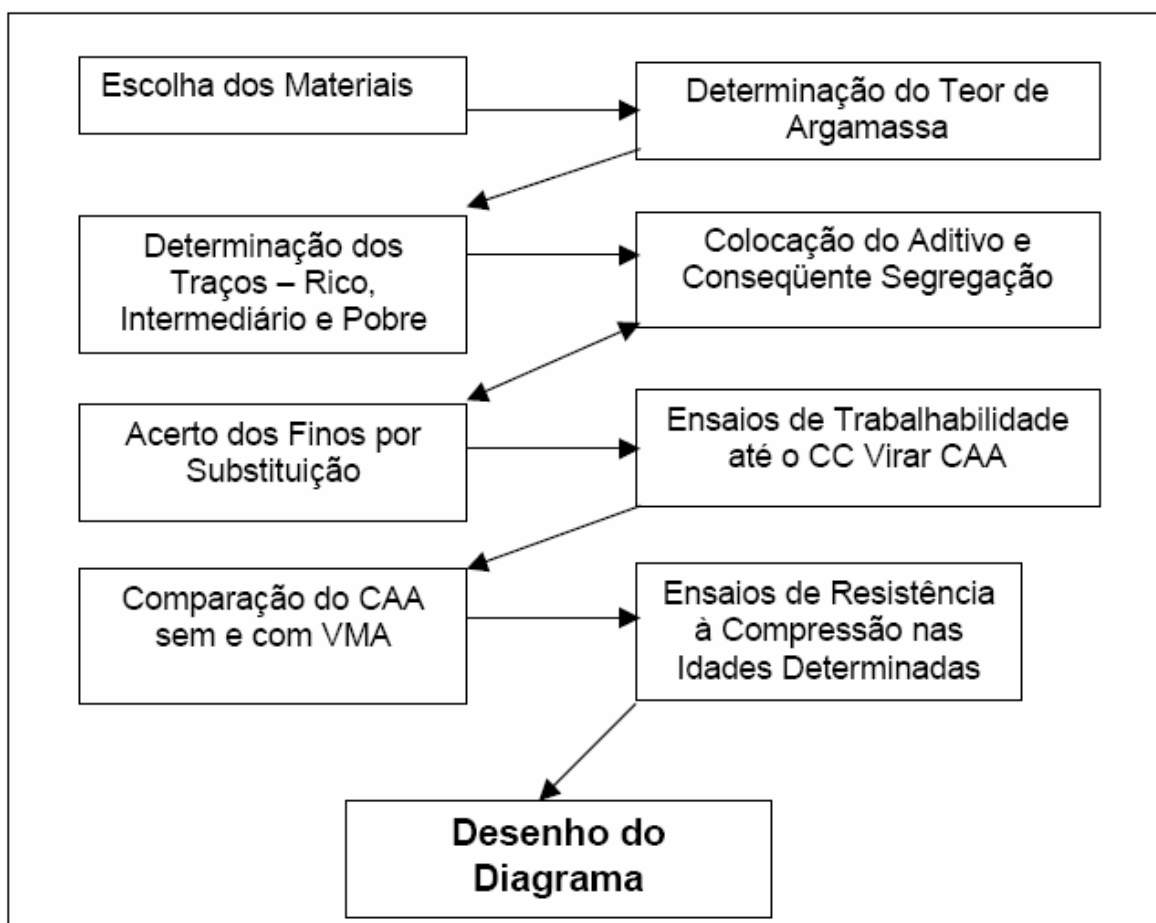


Figura 2.21 – Passo-a-passo para dosagem do CAA
(fonte: TUTIKIAN, 2004)

Na definição do teor de argamassa, determinado pela equação 14 apresentada pelo método IPT/EPUSP, deve-se optar pelo volume que preencha os vazios deixado pelo agregado graúdo para que o CAA seja viável economicamente e diminua as chances de manifestações patológicas. Nesta etapa não se faz uso de aditivos.

$$\alpha = \frac{(1 + \alpha)}{(1 + m)} \quad (\text{eq. 14})$$

onde:

α = teor de argamassa seca, deve ser constante para uma situação, em kg/kg;

a = relação agregado miúdo seco / cimento em massa, em kg/kg;

m = relação agregados secos / cimento em massa, em kg/kg.

Na sequência são executados os três traços básicos para determinação do diagrama de dosagem: o rico, o intermediário e o pobre. Com o diagrama montado o próximo objetivo é determinar o teor ideal de aditivo em relação a massa de cimento, este valor é definido visualmente até que o concreto esteja bem fluido sem levar em conta a segregação do concreto, Tutikian (2004) recomenda iniciar os estudos com teor de aditivo de 0,30%.

Posteriormente tem-se a adição de finos, quando pozolânicos substituem o cimento, no contrário, substituem o agregado miúdo. Este fato é devido aos componentes pozolânicos reagirem com o Ca(OH)_2 composto químico lixiviável proveniente da hidratação do cimento, melhorando a durabilidade do concreto, segundo Tutikian (2004). O ponto ideal da adição de finos é definido nos ensaios de trabalhabilidade, a coesão do concreto deve ser definida também pela adição de finos, quando não for possível deve-se utilizar aditivos modificadores de viscosidade (VMA), mas deve ser evitado o uso dos VMA, pois influi diretamente na viabilidade econômica do CAA.

Após verificar os métodos aqui apresentados, decidiu-se pela utilização do Método de Tutikian (2004) por se tratar de um método que consiste em produzir um CAA a partir de um CCV, dosado conforme método IPT/EPUSP. Esta etapa foi realizada em pesquisa desenvolvida por Fonseca (2006), e será aproveitada para o desenvolvimento do CAA com o ART.

Dessa forma, os procedimentos seguintes foram direcionados para a obtenção dos parâmetros necessários para a aplicação do método escolhido e para se obter um concreto com características adequadas para sua aplicação na construção civil.

2.5 ADITIVOS

Os aditivos utilizados para CAA são o superplastificante, responsável pela fluidez do concreto, e o modificador de viscosidade, responsável pela coesão da mistura, utilizado ocasionalmente quando na ausência de componentes finos economicamente ou tecnicamente inviáveis. Os aditivos superplastificantes podem ser divididos em quatro grupos, sendo os lignossulfonatos ou lignossulfonatos modificados (LS), sais sulfonatos de policondensado de naftaleno e formaldeído (NS), sais sulfonatos de policondensado de melanina e formaldeído (MS) e policarboxilatos (PC).

Os lignossulfonatos, LS, são conhecidos como aditivos plastificantes de primeira geração e utilizados como redutores de água normais e, em alguns casos, também como superplastificantes. O NS e o MS, naftaleno e melanina, respectivamente, são conhecidos comercialmente como aditivos superplastificantes de segunda geração e permitem a redução em até 25% a quantidade de água na mistura, quando usados como redutores de água. Os policarboxilatos, PC, são aditivos mais aconselháveis para a utilização em CAA, por serem superplastificantes de alta eficiência, que dispersam e desfloculam as partículas de cimento, permitem a redução da água de mistura em até 40%, mantendo a mesma trabalhabilidade (TUTIKIAN, 2004).

Este autor coloca ainda que os aditivos superplastificantes, além das funções citadas, podem também auxiliar na fluidez da mistura, através da redução da tensão superficial da água, da repulsão eletrostática entre partículas, atuando como filme lubrificador entre as partículas de cimento, na dispersão dos grãos de cimento, inibição da hidratação superficial do cimento, deixando mais água livre para fluidificar o concreto e na mudança da morfologia dos produtos de hidratação.

2.6 CONCRETO DE REFERÊNCIA – CCV (FONSECA, 2006)

Os estudos prévios que foram base para este trabalho foram realizados por Fonseca (2006). Desta forma serão apresentados os principais resultados do concreto. Este concreto foi dosado conforme método do IPT/EPUSP. Trata-se de um método semi-experimental, dividido em uma parte experimental de laboratório e uma parte analítica de cálculo.

Este método aplica-se para concretos com agregados naturais com traços em massa, já para os concretos com agregados reciclados, como é o caso do ART, alguns cuidados devem ser tomados como controlar a quantidade de água suficiente para garantir a trabalhabilidade da mistura, desde que não haja excesso de água, fato que comprometeria o uso racional de cimento para alcançar a resistência desejada a um custo compatível.

Em seus estudos, Fonseca (2006) comparou concretos produzidos com: 100% de agregado gráúdo natural, 100% de ART gráúdo, e 50% de agregado gráúdo natural e 50% de ART gráúdo. Foram estudados traços de concreto com consumo de cimento rico, normal e

pobre. Os traços finais e o consumo de cimento por metro cúbico para os concretos com 100% de ART graúdo, estão relacionados na Tabela 2-14.

Tabela 2-14 – Traços de concreto com ART graúdo.

Traço	Consumo de cimento/m ³	Cimento	Areia natural	ART Graúdo	Relação água/cimento
Rico	485,2	1	1,25	1,45	0,400
Normal	364,6	1	1,95	1,88	0,545
Pobre	279,4	1	2,75	2,42	0,678

(fonte Fonseca, 2006).

Fonseca (2006) realizou ensaios para a determinação da massa específica, conforme norma ABNT NBR 9833: 1987 e do abatimento do tronco de cone, conforme norma ABNT NBR NM 67: 1998. Os valores obtidos destes ensaios estão descritos na Tabela 2-15.

Tabela 2-15 – Resultados de ensaios de massa específica no estado fresco e abatimento do tronco de cone.

Traço	Massa Específica (kg/m ³)	Abatimento (mm)	Relação água/cimento
Rico	2215	75	0,400
Normal	2180	80	0,545
Pobre	2176	82	0,678

(fonte Fonseca, 2006).

Para a verificação das propriedades no estado endurecido, foram executados os seguintes ensaios que têm interesse para a realização deste trabalho: determinação da resistência à compressão, conforme norma ABNT NBR 5739: 2007, e determinação do módulo de deformação, ABNT NBR 8522: 2008 e determinação da massa específica seca, absorção de água por imersão e índice de vazios, conforme norma ABNT NBR 9778: 2009. Os valores obtidos para estes ensaios estão descritos na Tabela 2-16.

Tabela 2-16 – Resultados de ensaios de resistência à compressão, módulo de deformação, massa específica seca, absorção de água e índice de vazios.

Traço	Resistência à compressão F_{c28} (MPa)	Módulo de deformação (GPa)	Massa Específica Seca (kg/m^3)	Absorção de água (%)	Índice de Vazios (%)
Rico	21,9	17,6	1941	11,9	23,6
Normal	16,5	16,3	1888	12,1	23,9
Pobre	11,1	14,8	1858	13,3	24,7

(fonte Fonseca, 2006).

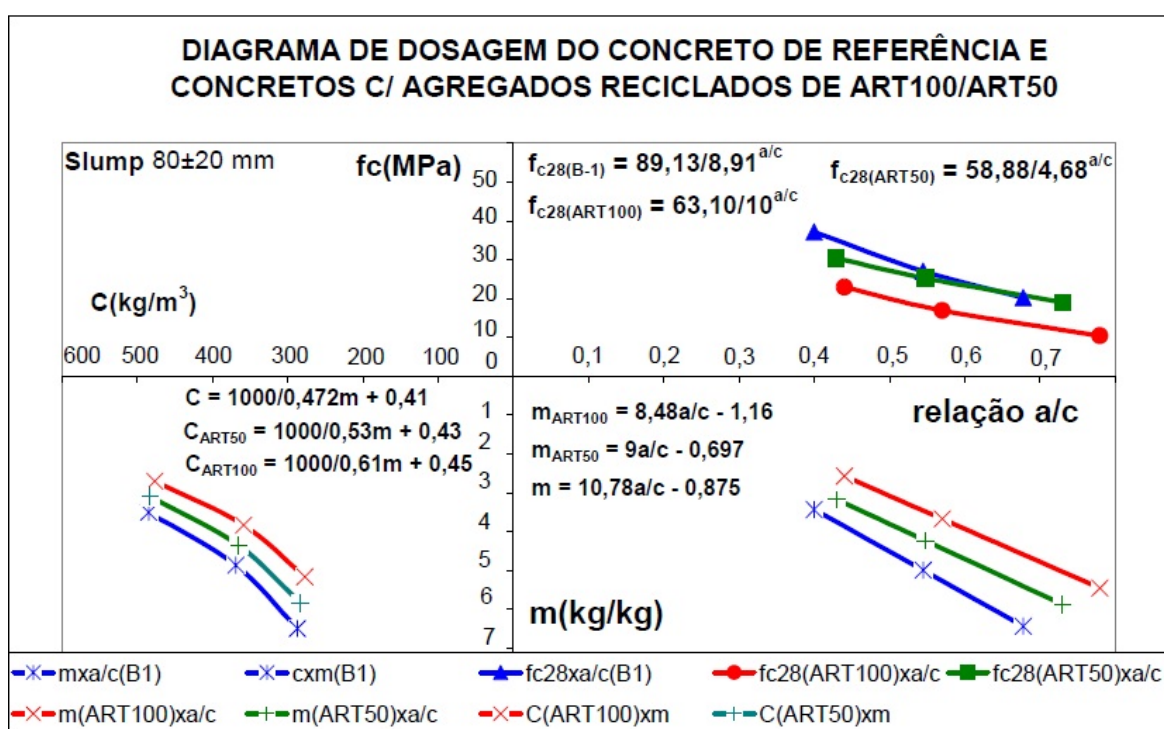


Figura 2.22: Diagrama de dosagem da propriedade de resistência à compressão do concreto de referência e dos concretos com ART, aos 28 dias. (Fonte Fonseca, 2006).

Todos os ensaios do traço do CCV de referência foram realizados por Fonseca (2006). Com os resultados das resistências à compressão, a autora construiu o diagrama de dosagem, de acordo com Helene e Terzian (1992). Na Figura 2.22 está apresentado o diagrama de dosagem dos concretos de referência e com ART.

Com base nos resultados obtidos, Fonseca (2006) fez um paralelismo entre os diagramas dos concretos de referência e com ART, e no tocante à resistência à compressão aos 28 dias, concluiu:

- As resistências dos concretos com substituição total do agregado graúdo natural pelo ART são sempre inferiores às dos concretos com agregado natural (B1);
- Com o aumento da relação água/cimento, a menor resistência do agregado reciclado e a menor resistência da pasta/agregado, deve ter contribuído para a queda sistemática da resistência em relação aos concretos de referência;
- Deve haver um percentual de substituição do agregado graúdo natural pelo agregado reciclado de telha, com o qual a resistência à compressão do concreto obtido seja aproximadamente a mesma do concreto com agregado natural.

No capítulo seguinte apresentam-se os materiais, suas características e os métodos de ensaios empregados no desenvolvimento e na avaliação do concreto auto-adensável com o agregado reciclado de telha cerâmica.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 INTRODUÇÃO

Este trabalho faz parte de uma linha de pesquisa de grande importância, que é a utilização de resíduo como busca por materiais alternativos, e de relevante interesse ao desenvolvimento sustentável na construção civil. Trata-se de continuação da pesquisa sobre a utilização do ART iniciada por Dias (2004). Posteriormente foram realizados por Fonseca (2006) estudos comparativos de concretos produzidos com o ART e com agregado graúdo natural, mediante a substituição total e parcial destes agregados na fração graúda. Portanto, parte da caracterização do ART e o estudo de dosagem do concreto utilizado como referência foi realizada.

Para o estudo do CAA com ART utilizou-se como ponto de partida concreto dosado por Fonseca (2006), onde se adotou como referência, o concreto produzido com 100% de ART em substituição do agregado graúdo natural.

Diante do objetivo deste trabalho que é de desenvolver um concreto auto-adensável utilizando agregado reciclado de telha disponível, optou-se pelo uso do cimento CP II – 32 E, e areia média lavada, que são os mesmos materiais já utilizados na pesquisa de Fonseca (2006) e cujo estudo atual é uma sequência.

3.2 MATERIAIS CONSTITUINTES

3.2.1 Cimento

Conforme comentado anteriormente, foi utilizado o cimento CP II – 32 E, por ser facilmente encontrado no mercado local e bastante consumido na região. No estudo de caracterização foram realizados os ensaios e obtidos os resultados indicados na Tabela 3-1.

Tabela 3-1 – Ensaios e resultados de caracterização do cimento

Ensaio	Norma	Resultados
Determinação da massa específica	ABNT NM 23:2001	3,05 g/cm ³
Determinação da finura na peneira 75µm	ABNT NBR 11579:1991	0,6 %
Determinação da consistência normal	ABNT NM 43:2002	0,304
Determinação do tempo de pega	ABNT NBRNM 65:2002	Início = 03h45min
		Fim = 04h20min
Determinação da expansibilidade a frio	ABNT NBR 11582:2002	0,8 mm
Determinação da superfície específica	ABNT NM 76:1996	331 m ² kg ⁻¹
Determinação da resistência à compressão	ABNT NBR 7215:1997	16,9 MPa aos 03 dias
		25,2 MPa aos 07 dias
		33,8 MPa aos 28 dias

3.2.2 Agregados

Os agregados utilizados foram: agregado miúdo natural lavado, na graduação média, areia comumente encontrada no mercado da cidade de Uberlândia e o agregado reciclado de telha cerâmica (ART), material disponível no laboratório de materiais da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia. O ART foi utilizado na fração graúda, e os finos passantes na peneira de abertura nominal de 0,15 mm (ART_{finos}) como adição de finos.

A areia lavada foi submetida aos ensaios de caracterização mediante a realização dos ensaios: de massa específica (ABNT NBR NM 52:2009); absorção de água (ABNT NBR NM 30:2000); massa unitária em estado solto (ABNT NM 45:2002); teor de materiais pulverulentos (ABNT NBR NM 46:2003); impurezas orgânicas (ABNT NBR NM 49:2001) e granulometria (ABNT NBR NM 248:2003). As amostras utilizadas para os

ensaios foram obtidas mediante a aplicação da metodologia das normas ABNT NBR NM 26 (2009) e NBR NM 27 (2001).

Os resultados médios de ensaios de caracterização da areia lavada são apresentados na Tabela 3-2.

Tabela 3-2 – Ensaio de caracterização da areia lavada.

Ensaio	Resultados
Massa específica	2,62 g/cm ³
Absorção	1,53 %
Massa unitária em estado solto	1,361 g/cm ³
Material Pulverulento	2,52 %
Impurezas orgânicas	□300 ppm

Na Tabela 3-3 estão representados os valores médios para o ensaio da composição granulométrica da areia lavada.

Tabela 3-3 – Composição granulométrica da areia lavada.

Abertura (mm)	Areia		
	Massa Retida (g)	% Retida	% Retida Acumulada
6,3	-	-	-
4,8	3,9	0,4	3
2,4	23,3	2,3	11
1,2	86,1	8,6	42
0,6	301,5	30,2	83
0,3	414,2	41,5	97
0,15	141,5	14,2	100
Fundo	28,3	2,8	-

Módulo de finura = 2,4

Dimensão Máxima = 2,4 mm

Na Figura 3.1 está representado o gráfico da curva granulométrica da areia lavada.

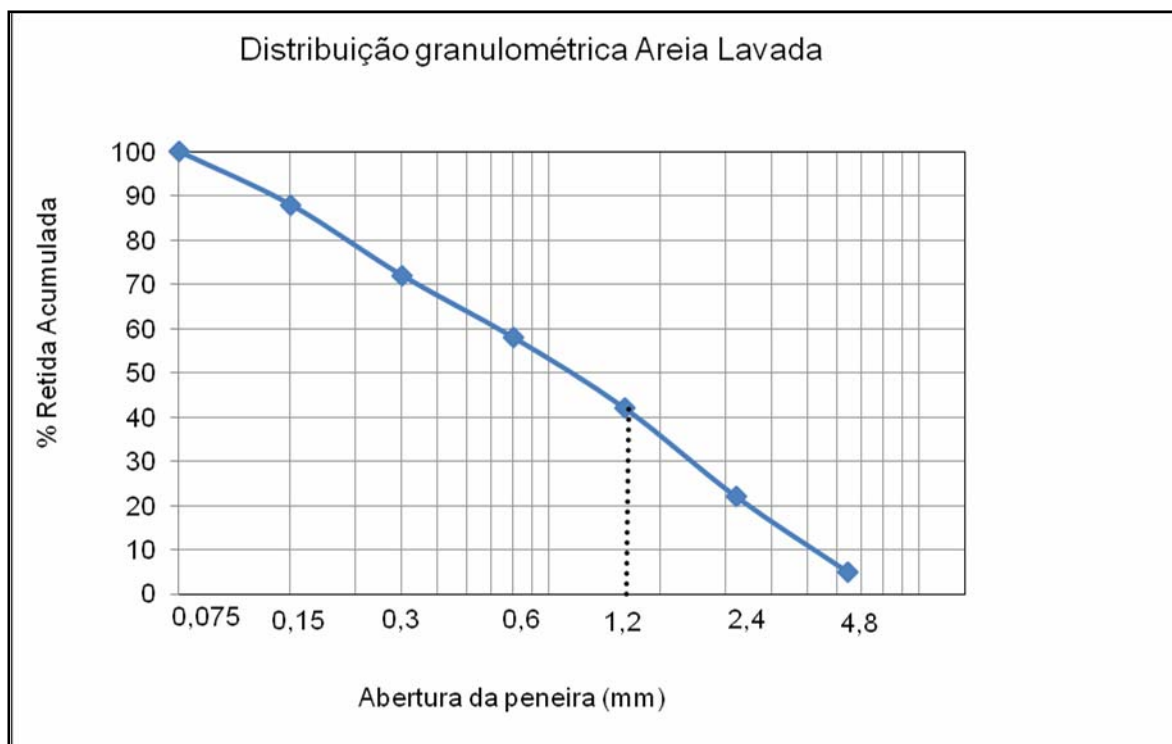


Figura 3.1 - Curva granulométrica da areia lavada.

O material fino (ART_{finos}) e o agregado graúdo (ART), utilizados no desenvolvimento deste trabalho foi obtido por Dias (2004b) que coletou 4.795 kg de cacos de telha em três indústrias da cidade de Monte Carmelo. Os cacos foram retirados, amontoados e depositados nas indústrias visitadas através de máquinas carregadeiras disponíveis nos locais. O material coletado foi transportado para a cidade de Uberlândia, onde foi feita a primeira partida na central de britagem da empresa CMC, no Distrito Industrial de Uberlândia, utilizando o seguinte equipamento: Rebritador Cônico - FAÇO MOD. 60S, com capacidade de produção de 8 a 26 m^3/h , possuindo fechamento mínimo: para grossos ($\frac{1}{2}''$ ou 12,5mm); para médios ($\frac{3}{8}''$ ou 10mm) e para finos ($\frac{1}{4}''$ ou 6,3mm) e, a qual tem abertura máxima na boca de entrada: para grossos ($4 \frac{1}{2}''$ ou 114,3mm); para médios ($3''$ ou 75mm) e para finos ($2''$ ou 54,8mm). A segunda partida foi britada na empresa CTR/Araguaia na cidade de Uberlândia. O britador primário de mandíbulas possui classificação nas peneiras de 19 mm e 9,5 mm (FONSECA, 2006).

Os resultados médios de ensaios de caracterização do ART_{finos} estão apresentados na Tabela 3-4.

Tabela 3-4 – Ensaio de caracterização do ART_{finos}.

Ensaio	Resultados
Massa específica	1,90 g/cm ³
Absorção	17,0 %
Massa unitária em estado solto	1,21 g/cm ³
Material Pulverulento	42,4 %
Impurezas orgânicas	□300 ppm

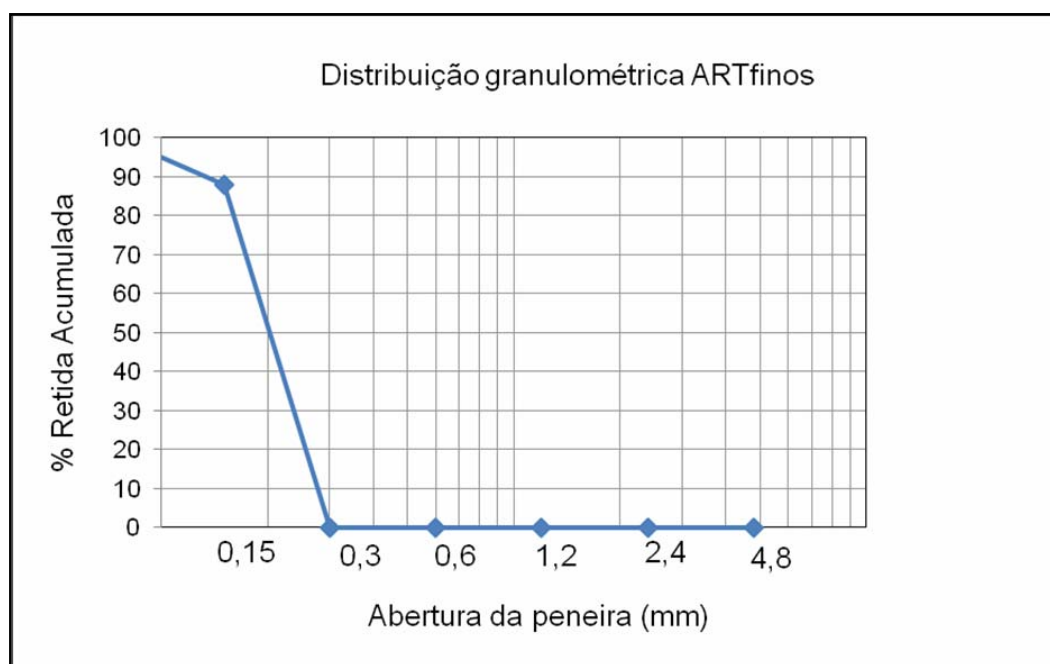
Na Tabela 3-5 estão representados os valores médios para o ensaio da composição granulométrica do ART_{finos}.

Tabela 3-5 – Composição granulométrica do ART_{finos}

Abertura (mm)	Areia		
	Massa Retida (g)	% Retida	% Retida Acumulada
6,3	0	0,0	0
4,8	0	0,0	0
2,4	0	0,0	0
1,2	0	0,0	0
0,6	0	0,0	0
0,3	10,1	1,0	1
0,15	35,85	3,5	5
Fundo	952,4	95,5	100

Módulo de finura = 0,06
Dimensão Máxima = 0,15 mm

A curva granulométrica do ART_{finos} está representada na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Curva granulométrica do ART_{finos}

As características físicas do agregado graúdo determinadas foram massa específica e absorção, conforme norma ABNT NBR NM 53:2009. A massa unitária em estado solto foi determinada conforme norma ABNT NM 45:2006. A massa unitária em estado compactado e seco foi determinada conforme norma ABNT NBR 7810:1983. A composição granulométrica seguiu recomendações da norma ABNT NBR NM 248:2003, o teor de materiais pulverulentos, conforme norma ABNT NBR NM 46:2003, a abrasão “Los Angeles”, norma ABNT NBR NM 51:2001, a resistência ao esmagamento ABNT NBR 9938/1987) e índice de forma, ABNT NBR 7809:1983.

O ART foi submetido aos ensaios de caracterização física e seus valores estão relacionados na Tabela 3-6.

Tabela 3-6 – Resultados de ensaios de caracterização do ART (Fonte: Fonseca, 2006).

Ensaio	Resultados
Massa específica	1820 kg/dm ³
Absorção	17,5 %
Massa unitária em estado solto	1470 kg/dm ³
Material Pulverulento	3,7 %
Abrasão “Los Angeles”	40,5 %
Índice de forma	2,57

A composição granulométrica média do ART na fração graúda, B1, esta representada na Tabela 3-7.

Tabela 3-7 – Composição granulométrica do ART

Abertura (mm)	% Retida	% Retida Acumulada
25,0	0,1	0
19,0	0,8	1
12,5	43,4	44
9,5	33,6	78
6,3	16,5	94
4,8	0,8	95
2,4	2,1	97
1,2	0,6	98
0,6	0,4	98
0,3	0,3	98
0,15	0,3	99
Fundo	1,6	100
Módulo de finura = 6,64		
Dimensão Máxima = 19,0 mm		

Na Figura 3.3 está representado o gráfico da curva granulométrica do ART na fração graúda.

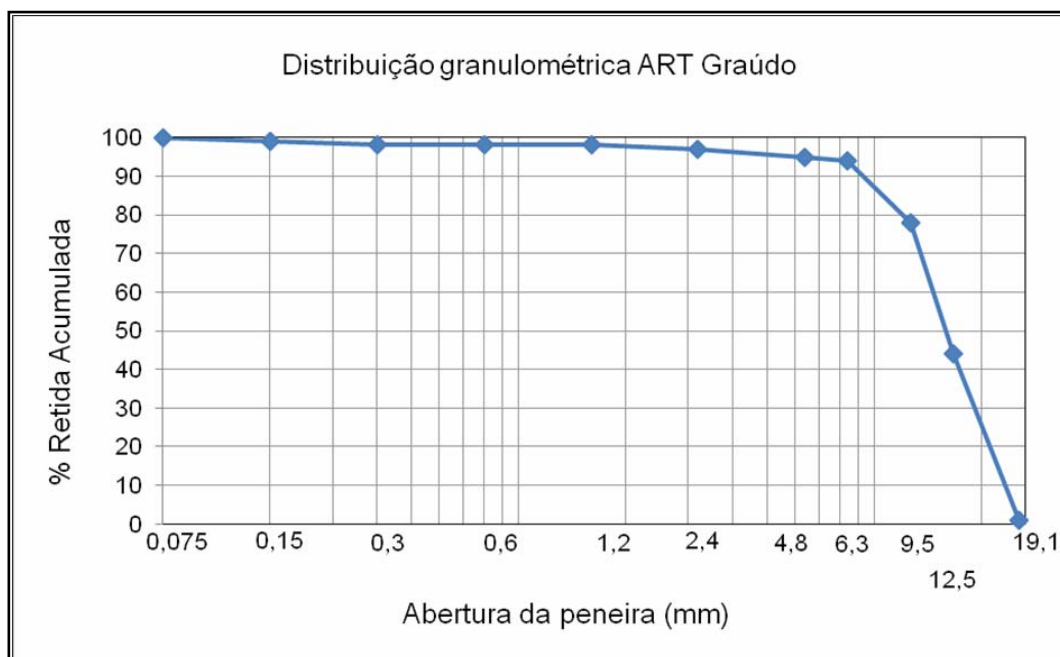


Figura 3.3 - Curva granulométrica do ART Graúdo

3.2.3 Aditivo

Para a produção do CAA com o ART, utilizou-se um aditivo superplastificante baseado em uma cadeia de éter policarboxílico modificado que atua como dispersante do material cimentício, propiciando superplastificação e redução de água, tornando o concreto com melhores características de trabalhabilidade sem alteração do tempo de pega. Na Tabela 3-8 estão apresentadas suas propriedades de acordo com informações fornecidas pelo fabricante.

Tabela 3-8– Características do aditivo superplastificante

Fabricante	Basf
Nome	Glenium 160 SCC
Função	Aditivo hiperplastificante
Base Química	Éter policarboxílico
Densidade (g/cm³)	1,087 a 1,127
Teor de sólido (%)	38,5 a 41,5
Aspecto	Líquido
Cor	Castanho claro
Viscosidade (cps)	□ 150
PH	5 a 7

3.3 MÉTODOS

3.3.1 Introdução

Os métodos escolhidos para o desenvolvimento desta pesquisa foram baseados na necessidade de se conhecer melhor o potencial para a utilização do ART na produção de CAA. Os procedimentos utilizados neste trabalho foram:

- Determinação da resistência à compressão e massa específica de amostras extraídas de telhas;
- Estudo da influência da dimensão máxima do ART na resistência à compressão do concreto;
- Estudo preliminar de um CAA com ART;
- Estudo do CAA com ART tendo como parâmetros a definição do percentual ótimo do superplastificante, da composição do esqueleto granular e do teor de finos.

3.3.2 Amostragem do ART

A obtenção da amostragem deste material se encontra descrita no capítulo 2. Conforme dito anteriormente, para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizado o agregado graúdo reciclado de telha cerâmica vermelha remanescente das pesquisas desenvolvidas por Dias (2004b) e Fonseca (2006), e este agregado se encontra disponível no Laboratório de Materiais de Construção Civil, da Faculdade de Engenharia Civil da UFU, conforme ilustrações na Figura 3.4.



Figura 3.4 – Agregado Reciclado de Telha armazenado no laboratório

Buscando ampliar o conhecimento quanto à potencialidade de emprego do ART na produção de concreto, especialmente com vistas à produção de um concreto auto-adensável, foram realizados estudos que serão relatados a seguir.

3.3.3 Caracterização do ART

Para a determinação das características do ART foram extraídos corpos-de-prova de telhas cerâmicas para a determinação da massa específica e da resistência à compressão, conforme ilustrado na Figura 3.5 (a), (b), (c) e (d). Após varias tentativas adotou-se a produção de corpos-de-prova extraídos com furadeira de bancada vertical, equipada com rebolo diamantado tipo serra-copo, com diâmetro nominal de 20 mm, resultando em corpos-de-prova com diâmetro de 15,52 mm em média. A altura dos corpos-de-prova ficou em função da espessura da telha atingindo o valor médio de 10 mm.

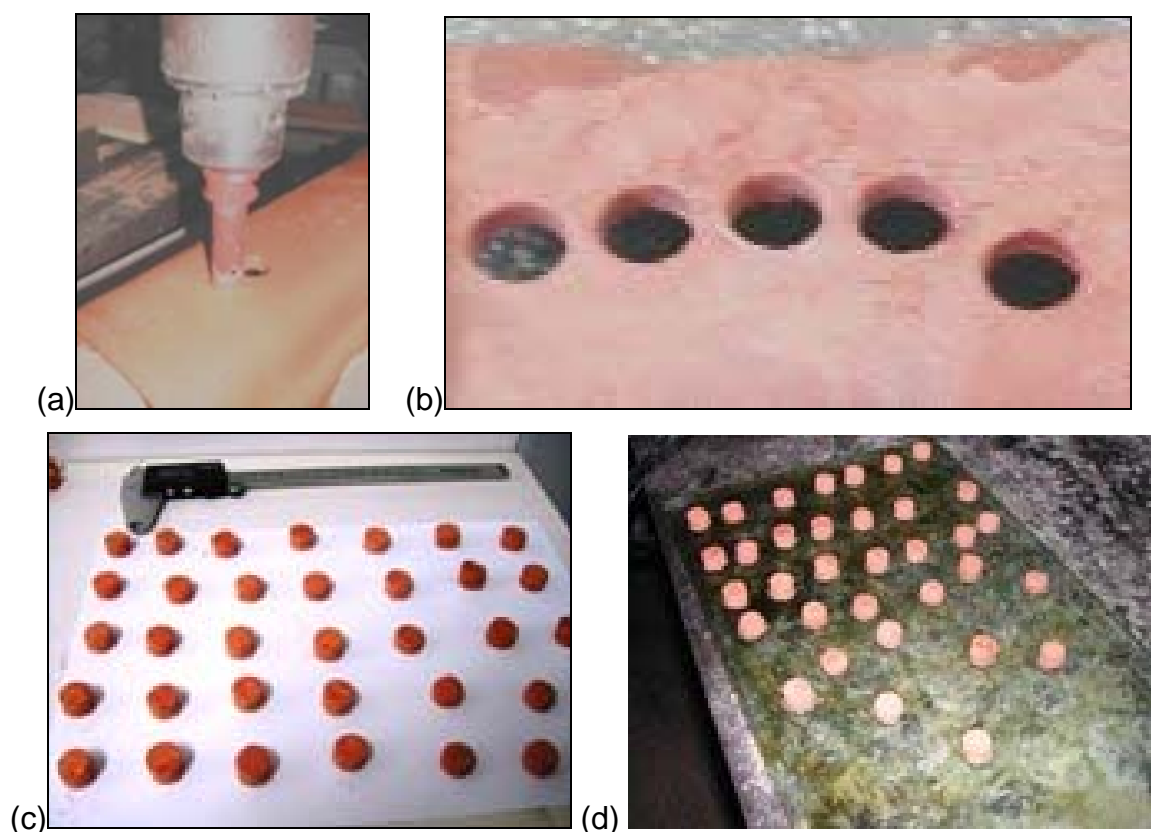


Figura 3.5 – (a) Extração de corpo-de-prova de caco de telha; (b) caco de telha após a extração de corpos-de-prova; (c) corpos-de-prova extraídos e (d) capeamento dos corpos-de-prova.

(fonte DIAS *et al*, 2008).

Dos corpos-de-prova extraídos dos cacos de telhas, trinta e cinco foram considerados aptos para serem utilizados nos ensaios. Os corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio de determinação da resistência à compressão para comparação com resistência de concretos produzidos com ART, em estudo realizado por Fonseca (2006).

3.3.4 Comportamento do concreto em função da dimensão máxima característica do ART

Sabia-se que, em um concreto com o agregado reciclado de telha, a resistência à compressão do agregado, bem como sua dimensão máxima seriam limitadores para a resistência do concreto.

Desta forma investigou-se o comportamento da resistência à compressão do concreto produzido com o agregado reciclado de telha em função da diminuição da dimensão máxima característica do agregado graúdo, a partir do agregado existente (bica corrida) preparou-se por peneiramento o ART enquadrado na graduação imediatamente inferior à brita 1, ou seja, na graduação da brita 0. Este agregado original foi peneirado, sendo a fração correspondente ao material retido nas peneiras com abertura de malha superiores a 12,5mm desprezadas e o material passante constituiu o agregado utilizado na produção do concreto em estudo. Na Figura 3.6 apresentam-se duas fotografias do agregado reciclado de telha na graduação da brita 0.



Figura 3.6 – ART após peneiramento, graduação brita 0 (fonte DIAS *et al*, 2008).

Para a realização deste estudo adotou-se como referência o traço Normal, da dosagem experimental realizada por Fonseca (2006); essa autora produziu concretos com 100% de agregado graúdo reciclado de telha, 100% de agregado miúdo natural e consumo de cimento para o traço Normal de 364,58 kg/m³, conforme traços indicados na Tabela 3-9.

Tabela 3-9 – Traços e resistência à compressão dos concretos (Fonte FONSECA, 2006)

Traço final massa	Substituição AGN/ART (%)	Relação a/c kg/kg	Teor de cimento (kg/m ³)	Resist. à compressão - f _c 28 (MPa)
Rico- 1:1,25:1,45	100	0,41	485,15	21,9
Normal- 1:1,95:1,88		0,545	364,58	16,5
Pobre- 1:2,75:2,42		0,78	279,44	11,1

Foram preparados dois traços de concreto, com os mesmos quantitativos do traço em massa com consumo normal de cimento, ou seja, 1:1,95:1,88 (cimento/agregado miúdo natural/ART), variando apenas a dimensão máxima do agregado graúdo.

Neste estudo o concreto apresentou resistência à compressão da ordem de 16,5 MPa, praticamente coincidindo com a resistência característica do agregado reciclado de telha, segundo Dias *et al.* (2008).

Moldaram-se corpos-de-prova cilíndricos de dimensões 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura para realização do ensaio de determinação da resistência à compressão aos 28 dias de idade; para os ensaios de ruptura utilizou-se a máquina de ensaios Emic modelo DL60000, com célula de carga de 600 kN, conforme ilustrado na Figura 3.7.



Figura 3.7– Máquina Universal de ensaios e corpos-de-prova cilíndricos utilizados para a determinação da resistência à compressão aos 28 dias de idade. (fonte DIAS *et al.*, 2008).

3.3.5 Comparação de concreto auto-adensável com ART e com agregado graúdo basáltico

Preliminarmente realizou-se um estudo de concreto auto-adensável com agregado reciclado de telha cerâmica, tendo como base o concreto de referência utilizado em pesquisa desenvolvida por Mendes (2009).

Adotou-se esse procedimento em virtude da inexistência de um método específico para a dosagem de CAA com agregado reciclado de telha e também para se ter uma referência de valores para comparação deste tipo de concreto variando-se apenas o agregado graúdo.

Tinha-se a necessidade de verificar a possibilidade de se produzir um concreto auto-adensável com esse agregado reciclado, ou seja, se no estado fresco o concreto teria as características desejáveis de fluidez e coesão sem segregação.

Esse estudo consistiu em adotar o traço do concreto auto-adensável utilizado por Mendes (2009) e, através da substituição volumétrica, preparar um concreto com o ART, procurando manter os parâmetros da dosagem, variando apenas o agregado graúdo. Os quantitativos para o concreto de referência estão relacionados na Tabela 3-10.

Tabela 3-10 – Traço e propriedades do concreto de referência.

Traço em Massa 1: 1,08 : 1,42 : 0,42		
Dados da Composição	Cimento CP II- F (kg)	488,00
	Adição – Sílica (kg)	31,00
	Cimento Equiv. (kg)	531,23
	Água (kg)	222,00
	Areia Natural (kg)	570,00
	Brita 9,5 mm (kg)	756,00
	Relação a/c	0,42
	Superplastificantes (carboxilatos) (kg)	5,31
	Superplastificantes (melanina) (kg)	1,86
	Antidispersante (kg)	2,12
	Módulo de Finura	4,24
Propriedades do Concreto Fresco	Flow (mm)	470,00
	Ar Incorporado (%)	10,00
	Massa Específica (kg/m ³)	2082,00
	Temperatura (°C)	25,0

Para preparar o concreto com ART utilizou-se o mesmo procedimento adotado por Fonseca (2006), que consistiu em misturar previamente o ART com a quantidade de água necessária a suprir 80% da absorção e deixado em repouso por aproximadamente 10

minutos para que houvesse a saturação do material, evitando com isso que a água de amassamento fosse absorvida pelo agregado prejudicando o desempenho dos aditivos superplastificantes.

Os concretos de referência e o do estudo foram preparados em sequência e determinadas algumas de suas propriedades no estado fresco, como a realização dos ensaios de espalhamento e da massa específica aparente no estado fresco.

Foram moldados ainda, 20 corpos-de-prova cilíndricos, 10 para cada traço, para a realização de ensaios de determinação da massa específica no estado endurecido, resistência à compressão e módulo de elasticidade aos 07 e 28 dias de idade.

3.3.6 Produção preliminar do concreto auto-adensável com o agregado reciclado de telha

Para a produção de um concreto auto-adensável com a utilização do agregado reciclado de telha, procurou-se inicialmente adotar conceitos de diferentes métodos de dosagens para CAA, dentre eles o método de dosagem proposto por Gomes (2002) e Tutikian (2004), ambos descritos no Capítulo 2. Verificou-se também a possibilidade de adotar alguns conceitos presentes no método de dosagem proposto por Tutikian (2007).

O método proposto por Gomes (2002) é voltado para a dosagem de CAA de alta resistência, situação em que não se enquadraria a proposta deste trabalho, tendo em vista a limitação da resistência à compressão do ART. Apesar disso, este método pode trazer importantes contribuições como, por exemplo, pela consideração do concreto como sendo bifásico, com uma fase composta pela pasta e a outra pelo esqueleto granular, otimizados separadamente e pela utilização do aditivo em seu ponto de saturação. Sendo o aditivo superplastificante o componente mais caro, quando comparado aos demais materiais utilizados, deve-se extrair ao máximo seus benefícios, sendo estes provavelmente no ponto de saturação, ou seja, no ponto a partir do qual o aditivo não altera mais a fluidez da pasta.

O método proposto por Tutikian (2004) é um método para dosagem de CAA para ser utilizado em diversas regiões do Brasil, empregando quaisquer materiais locais disponíveis. Sua base de estudo é o método de dosagem IPT/EPUSP (HELENE e

TERZIAN, 1992), para concretos convencionais. Sua proposta é a obtenção de um CAA a partir de CCV, mediante o acréscimo de finos e a utilização de aditivo superplastificante.

Alguns conceitos do método proposto por Tutikian (2007) foram investigados neste trabalho. Buscou-se obter uma otimização do esqueleto granular, mediante a determinação do menor índice de vazios das misturas agregado graúdo e agregado miúdo, e o resultante desta mistura com o material fino, procurando obter o melhor empacotamento entre estes materiais. Tal procedimento visa obter uma mistura para um CAA que possivelmente não segregaria e nem teria excesso de finos.

A proposta final adotada para a produção do CAA com o ART foi através do método de dosagem proposto por Tutikian (2004).

Estudos realizados por Fonseca (2006) proporcionaram a obtenção de CCV com ART, na fração graúda, obtidos através do método IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992). A partir deste estudo foi adotado o concreto que apresentou resistência à compressão compatível com a resistência à compressão do ART, sendo neste acrescentado o material fino, do próprio ART, e o aditivo superplastificante.

3.3.7 Obtenção do ponto de saturação do aditivo superplastificante

Os aparatos utilizados nos ensaios para a obtenção do ponto de saturação do aditivo foram: o cone de Marsh, um Becker graduado de 1000 ml, uma proveta graduada de 500 ml, um cronômetro e os recipientes para acomodar os componentes da mistura antes do ensaio e argamassadeira, ilustrados na Figura 3.8.

O Cone de Marsh consiste de um cone oco de metal invertido, aberto no topo e tem uma abertura no fundo, onde é fixado um bocal removível de 8 mm de diâmetro (d), adequado para pasta, ou o de 12 mm adequado para argamassa. No interior do cone é colocado um volume de material (V) e em seguida é medido o tempo gasto para um volume (v) fluir através do orifício inferior do mesmo, conforme ilustrado na Figura 3.9.



Figura 3.8 – Aparatos para a realização do ensaio de fluidez da pasta.

Para a determinação da fluidez da pasta com aditivo foram realizados ensaios utilizando a relação água/cimento de 0,545 obtida na dosagem do concreto de referência, por Fonseca (2006).

O ensaio para a determinação do ponto de saturação do aditivo superplastificante foi realizado variando a massa de aditivo em 0,2% em relação à massa de cimento. Especificações do fabricante indicam o emprego do aditivo num percentual entre 0,2 e 1,2 em massa do aditivo em relação à massa de cimento, podendo porém, variar em razão da relação água/cimento maior ou menor, devendo em casos específicos, realizar ensaios em laboratório.



Figura 3.9 – Medida da fluidez da pasta.

3.3.8 Composição do esqueleto granular

Num primeiro estudo na tentativa de se obter a melhor proporção entre os agregados para a determinação da composição do esqueleto granular neste trabalho, as relações areia lavada/ART e areia lavada/ART/ART_{finos} foram determinadas, em pares, seguindo critérios de decrescência da dimensão máxima dos agregados, conforme sugerido por Tutikian (2007). Este procedimento baseia-se na obtenção da densidade em seco e sem compactação, no sentido de ser obtida uma mínima quantidade de vazios entre os materiais. O ensaio consiste em preencher um recipiente com 15 litros de uma mistura seca com certa relação areia lavada/ART. A partir dos dados dos dois materiais, densidades e massa de cada componente, obtêm-se a massa unitária e o volume de vazios de cada mistura. O ensaio é realizado para varias relações entre os componentes, até se chegar na conclusão de qual relação entre eles apresenta maior densidade ou menor volume de vazios.

Primeiramente realizou-se o estudo da composição do esqueleto granular da mistura seca do agregado graúdo (ART) e do agregado miúdo (areia lavada).

Determinada a composição que apresentava o menor índice de vazios da mistura agregado graúdo (ART) e agregado miúdo (areia lavada), procedeu-se a determinação do esqueleto granular desta, com a adição dos ART_{finos} (D_{max} 0,15 mm). Este procedimento é de acordo com especificação de Tutikian (2007), para a determinação do teor de finos na composição do esqueleto granular.

3.3.9 Produção do Concreto auto-adensável com agregado reciclado de telha

Para produzir o CAA com o ART adotou-se método de dosagem para CAA desenvolvido por Tutikian (2004). O procedimento é simples, experimental e permite a utilização de quaisquer materiais locais. Acrescentou-se ao método a proposta de estudo do ponto de saturação do aditivo superplastificante, proposto por Gomes (2002), como forma de fixar a quantidade máxima de aditivo empregada no traço, diferentemente da proposta de Tutikian (2004) onde este valor era obtido de forma empírica, conforme mencionado no Capítulo 2.

A opção pela escolha deste método é em razão de que estudos foram realizados por Fonseca (2006) utilizando o ART na fração graúda, onde foi traçado o digrama de dosagem segundo o método de dosagem IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992), conforme descrito no capítulo 2, sendo então as famílias dos concretos já definidas, possibilitando a sequência do trabalho com a incorporação do aditivo superplastificante e do material fino.

Tomando então como base o estudo realizado, adotou-se como ponto de partida para a produção do CAA com o ART, o concreto cujo traço é 1:1,95:1,88:0,545 (cimento:agregado miúdo:agregado graúdo:relação água/cimento), ou seja, o concreto com consumo normal de cimento, o qual a resistência à compressão aos 28 dias de idade (16,5 MPa) é a que mais se aproxima à do ART (16,8 MPa).

Partindo do princípio que o método de dosagem proposto por Tutikian (2004) consiste em acrescentar ao concreto convencional, obtido pelo método anteriormente citado, dois novos elementos, o aditivo superplastificante e material fino, procedeu então o estudo para a produção do CAA.

Os ensaios escolhidos para a verificação das propriedades do concreto no estado fresco foram o teste do espalhamento, para verificar a fluidez e a capacidade de preenchimento, o teste da Caixa L, para verificar a capacidade de o concreto passar por obstáculos, e o teste do Tubo U, para verificar a estabilidade à segregação deste concreto.

No teste da Caixa L utilizou-se como obstáculo 3 barras de aço para concreto armado com diâmetro nominal de 12,5 mm.

O teste do espalhamento foi utilizado com parâmetro para a determinação do teor de material fino a ser acrescentado ao concreto de referência. Foi determinado por tentativas até que se obtivesse um concreto que atendesse às especificações de tempo de espalhamento T_{50} , entre 2 a 7 segundos, e diâmetro final D_f , no intervalo de 60 a 80 cm, conforme mencionado anteriormente.

Durante os procedimentos foram realizados testes para a verificação do espalhamento em cada acréscimo de materiais, tomando-se o cuidado para que executasse de maneira rápida de modo a não comprometer o desempenho do aditivo superplastificante.

Atingido os parâmetros para o teste do espalhamento e diâmetro final, fixou-se então o traço para o CAA com o ART, mediante o emprego do aditivo superplastificante e a adição do ART_{fnos}.

A partir deste momento procedeu-se a realização de ensaios de verificação das propriedades no estado fresco como massa específica, teor de ar incorporado, teste da Caixa L e o teste do Tubo U.

Em seguida foram moldados corpos-de-prova cilíndricos, diâmetro nominal 10 cm e altura 20 cm, para a realização dos ensaios de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica, da resistência à compressão e módulo estático de elasticidade à compressão, nas idades e 03, 07 e 14 dias, e determinação da massa específica aparente no estado endurecido, absorção de água por imersão e índice de vazios.

No capítulo seguinte serão apresentados os resultados dos estudos preliminares e dos ensaios realizados no CAA com o ART e suas análises.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 RESULTADOS DOS ESTUDOS PRELIMINARES

4.1.1 Caracterização do ART

Os resultados dos ensaios de determinação da resistência à compressão dos corpos-de-prova extraídos de telhas cerâmicas estão indicados na Tabela 4-1. Foi também determinada a massa específica aparente média, do material dos corpos-de-prova extraídos dos cacos de telhas, de acordo com a ABNT NBR 9937: 1987, resultando no valor de 1795 kg/m³.

Tabela 4 -1 – Resistência à compressão do material constituinte do ART

CP (n°)	Rc (MPa)	CP (n°)	Rc (MPa)	CP (n°)	Rc (MPa)	CP (n°)	Rc (MPa)	CP (n°)	Rc (MPa)
1	21,3	8	28,9	15	21,4	22	40,2	29	23,6
2	35,8	9	36,1	16	20,0	23	30,4	30	26,9
3	25,6	10	27,8	17	28,6	24	32,5	31	25,3
4	27,0	11	19,0	18	27,0	25	27,4	32	29,5
5	23,3	12	28,1	19	23,4	26	44,8	33	12,7
6	19,5	13	28,1	20	23,8	27	30,4	34	30,9
7	22,4	14	25,7	21	27,3	28	32,2	35	16,7
Mín.	12,7	Máx.	44,8	Média	27,0	Mediana	27,0	Desvio padrão	6,4

(fonte DIAS *et al*, 2008).

Com os dados obtidos construiu-se a curva de distribuição normal com o valor característico da resistência apresentados na Figura 4.1 e o histograma das resistências indicado na Figura 4.2.

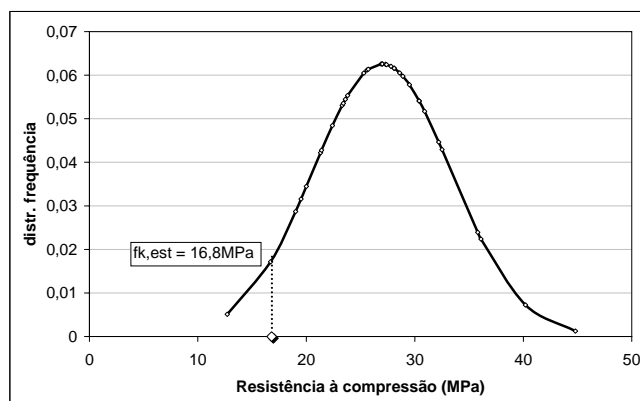


Figura 4.1 – Curva de distribuição normal dos valores de resistência à compressão dos corpos-de-prova extraídos dos cacos de telhas.
(fonte DIAS *et al*, 2008).

Utilizando o estimador estatístico da norma ABNT NBR 15270-2:2005, aplicável para a determinação da resistência característica de blocos cerâmicos estruturais, aos resultados obtidos nos ensaios dos corpos-de-prova extraídos dos cacos cerâmicos, obteve-se o valor característico de resistência igual a 16,8 MPa. Verifica-se na Figura 3.7 que da amostra ensaiada somente dois resultados ficaram abaixo do valor da resistência característica do agregado reciclado de telha

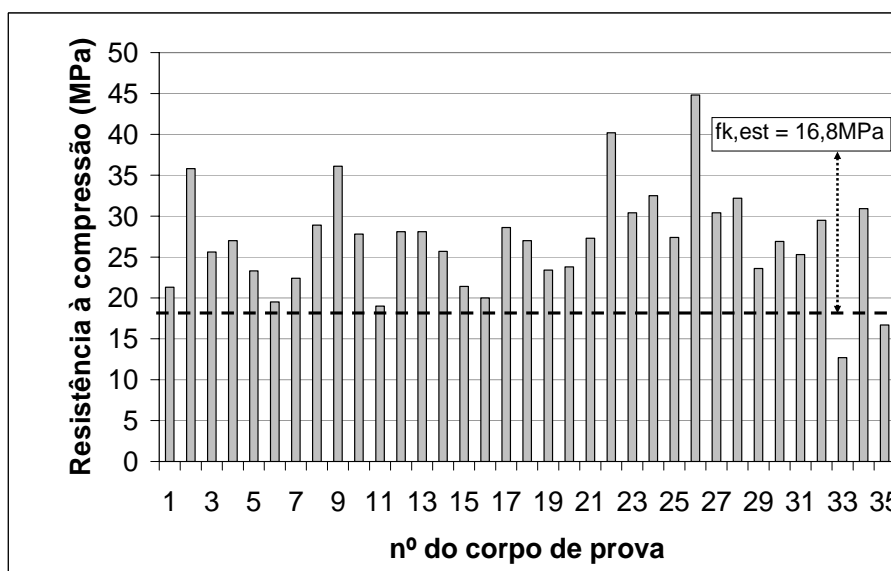


Figura 4.2 - Histograma dos valores de resistência à compressão dos corpos-de-prova extraídos dos cacos de telhas.
(fonte DIAS *et al*, 2008).

Dessa forma, o valor representativo da resistência do material que constitui as telhas ficou determinado em 16,8 MPa.

4.1.2 Comportamento do concreto em função da dimensão máxima característica do ART

Foram ensaiados quatro corpos-de-prova para cada traço, sendo: concreto com o ART na graduação de B1 e concreto com o ART na graduação de B0. Na Tabela 4-2 estão apresentados resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias dos concretos com o ART na graduação da B1 e da B0.

Tabela 4-2 – Resistência à compressão aos 28 dias

Especificação do traço em massa	CP	Resistência à compressão - f_{c28} (MPa)	Valor Médio (MPa)
Normal- 1:1, 95:1, 88 A/c 0,545 Grad. Brita 1	01	13,1	13,6
	02	14,4	
	03	12,8	
	04	13,9	
Normal- 1:1, 95:1, 88 A/c 0,545 Grad. Brita 0	05	16,3	16,5
	06	16,0	
	07	15,2	
	08	18,3	

Conforme esperado houve um ganho de resistência com a substituição do agregado reciclado de telha na graduação da B1 pelo agregado na graduação da B0. Analisando a forma de ruptura dos corpos-de-prova, percebe-se que no concreto na graduação da B1 a ruptura ocorreu tanto na zona de transição entre a pasta e o agregado, quanto no agregado, conforme pode ser verificado pela Figura 4.3.

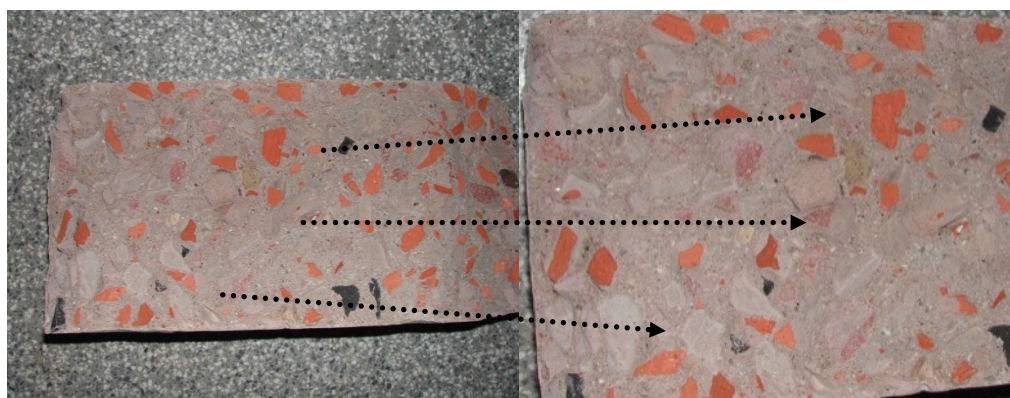


Figura 4.3 – Ilustração de ruptura do agregado na graduação da B1 (seção longitudinal) (fonte DIAS *et al*, 2008).

Nos corpos-de-prova do concreto com o ART na graduação da B0, observa-se que a ruptura ocorre também nos agregados, Figura 4.4, e mesmo assim, o valor da resistência à compressão desse concreto foi mais alto do que do concreto com agregado na graduação da B1.

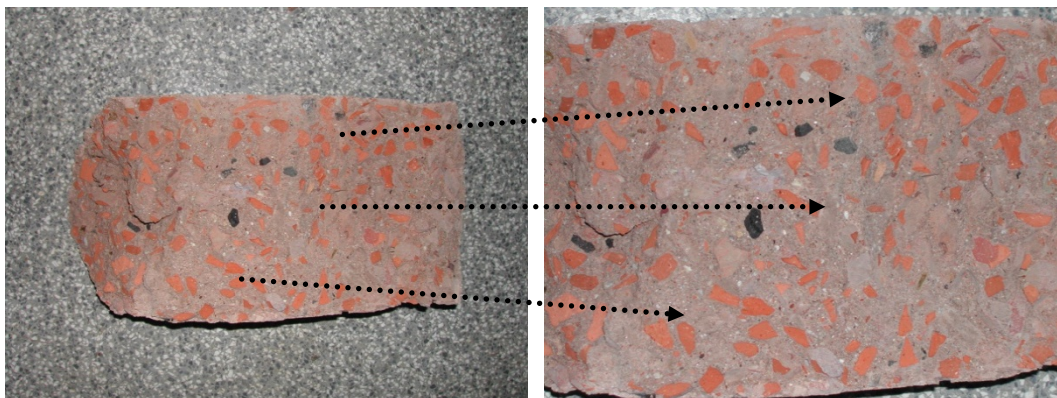


Figura 4.4 – Ilustração de ruptura do agregado na graduação da B0 (seção longitudinal)
(fonte DIAS *et al*, 2008).

4.1.3 Comparação de concreto auto-adensável com ART e com agregado graúdo basáltico

Nesta pesquisa, o concreto de referência, com agregado graúdo natural, apresentou maior espalhamento em relação ao concreto em estudo, com agregado graúdo reciclado de telha, conforme pode ser observado na Figura 4.5 e Figura 4.6.



Figura 4.5 - Espalhamento do concreto de referência



Figura 4.6 - Espalhamento do concreto de estudo

(fonte SILVA *et al*, 2010)

Na Tabela 4-3 são apresentados os valores da massa específica, espalhamento e as observações pertinentes, referentes aos dois concretos em estudo.

Tabela 4-3– Características dos concretos no estado fresco

Concreto	Massa Específica no estado fresco (kg/m ³)	Espalhamento		Condição Observada
		Diâmetro Final DF (mm)	Tempo de Escoamento T50 (seg.)	
REF. (Basalto)	2247	550	5	Concreto fluiu com facilidade apresentando coesão entre as partículas, não sendo identificados pontos de segregação.
Estudo (ART)	2160	230	-	Concreto fluiu com dificuldade, apresentando grande coesão entre as partículas não sendo identificados pontos de segregação.

(fonte SILVA *et al*, 2010).

Na Tabela 4-4 estão apresentados os resultados obtidos dos ensaios do concreto no estado endurecido.

Tabela 4-4 – Resultados dos ensaios dos concretos no estado endurecido

Concreto	Idade (dias)	CP	Massa Específica (kg/m ³)	Tensão de Ruptura (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Referência (Cref)	07	01	2,353	33,4	-
		02	2,496	32,9	-
		03	2,450	34,9	31,4
		04	2,367	34,5	32,5
		05	2,383	33,5	30,4
	Média		2,410	33,8	31,4
	28	06	2,386	45,7	-
		07	2,334	45,8	-
		08	2,375	47,5	36,7
		09	2,350	42,6	38,8
		10	2,329	46,3	35,9
Média		2,355	45,6	37,2	
Estudo (C _{ART})	07	01	2,126	20,2	-
		02	2,117	21,4	-
		03	2,134	20,6	20,1
		04	2,143	20,4	20,6
		05	2,131	21,8	20,9
	Média		2,130	20,9	20,5
	28	06	2,157	22,6	-
		07	2,154	24,2	-
		08	2,118	25,4	22,7
		09	2,156	25,1	22,5
		10	2,145	23,6	23,3
Média		2,146	24,2	22,8	

(fonte SILVA *et al*, 2010).

Analisando o comportamento dos concretos no estado fresco, com ART em relação ao concreto com agregado natural, atribuiu-se a falta de fluidez (comparativa) do concreto

com ART à forma das partículas deste agregado, que é lamelar e à sua baixa massa específica, quando comparada com a da brita natural (SILVA *et al.*, 2010).

Observando os resultados da massa específica dos concretos no estado endurecido, nota-se que, na média, a massa específica do concreto com o agregado reciclado (C_{ART}) foi 13,1% mais baixa do que a do concreto de referência (C_{REF}) aos 07 dias de idade. Na idade de 28 dias essa diferença foi de 9,7%. Com relação à resistência à compressão, o C_{ART} apresentou valor médio 38,0% mais baixo do que o C_{REF} aos 07 dias de idade e 46,9% menor aos 28 dias de idade. O valor médio do módulo de elasticidade aos 07 dias foi 65,3% mais baixo e 61,3% mais baixo aos 28 dias.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão média entre os concretos apresentaram variações menores aos 07 dias. Na idade de 28 dias a variação foi maior mostrando um maior ganho de resistência do concreto de referência em relação ao concreto de estudo. Embora o concreto de estudo (C_{ART}) tenha apresentado valores de resistência à compressão bem abaixo do concreto de referência e mesmo um ganho menor nesta resistência de 07 para 28 dias de idade, os valores obtidos representam ainda um ganho de 15,0% na resistência em relação ao estudo anterior realizado por Dias *et al.* (2008), quando a resistência obtida aos 28 dias foi de 21,0 MPa.

Verificou-se com esta pesquisa que a perda de resistência à compressão do CAA com ART em relação ao concreto de referência, embora seja significativa, não inviabiliza o seu emprego. A queda no valor do módulo de elasticidade, já esperada, também não pode ser considerada como um fato negativo, podendo até se constituir em vantagem, na medida em que pode ser mais suscetível a pequenas acomodações que naturalmente podem surgir em, por exemplo, painéis de paredes, mas isso deve ser investigado. Dessa forma, considerou-se que o CAA com ART tem potencial para emprego em situações específicas e os estudos devem ter sequencia para melhor conhecer o desempenho desse material nessa aplicação (SILVA *et al.*, 2010).

4.1.4 Obtenção do ponto de saturação do aditivo superplastificante

Os resultados obtidos no ensaio de determinação da fluidez da pasta estão relacionados na Tabela 4-5. Utilizou-se uma massa de cimento de 2000,0 g para uma massa de água de 1090,0 g.

Tabela 4-5– Resultados dos ensaios de fluidez.

Aditivo superplastificante (%)	Tempo de escoamento (s)
0,0	Não escoou
0,2	25,1
0,4	20,6
0,6	11,6
0,8	9,0
1,0	9,1
1,2	10,0
1,4	9,3
1,6	9,5

Com base nos resultados obtidos neste ensaio, determinou-se que o percentual de aditivo em relação à massa de cimento que apresentou o menor tempo para fluir a pasta, foi de 0,8, conforme pode ser observado na Figura 4.7. A partir deste ponto, os acréscimos no percentual do aditivo, embora apresentassem variações nas medidas da fluidez das pastas, não indicaram melhora no desempenho do aditivo, ou seja, não houve maiores contribuições para o aumento da fluidez.

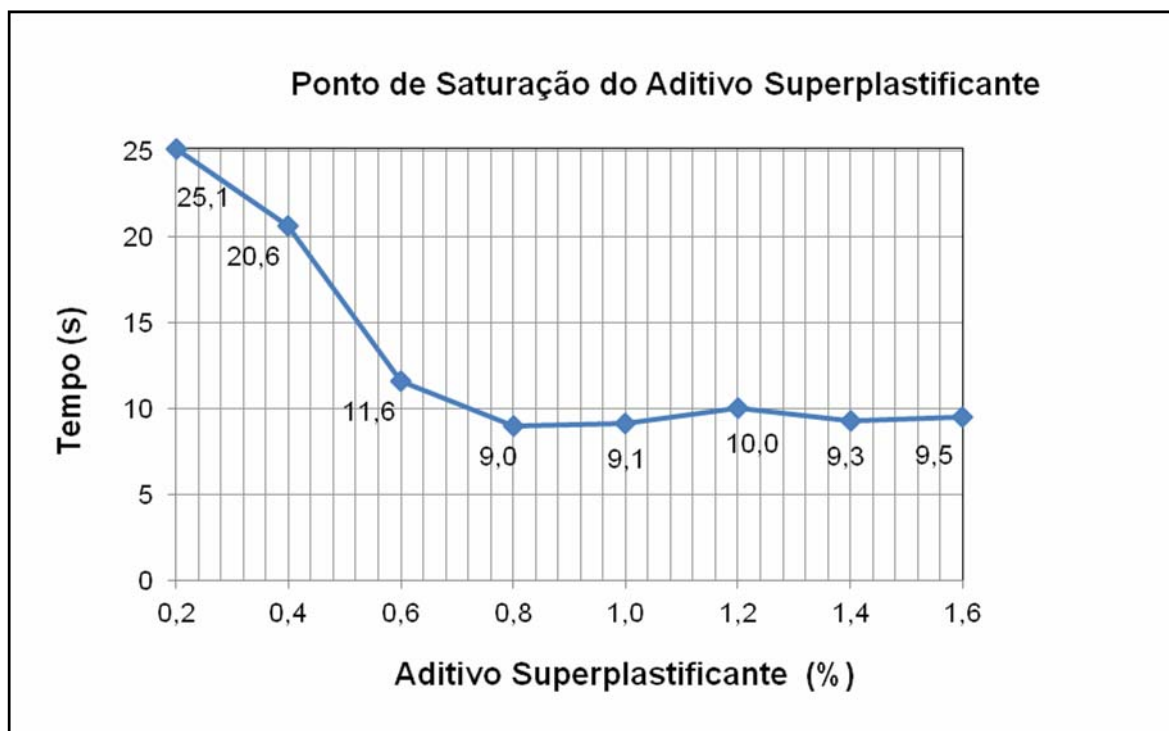


Figura 4.7 – Gráfico da determinação do ponto de saturação do aditivo superplastificante.

4.1.5 Composição do esqueleto granular

Os valores obtidos no ensaio de determinação da massa unitária, e os valores calculados para massa específica da mistura e índice de vazios, estão representados na Tabela 4-6.

Tabela 4-6 - Determinação da massa unitária em estado solto, massa específica e índice de vazios da mistura ART/areia lavada.

Areia lavada (%)	Art (%)	Massa da mistura (kg)	Volume do recipiente (dm ³)	Massa unitária (kg/m ³)	Massa Específica da mistura (kg/m ³)	Índice de Vazios (%)
100	0	22,80	14,8	1541	2640	41,6
90	10	23,15	14,8	1564	2558	38,9
80	20	23,50	14,8	1588	2476	35,9
70	30	23,65	14,8	1598	2394	33,3
60	40	23,40	14,8	1581	2312	31,6
50	50	23,05	14,8	1557	2230	30,2
40	60	22,27	14,8	1505	2148	29,9
30	70	20,80	14,8	1405	2066	32,0
20	80	18,00	14,8	1216	1984	38,7
10	90	16,15	14,8	1091	1902	42,6
0	100	14,65	14,8	990	1820	45,6

Considerando os resultados obtidos no ensaio da composição do esqueleto granular da mistura areia lavada/ART, observa-se que o percentual de mistura que apresenta o menor índice de vazios é com a relação de 40% de areia lavada e 60% de ART. Esta mistura apresentou um índice de vazios na ordem de 29,9%, o menor de todas as combinações. A maior massa unitária foi conseguida com a relação 70% de areia lavada e 30% de ART. A tendência dos resultados podem ser verificadas na Figura 4.8 e na Figura 4.9.

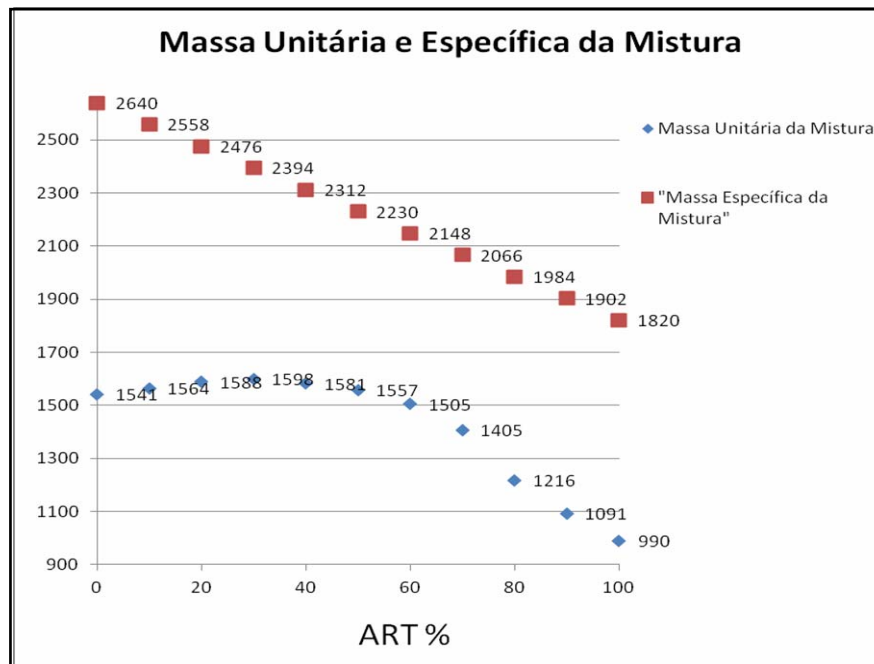


Figura 4.8: Massa unitária e massa específica da mistura areia lavada e ART.

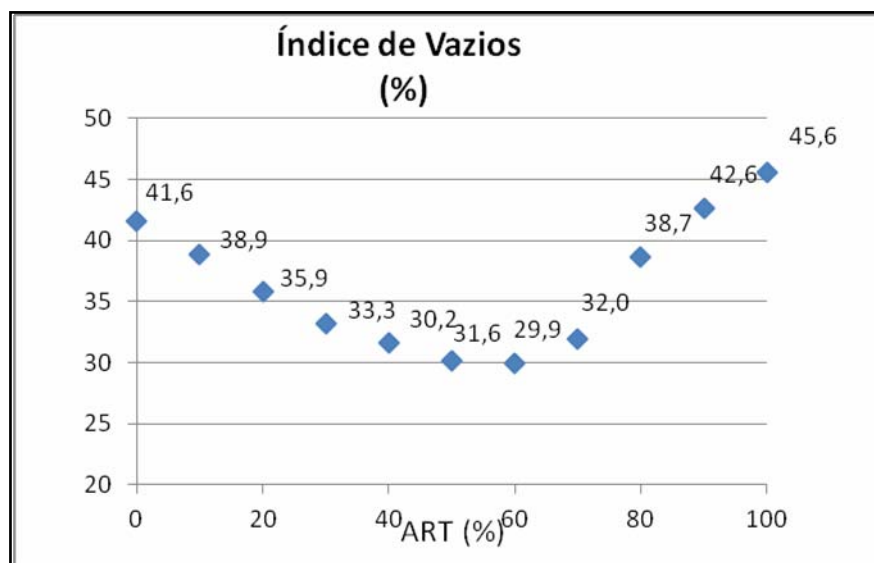


Figura 4.9: Índice de vazios da mistura areia lavada e ART.

Os valores obtidos no ensaio de determinação da massa unitária das composições, e os valores calculados para massa específica e índice de vazios, da mistura ART/areia lavada/ART_{finos} estão representados na Tabela 4-7.

Tabela 4-7 - Determinação da massa unitária em estado solto, massa específica e índice de vazios da mistura ART/areia lavada/ART_{finos}.

Mistura ART/areia	ART _{finos}	Massa da mistura	Volume do recipiente	Massa unitária	Massa Específica da mistura	Índice de Vazios
(%)	(%)	(kg)	(dm ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(%)
100	0	22,45	14,8	1517	2148	29,4
91	9	22,05	14,8	1490	2125	29,9
82	18	21,65	14,8	1463	2103	30,5
77	23	21,45	14,8	1449	2091	30,7
71	29	20,95	14,8	1416	2077	31,9
67	33	20,70	14,8	1399	2065	32,3
62	38	20,55	14,8	1389	2053	32,4
58	42	20,15	14,8	1361	2045	33,4
56	44	20,10	14,8	1358	2038	33,8
53	47	19,75	14,8	1334	2031	34,3
50	50	19,45	14,8	1314	2024	35,1

adequados para a composição do esqueleto granular na mistura ART/areia lavada/ART_{finos}. Houve um decréscimo nos valores das massas unitárias e das massas específicas das misturas, conforme pode ser observado na Figura 4.10, e um acréscimo nos índices de vazios, Figura 4.11.

Embora a queda na massa unitária e na massa específica se justifique, pois a densidade do ART_{finos} é mais baixa, o aumento no índice de vazios demonstrou a incompatibilidade entre os materiais na mistura.

Segundo Tutikian (2007), quando procede a uma mistura de dois tipos de partículas, pode ocorrer uma mistura sem interação, com total interação ou com interação parcial entre os componentes. No caso do ensaio realizado pode se considerar que não houve interação entre os componentes, ou seja, ocorreu que a dimensão máxima de um dos componentes é muitas vezes superior à de outro, prejudicando assim o empacotamento da mistura. Neste caso, o autor afirma que os materiais escolhidos podem não ser adequados para a produção

do CAA. Deve se então substituir componentes ou apenas acrescentar outros para suprir as lacunas.

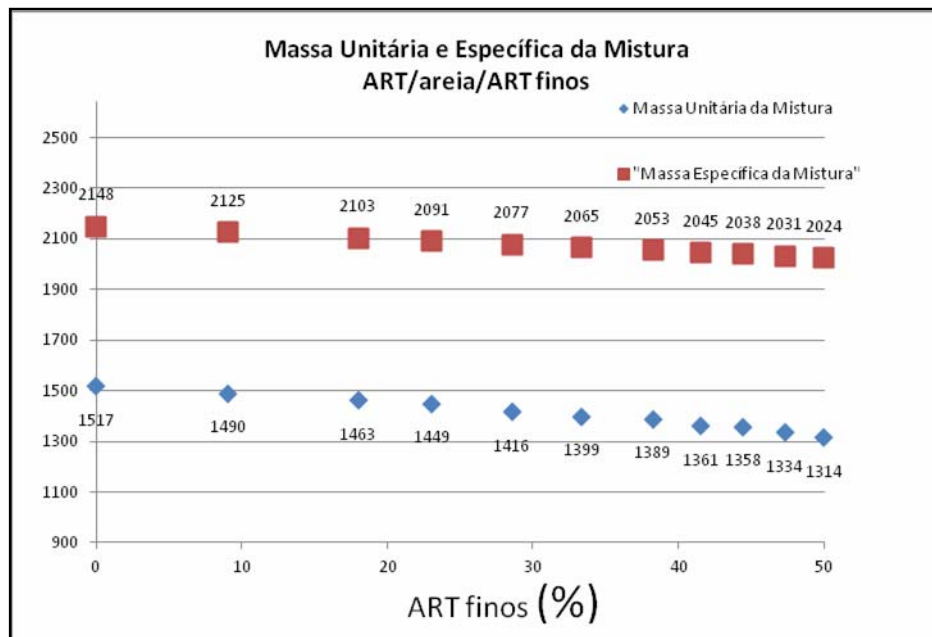


Figura 4.10: Massa específica e massa unitária da mistura ART/areia/ART_{finos}.

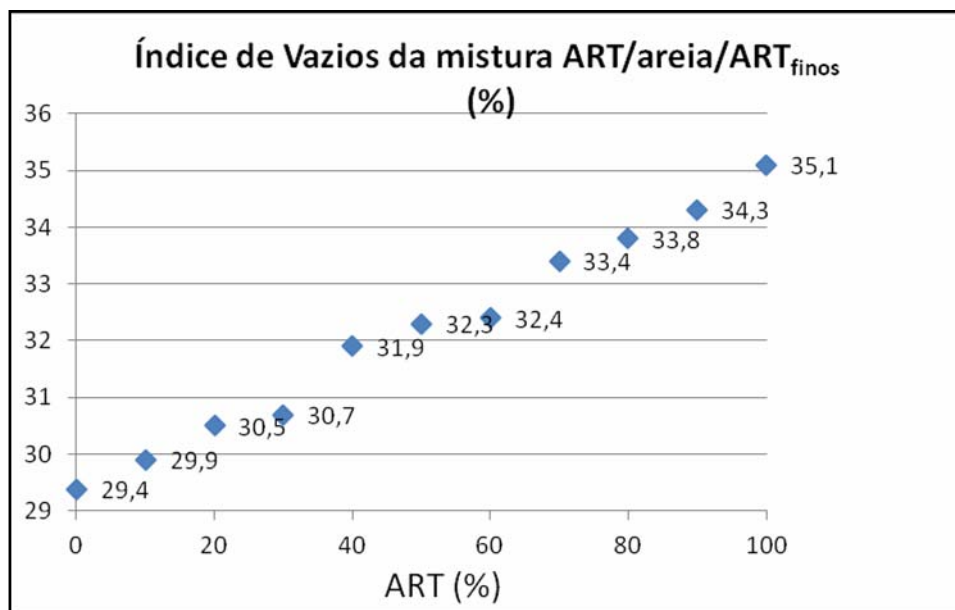


Figura 4.11: Índice de vazios da mistura ART/areia/ART_{finos}.

Em razão do objetivo deste trabalho ser a obtenção do CAA com o ART, adicionando apenas os finos desse material e aditivo superplastificante, optou-se então pela a utilização do método proposto por Tutikian (2004), tendo em vista ser este o mais adequado para esta proposta, por se tratar de um método empírico, onde o teor de finos é definido por

tentativas, através de sucessivas adições, até que se consiga uma mistura com fluidez e coesão adequadas para o CAA.

4.1.6 Produção do concreto auto-adensável com agregado reciclado de telha

Com base nos resultados dos ensaios chegou-se a conclusão que o percentual de aditivo superplastificante, em relação à massa de cimento, que apresentou o menor tempo para a fluidez da pasta (9 segundos), foi de 0,8%. Com este valor foi fixado e procedeu-se então a preparação das misturas, variando a proporção de material fino, (ART_{finos}), em substituição gradativa do agregado miúdo natural, no intuito de obter a mistura com coesão adequada para o concreto, conforme método proposto por Tutikian (2004).

A determinação da proporção adequada de substituição do agregado miúdo natural pelo ART_{finos} , seguiu os quantitativos demonstrados na Tabela 4-8. A partir do traço de referência, com o aditivo superplastificante, foram realizados acréscimos dos materiais, variando a proporção entre o agregado miúdo e o ART_{finos} , e determinado o valor para o ensaio de espalhamento, até que se obtivesse a mistura cujo tempo de espalhamento do concreto para atingir um diâmetro de 50 cm estivesse entre 2 e 7 segundos e abertura do diâmetro final de 60 a 80 cm, conforme especificações de EFERNAC (2002), Gomes (2002) e RAVINDRA *et al.* (2004).

Tabela 4-8 – Determinação da proporção de substituição do agregado miúdo pelo ART_{finos}

Traço Unitário (Cim.: ART_{finos} : Areia: ART)	Cimento		ART_{finos}		ART	
	Massa total (kg)	Acréscimo (kg)	Massa total (kg)	Acréscimo (kg)	Massa total (kg)	Acréscimo (kg)
1:0:1,95:1,88	5,12	0	0	0	9,64	0
1:0,1:1,85:1,88	5,64	0,52	1,0	1,0	10,60	0,96
1:0,2:1,75:1,88	6,15	0,52	2,0	1,0	11,57	0,96
1:0,3:1,65:1,88	6,67	0,52	3,0	1,0	12,53	0,96
1:0,4:1,55:1,88	7,17	0,52	4,0	1,0	13,50	0,96
1:0,5:1,45:1,88	7,69	0,52	5,0	1,0	14,46	0,96
1:0,6:1,35:1,88	8,20	0,52	6,0	1,0	15,42	0,96
1:0,7:1,25:1,88	8,72	0,52	7,0	1,0	16,40	0,96
1:0,8:1,15:1,88	9,23	0,52	8,0	1,0	17,35	0,96
1:0,9:1,05:1,88	9,74	0,52	9,0	1,0	18,32	0,96
1:1,0:0,95:1,88	10,25	0,52	10,0	1,0	19,28	0,96

No procedimento desta substituição foram acrescentados ainda os quantitativos de água e de aditivo superplastificante para manter constante a relação água/cimento de 0,545 e o

percentual de 0,8% de aditivo. Na Figura 4.12 está ilustrado o procedimento de mistura do concreto sem adição de finos.

A Figura 4.13 ilustra a primeira determinação do teste do espalhamento com o concreto no traço inicial, também sem adições de aditivo superplastificante e ART_{finos} . Nota-se nesta imagem que o concreto inicial apresenta pouca fluidez e pouca coesão entre as partículas. A partir deste momento iniciou-se a adição do aditivo superplastificante e o primeiro acréscimo de ART_{finos} .



Figura 4.12: Preparação inicial do CAA.



Figura 4.13: Determinação do espalhamento do concreto inicial.

O concreto que apresentou o melhor desempenho quanto à fluidez e coesão das partículas, na relação ART_{finos} /agregado miúdo, foi o traço de 1:0,5:1,45:1,88 (cimento: ART_{finos} :agregado miúdo: ART). Este concreto apresentou tempo de espalhamento T_{50} e diâmetro final D_f , dentro dos limites pré-estabelecidos, e seu espalhamento pode ser observado na

Figura 4.14. Os valores de referência para estes testes são: tempo de espalhamento T_{50} , entre 2 a 7 segundos, e diâmetro final D_f , no intervalo de 60 a 80 cm.



Figura 4.14: Espalhamento do concreto final.

Attingido os parâmetros para o teste do espalhamento e diâmetro final, fixou-se então o traço para o CAA com o ART, mediante o emprego do aditivo superplastificante e a adição do ART_{finos}.

4.2 PROCEDIMENTO E FLUXOGRAMA PARA O MÉTODO DE DOSAGEM UTILIZADO

Verificou-se neste estudo, que os métodos de dosagem para CAA pesquisados, não se mostraram totalmente adequados para a produção deste tipo de concreto com a utilização da fração graúda do ART. Foi necessário então, buscar pontos positivos de diferentes métodos de dosagem para a obtenção do CAA com o ART.

Adotou-se um CCV de referência dosado a partir do método IPT/EPUSP, proposto por Helene e Terzian (1992). Conhecida a relação água/cimento deste traço foi determinado o ponto de saturação do aditivo superplastificante. Sendo definidos o traço e o teor de aditivo superplastificante, foi realizado estudo para a obtenção do teor de adição de finos em substituição ao agregado miúdo, conforme proposto por Tutikian (2004). A mistura que atendeu aos parâmetros do Teste do Espalhamento, para T_{50} entre 2 e 7 segundos e abertura do diâmetro final D_f entre 60 e 80 cm, foi fixada como o traço para o CAA. O procedimento para a obtenção do CAA com ART pode ser resumido na Figura 4.15

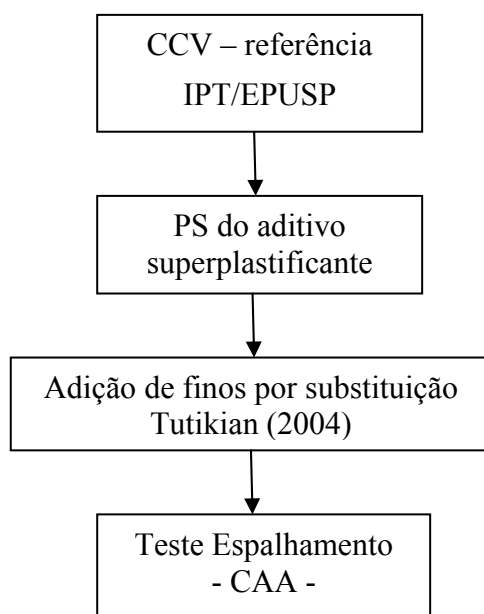


Figura 4.15: Procedimento para a obtenção do CAA com ART.

4.3 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

4.3.1 Determinação da massa específica e do teor de ar incorporado

A determinação da massa específica do concreto no estado fresco foi realizada conforme norma ABNT NBR 9833: 2008, e o teor de ar incorporado conforme norma ABNT NBR NM 47: 2002. O equipamento utilizado na realização dos ensaios foi o Medidor de Ar Incorporado, capacidade 8 litros, ilustrado na Figura 4.16.



Figura 4.16: Aparelho Medidor de ar incorporado.

O valor obtido para a massa específica no estado fresco foi de 2285 kg/m^3 e para o teor de ar incorporado 0,9%.

Segundo Metha e Monteiro (2008), a massa específica do concreto no estado fresco depende diretamente da massa específica do agregado, da sua porosidade, textura, forma e tamanho. A massa específica de concretos com agregados naturais variam entre 2200 a 2500 kg/m^3 , sendo que para concretos com agregados pesados, como por exemplo, agregados do tipo barita ou limalha de ferro, esta massa específica pode variar entre 3200 a 3500 kg/m^3 .

Para o traço do CCV utilizado como referência o valor obtido para a massa específica no estado fresco foi de 2180 kg/m^3 . O CAA com ART apresentou massa específica no estado fresco de 2284 kg/m^3 . Observa-se então que, com o acréscimo de finos e de aditivo superplastificante, houve um aumento de 4,6% sobre a massa específica no estado fresco.

Ar incorporado não havia sido medido para o concreto de referência e o valor apresentado pelo CAA com ART, de 0,9%, pode ser considerado dentro da normalidade para este tipo de concreto.

4.3.2 Teste de Espalhamento

Os valores encontrados para estes ensaios foram de 5,2 segundos para o tempo de abertura de 50 cm, T_{50} , e de 72 cm para a abertura do diâmetro final D_f atendendo então aos limites especificados para este teste.

Embora o concreto tenha atendido às especificações quanto ao teste do espalhamento, percebe-se na Figura 4.17 que este concreto apresenta ainda certa segregação, o que poderia ser melhorado, possivelmente, com o aumento do teor de $\text{ART}_{\text{finos}}$ e aditivo superplastificante, mas que não foi o objeto de investigação para esta etapa do trabalho, já que o concreto já havia atingido os parâmetros para a consistência requerida para o CAA



Figura 4.17: Teste do espalhamento, determinação do diâmetro final D_f .

4.3.3 Teste da Caixa L

Este ensaio tem como finalidade determinar a fluidez e a capacidade de passagem do CAA por obstáculos. O equipamento utilizado, descrito no capítulo 2, foi preparado conforme recomendações e limites segundo EFENARC (2002), Gomes (2002) e Ravindra *et al.* (2004), e está ilustrado na Figura 4.18. Neste ensaio determina-se o tempo que o CAA leva para percorrer uma distância horizontal de 20 cm (TL_{20}) e de 40 cm (TL_{40}), e a razão H_2/H_1 , como sendo a relação entre as alturas do concreto nos pontos final e inicial, respectivamente, na horizontal.

Os resultados obtidos para este ensaio foram de 3 segundos para TL_{20} e de 6 segundos para TL_{40} . A relação H_2/H_1 foi 0,81.

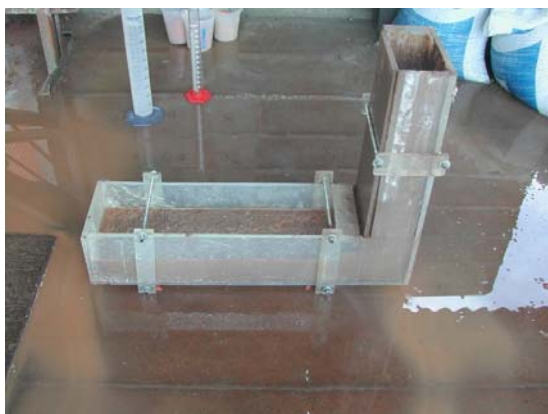


Figura 4.18: Teste da Caixa L.

Gomes (2002) estabelece valores de $TL_{20} \leq 2$ segundo, $TL_{40} \leq 4$ segundos e relação $H_2/H_1 \geq 0,80$. Embora o concreto não tenha atendido os limites de tempo TL_{20} e TL_{40} , até mesmo pela dificuldade de se obter estes tempos, razão pela qual vários autores consideram estes parâmetros facultativos, a relação final H_2/H_1 atendeu ao especificado por este autor, podendo ser considerado a habilidade de passagem por obstáculos, aceitável.

4.3.4 Teste do Tubo U

Este teste tem como finalidade verificar a resistência à segregação, ou seja, que os agregados graúdos do CAA sejam distribuídos de maneira uniforme, tanto na vertical quanto na horizontal, quando introduzido ao longo do aparato ilustrado na Figura 4.19.



Figura 4.19: Teste do Tubo U.

Conforme descrito no capítulo 2, são determinadas neste teste as relações de segregação (RS), dividindo-se as massas de agregado graúdo presentes em fatias retiradas em 03 trechos ao longo do tubo, relativas aos pontos de entrada do CAA no tubo na vertical, no início do trecho horizontal e no final do trecho horizontal. As RS foram de 0,92 para o início do trecho horizontal/entrada na vertical e de 0,97 para o fim do trecho horizontal/entrada na vertical.

Considera-se como resultados para o teste do Tubo U a menor relação de segregação entre os trechos, sendo então o resultado obtido para RS igual a 0,92.

Gomes (2002) estabelece que se a RS for menor que 90% o concreto poderá segregar, ou seja, é necessário que adicione mais finos ou aditivos modificadores de viscosidade para dar maior coesão à mistura.

No caso do CAA com o ART o resultado do teste do Tubo U indicou não haver segregação do concreto, porém conforme pode ser observado na Figura 4.20 e na Figura 4.21, nos pontos de curvas do tubo ocorreu certa concentração do ART.



Figura 4.20: Trecho horizontal do Teste do Tubo U.

Embora tenha ocorrido esta concentração do ART nos pontos de curva do Tubo U, o resultado do ensaio indica que este tipo de concreto não deve apresentar segregação. Por se tratar de um CAA composto por um tipo de agregado cujas referências são poucas na literatura, serão necessários estudos investigativos mais profundos para que tal análise possa ser feita com maior confiabilidade.



Figura 4.21: Detalhe de concentração do ART no ponto de curva.

4.4 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

4.4.1 Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica – UPV.

O método de ensaio para a determinação da Velocidade de Pulso Ultrassônico, UPV, consiste em medir o tempo de percurso das ondas longitudinais de pulso ultrassônico passando através do concreto (METHA e MONTEIRO, 2008), utilizando um equipamento de ultrassonografia composto por um circuito eletrônico capaz de gerar pulsos que são transformados em ondas ultrassônicas e transmitidos ao concreto, recebidas por transdutor-receptor, amplificadas e transformadas em pulsos elétricos, permitindo que se meça o tempo de propagação.

Este ensaio foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 8802: 1994, sendo executado nas idades de 03, 07 e 14 dias, nos os corpos-de-prova que também foram submetidos aos ensaios de determinação da resistência à compressão e módulo estático de elasticidade à compressão. Na Figura 4.22 está ilustrada a execução do ensaio de UPV ou Ultrassom.

Para a realização deste ensaio houve a necessidade de preparação da superfície de topo dos corpos-de-prova, cuja aparência final pode ser observada na Figura 4.23.

Os valores obtidos para o ensaio de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica estão descritos na Tabela 4-9.



Figura 4.22: Ensaio de Ultrassom.



Figura 4.23: Superfície lixada do topo do CP.

Tabela 4-9 – Resultados dos ensaios de determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica (UPV).

CP N°	Idade (dias)	Altura CP (cm)	Tempo de Prop. da onda (s)	Velocidade de Prop. da onda (m/s)	Média (m/s)
01	03	20,10	65,8	3055	3123
02		19,88	64,2	3097	
03		19,91	62,3	3196	
04		19,87	64,4	3085	
05		20,09	63,1	3184	
06	07	19,85	61,5	3228	3234
07		20,13	61,2	3289	
08		19,93	62,0	3215	
09		20,15	61,2	3292	
10		20,03	63,7	3144	
11	14	19,94	59,2	3368	3368
12		19,98	58,2	3433	
13		19,82	59,9	3309	
14		19,87	59,3	3351	
15		20,00	59,2	3378	

Os tempos médios para a velocidade de propagação da onda ultrassônica foram: 3123 m/s aos 03 dias, 3234 m/s aos 07 dias e 3368 m/s aos 14 dias de idade. Ocorreu um aumento médio de 3,5% na velocidade de propagação dos 03 para os 07 dias de idade, e de 4,0% de 07 para 14 dias de idade.

Na Figura 4.24 observa-se o gráfico da evolução das medidas dos valores de velocidade de propagação de onda ultrassônica.

Embora o ensaio de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica não teve como objetivo estimar valores para resistência à compressão ou módulo estático de elasticidade à compressão, seu emprego foi de fundamental importância para a verificação da uniformidade do concreto dos corpos-de-prova e também da evolução na compacidade ao longo das idades de ensaio.

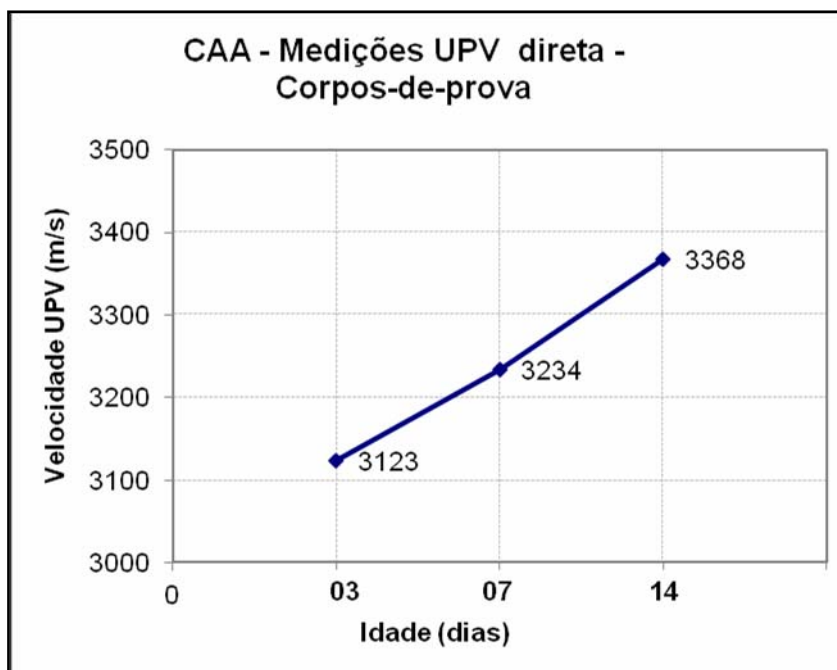


Figura 4.24: Evolução da velocidade de propagação da onda ultrassônica com a idade no CAA.

4.4.2 Resistência à compressão e módulo estático de elasticidade à compressão

Os ensaios de determinação da resistência à compressão foram realizados conforme norma ABNT NBR 5739: 2007, e o de módulo estático de elasticidade à compressão conforme norma ABNT NBR 8522: 2008. A Figura 4.25 ilustra a realização do ensaio de determinação da resistência à compressão e a Figura 4.26 ilustra a realização do ensaio de determinação do módulo. Nestes ensaios foi utilizado o equipamento Máquina de Ensaio marca EMIC modelo DL60000, com célula de carga de 600 kN.

Os resultados dos ensaios de determinação da resistência à compressão e do módulo estático de elasticidade à compressão, estão descritos na Tabela 4-10. Constam ainda nesta tabela os valores do módulo de elasticidade calculados conforme a norma ABNT NBR 6118:2007, obtidos pela seguinte equação:

$$E_c = 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad (\text{eq. 15})$$

Tabela 4-10 – Resultados dos ensaios de determinação da resistência à compressão e do módulo estático de elasticidade à compressão.

CP N°	Idade (dias)	Altura (cm)	Diâmetro (cm)	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade E _c (GPa)	E _c - NBR 6118 - (GPa)
01	03	20,10	10,11	19,6	-	-
02		19,88	10,06	20,5		
03		19,91	9,98	18,5		
04		19,87	9,95	20,3		
05		20,09	10,06	18,6		
Média				19,5	11,4	24,5
Desvio padrão				0,93	0,90	0,52
06	07	19,85	10,06	23,8	-	-
07		20,13	9,98	23,1		
08		19,93	9,99	25,9		
09		20,15	10,05	23,6		
10		20,03	10,03	24,0		
Média				24,1	13,4	27,7
Desvio padrão				1,07	0,52	0,56
11	14	19,94	10,08	28,4	-	-
12		19,98	9,97	26,5		
13		19,82	10,07	26,2		
14		19,87	10,15	27,1		
15		20,00	10,10	27,5		
Média				27,2	15,6	29,1
Desvio padrão				1,00	0,79	0,29

Os ensaios de resistência à compressão apresentaram resultados médios de: 19,5 MPa aos 03 dias, 24,1 MPa aos 07 dias e 27,2 MPa aos 14 dias de idade. Para o ensaio de determinação do módulo estático de elasticidade à compressão os resultados obtidos foram: 11,4 GPa aos 03 dias, 13,4 GPa aos 07 dias e 15,6 GPa aos 14 dias de idade.

O gráfico da evolução da resistência à compressão nas idades de ensaio está representado na Figura 4.27. Observa-se um ganho de resistência de 23,6% de 03 para 07 dias e de 12,9% de 07 para 14 dias de idade.



Figura 4.25: Ensaio de resistência à compressão

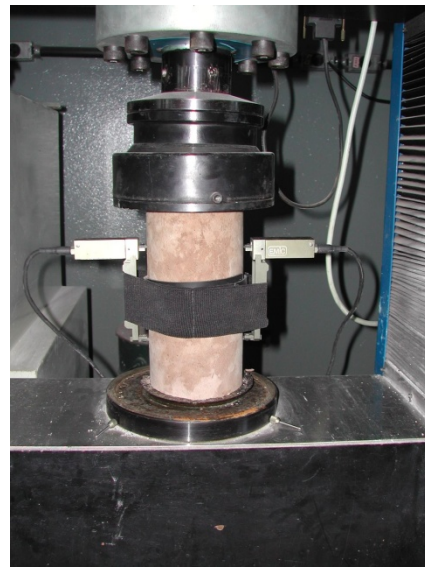


Figura 4.26: Ensaio de módulo estático de elasticidade à compressão

Com relação à resistência à compressão do concreto de referência, CCV dosado por Fonseca (2006), houve um acréscimo de 117,1% na idade de 07 dias, ou seja, de 11,1 MPa do CCV para 24,1 MPa do CAA.

O módulo estático de elasticidade à compressão apresentou evolução de 17,5% na idade de 03 para 07 dias e de 16,4% de 07 para 14 dias. A Figura 4.28 ilustra o gráfico da evolução dos valores nas idades de ensaio.

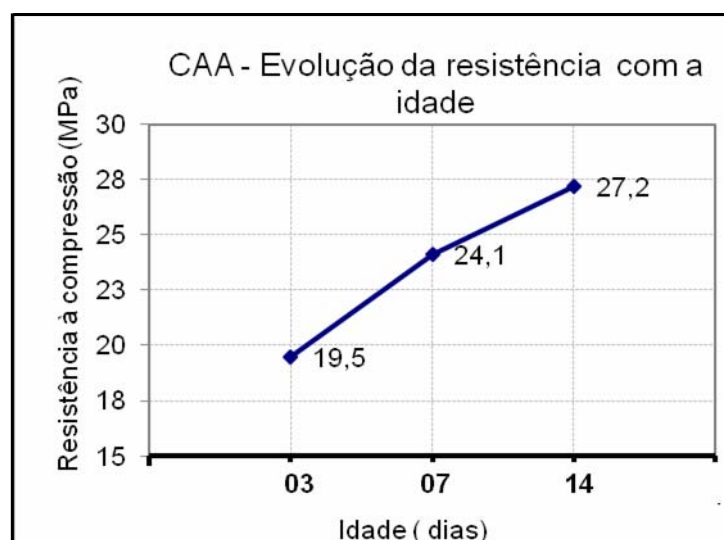


Figura 4.27: Evolução da resistência à compressão com a idade do CAA.

Considerando também valores apresentados pelo concreto de referência para o ensaio de módulo estático de elasticidade à compressão, houve um acréscimo de 26,4% no valor do módulo na idade de 07 dias. O CCV apresentou o valor de 10,6 GPa e o CAA, 13,4 GPa para esta idade.

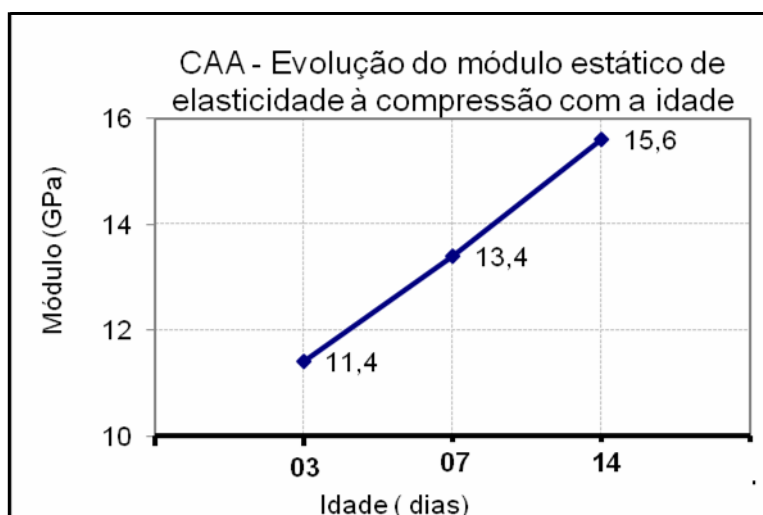


Figura 4.28: Evolução do módulo estático de elasticidade à compressão com a idade do CAA.

Comparando os valores do módulo de elasticidade obtidos nos ensaios e os valores calculados segundo a ABNT NBR 6118:2007, verifica-se uma diferença de 114,9 % maior, na idade de 03 dias, 106,6 % maior na idade de 07 dias e de 86,5 % maior na idade de 14 dias, em relação aos valores calculados segundo esta norma.

4.4.3 Determinação da massa específica aparente, da absorção de água e do índice de vazios.

O ensaio de determinação da massa específica aparente, da absorção de água por imersão e do índice de vazios, foram determinadas conforme norma ABNT NBR 9778:2009.

Para a realização dos ensaios foram moldados corpos-de-prova cilíndricos, diâmetro nominal 10 cm e altura 20 cm. Estes ensaios foram realizados com os corpos-de-prova na idade de 07 dias e os resultados obtidos estão relacionados na Tabela 4-11.

Tabela 4-11 – Resultados dos ensaios de determinação da absorção de água, índice de vazios, massa específica aparente.

CP Nº	Absorção (%)	Índice de vazios (%)	Massa Específica Aparente (kg/m³)
01	11,5	21,9	1848
02	11,8	22,4	1835
03	11,7	21,1	1838
04	10,0	20,7	1840
Média	11,2	21,5	1840

Os valores médios encontrados para estes ensaios foram de 11,2% para a absorção de água por imersão, 21,5% para o índice de vazios e 1840 kg/m³ para a massa específica aparente.

Na ausência de referências para comparação de valores destes ensaios, adotaram-se valores obtidos em ensaios do CCV dosado por Fonseca (2006). Este concreto apresentou valores médios de 12,1% de absorção de água, 23,9% de índice de vazios e massa específica de 1888 kg/m³.

Com relação à absorção de água, o CAA apresentou uma redução de 7,4% em comparação ao CCV. O índice de vazios apresentou redução de 10,0% e a massa específica aparente, também redução de 2,5%.

A Figura 4.29 ilustra o gráfico dos valores obtidos para o CAA e os valores obtidos para o CCV dosado por Fonseca (2006), para os ensaios de absorção de água e índice de vazios.

Na Figura 4.30 está ilustrado o gráfico comparativo entre os valores obtidos para o ensaio de massa específica aparente do CAA e do CCV,

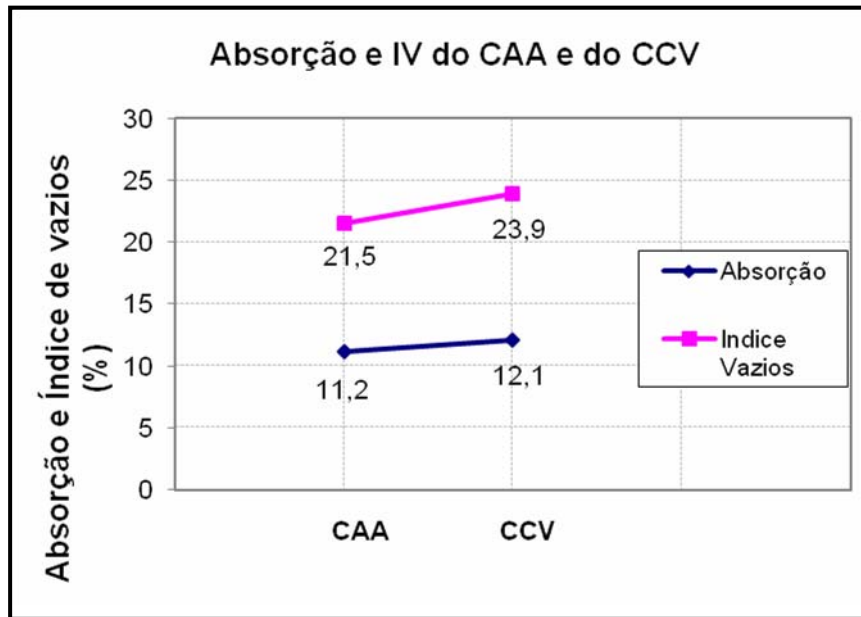


Figura 4.29: Valores de ensaios de absorção e índice de vazios do CAA e do CCV.

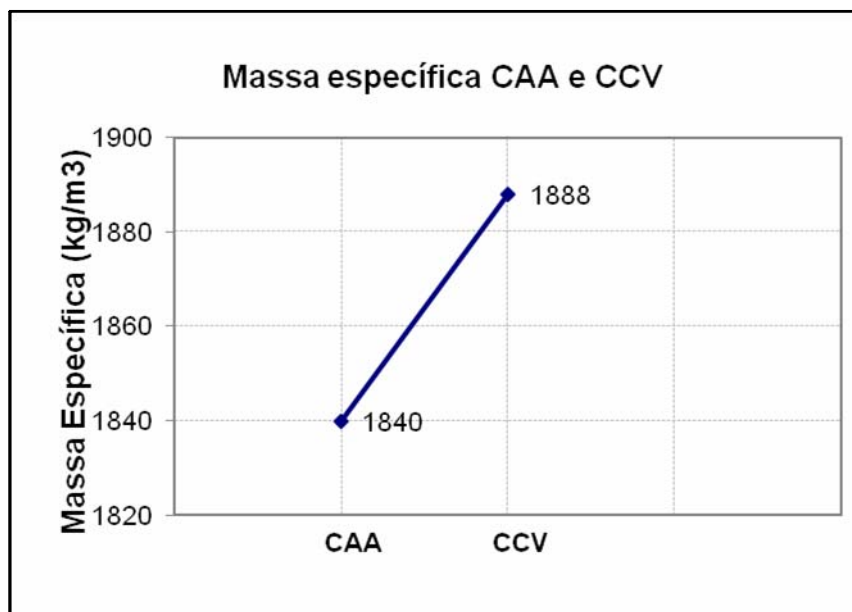


Figura 4.30: Valores de ensaios de massa específica do CAA e do CCV

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

São apresentadas aqui as conclusões referentes à proposta deste trabalho, que é a avaliação do concreto auto-adensável (CAA) produzido com o agregado reciclado de telha cerâmica e, na sequência, sugestões para trabalhos futuros.

5.1 AVALIAÇÃO DO CAA COM ART

Com relação ao objetivo principal desta pesquisa, que foi avaliar um CAA produzido com agregado graúdo reciclado de telha, o ART e com adição de finos deste mesmo material, o ART_{finos}, verificou-se que a meta foi alcançada.

Dos métodos de dosagem para CAA estudados nesta pesquisa, nenhum se mostrou eficiente na totalidade para a utilização do ART. Foi necessário então buscar pontos positivos de diferentes métodos para a obtenção do concreto desejado.

Adotou-se o estudo do ponto de saturação do aditivo superplastificante, proposto pelo método de Gomes (2002). Foi realizado o estudo para a composição do esqueleto granular proposto por Tutikian (2007), mas este procedimento não se mostrou o adequado em razão da granulometria dos materiais utilizados. O procedimento foi abandonado e adotou-se então o método proposto por Tutikian (2004).

A produção deste tipo de concreto com o agregado reciclado de telha foi possível, porém, particularidades relativas a este tipo de agregado devem ser consideradas.

Por ser um agregado com massa específica mais baixa, quando comparado aos agregados naturais, absorção de água elevada e forma lamelar, encontrou-se dificuldade para a produção do CAA quanto ao ajuste das propriedades no estado fresco, como a fluidez e a coesão, que determinam a condição de auto-adensabilidade exigida para CAA.

O parâmetro fixado para obtenção do CAA com o ART foi o teste do espalhamento, com tempo de abertura T_{50} limitado entre 2 e 7 segundos e diâmetro final entre 60 e 80 cm. Embora o concreto tenha atendido a estes limites, $T_{50} = 5,2$ segundos e $D_f = 72$ cm, quando submetido ao teste da Caixa L, os tempos para percorrer as distâncias horizontais de 20 e 40 cm, $TL_{20} = 3$ segundos e $TL_{40} = 6$ segundos, ficaram acima dos limites estabelecidos para o ensaio, porém a relação de altura entre o trecho inicial e trecho final da caixa, $H_2/H_1 = 0,81$ foi atendida.

Justifica-se que o não atendimento a TL_{20} e TL_{40} ocorreu devido à massa específica baixa do ART e ao formato lamelar de suas partículas. Isso indica que CAA com ART mesmo possuindo a fluidez requerida, pode necessitar de um tempo maior para percorrer as distâncias e preencher os espaços. A forma alongada propicia o travamento entre as partículas, necessitando então um maior teor de finos, ou do uso de aditivos modificadores de viscosidade, para promover o melhor deslocamento entre estas partículas.

O concreto em estudo atendeu também às especificações para o teste do Tubo U, que determina a segregação do CAA. Mesmo atingindo os valores de relação de segregação (RS) estabelecidos para este ensaio, foi possível observar visualmente que o CAA com ART apresenta ainda certa segregação, o que poderá ser melhorado, mas que não foi realizado neste trabalho.

A alta taxa de absorção de água do ART requer um procedimento de molhagem previamente à mistura do concreto. A sucção de água inicial é elevada, mas cai rapidamente, daí a necessidade de se misturar parte da água de absorção para suprir essa capacidade, evitando assim que a água de amassamento do concreto seja perdida para o agregado, afetando características tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido.

Em estudos anteriores o uso do ART em substituição ao agregado graúdo natural apresentou quedas significativas nos valores de resistência à compressão. Buscou-se então

nesta pesquisa determinar a resistência à compressão do ART para verificar sua influência na resistência final do concreto. Os Concretos produzidos com ART graúdo haviam atingido resistência média à compressão de 16,5 MPa aos 28 dias de idade. Na ocasião entendeu-se que a baixa resistência do concreto era devido à baixa resistência da partícula do agregado.

Investigando-se a resistência da partícula do ART chegou-se aos valores de 16,8 MPa para a resistência característica estimado do ART, e um valor médio de 27,0 MPa. No entanto, o CAA produzido com o ART atingiu resistência à compressão média de 19,5 MPa aos 03 dias de idade, 24,1 MPa aos 7 dias e 27,2 MPa aos 14 dias, estimando-se que essa melhora foi devida à matriz de melhor qualidade, mediante a adição de finos e o uso do aditivo superplastificante. A resistência à compressão do concreto aumentou, chegando ao limite da resistência média do ART.

O módulo de elasticidade do CAA com o ART apresentou valores mais baixos quando comparado aos valores de concretos com agregados naturais, o que já era esperado. O mesmo traço do CCV de referência produzido com agregado graúdo natural basáltico, apresentou valor médio para módulo de elasticidade de 39,7 GPa aos 28 dias de idade, enquanto que o CAA apresentou valor médio, aos 14 dias, de 15,6 GPa. Tal fato pode não ser considerado como negativo, podendo até se constituir em vantagem, na medida em que isto pode torná-lo mais susceptível a pequenas deformações, favorecendo assim sua aplicação em situações específicas, como por exemplo, na produção de painéis habitacionais, uma das aplicações mais difundidas para o uso do CAA.

Desta forma, superadas as dificuldades para a obtenção do concreto auto-adensável com o agregado reciclado de telha, considera-se que os objetivos foram atendidos, o concreto assim desenvolvido tem potencial para emprego em situações específicas na construção civil e pode contribuir para a sustentabilidade da atividade fabril.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.

Pesquisas futuras poderão ser realizadas com o intuito de se aperfeiçoar o CAA com ART, como por exemplo, melhorando as condições de coesão, já que foi observada visualmente certa segregação deste concreto. A composição granulométrica mais adequada dos

materiais constituintes, o ajuste do teor de finos ou do uso do aditivo modificador de viscosidade, como forma de combater a segregação, são pontos que poderão ser investigados.

O uso do aditivo superplastificante poderá ser otimizado tendo em vista que não se procurou neste trabalho reduzir a relação água/cimento do CCV de referência. Tal opção poderia trazer benefício ao CAA sendo que a redução da relação a/c poderia melhorar propriedades no endurecido, relativas à compactidade e resistência mecânica.

Outro tópico merecedor de especial atenção é a necessidade de aprimoramento de um método de dosagem para concretos auto-adensáveis com o emprego específico de agregado reciclado cerâmico, tendo em vista as características deste tipo de resíduo, como baixa massa específica, alta taxa de absorção de água e formato lamelar das partículas, e o potencial de utilização deste como agregado para a produção de concreto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMBROISE, J.; ROLS, S.; PÉRA, J. *Production and testing of self-leveling concrete*. **In: High Performance Concrete**. CD-ROM, p. 555-565, Gramado, 1999.

ARAUJO, J.L.; BARBOSA, N.P.; DOS SANTOS, S.B; REGIS, P.A. Concreto autoadensável com materiais locais no nordeste brasileiro. **In: 45° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**. CD-ROM, Vitória, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 3° ed. São Paulo, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica, Rio de Janeiro, 2001.

_____ **NBR NM 26**: Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2009.

_____ **NBR NM 27**: Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

_____ **NBR NM 30**: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2000.

_____ **NBR NM 33**: Concreto – Amostragem de concreto fresco. Rio de Janeiro, 1998.

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

_____ **NBR NM 46:** Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

_____ **NBR NM 47:** Concreto – Determinação do teor de ar em concreto fresco. Rio de Janeiro, 2002.

_____ **NBR NM 49:** Agregado miúdo – Determinação das impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

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

_____ **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e da massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____ **NBR NM 53:** Agregado graúdo – Determinação da massa específica e da massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

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

_____ **NBR NM 68:** Concreto – Determinação da consistência pelo espalhamento na mesa de Graff. Rio de Janeiro, 1998.

_____ **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

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

_____ **NBR 7211:** Agregado para concreto – Especificações. Rio de Janeiro, 2009.

_____ **NBR 7809:** Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. Rio de Janeiro, 1983.

_____ **NBR 7810:** Agregado em estado compactado seco – Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1983.

_____ **NBR 8522: Concreto** – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

_____ **NBR 8802: Concreto endurecido** – determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica, Rio de Janeiro, 1994.

_____ **NBR 9778: Argamassas e concreto endurecidos** – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, Rio de Janeiro, 2009.

_____ **NBR 9833: Concreto fresco** – Determinação da massa específica, do rendimento e d teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008.

_____ **NBR 9937: Agregados** – Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1987.

_____ **NBR 9938: Agregados** – Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos. Rio de Janeiro, 1987.

_____ **NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil** – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural, Rio de Janeiro, 2004.

_____ **NBR 15270-2: Componentes cerâmicos** – Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural. Rio de Janeiro, 2005.

_____ **NBR 15823-1: Concreto auto-adensável** – Classificação, controle e aceitação no estado fresco. Rio de Janeiro, 2010

BARRA, M. **Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón armado**. 1996. 223p. Tesis (Doctoral) - Universt Politècnica de Catalunya, Barcelona, 1996.

BILLBERG, P. (1999) Self-Compacting Concrete for Civil Engineering Structures – The Swedish Experience. In: S. C. C. R. I. 1-77. Stockholm.

BOSILJKOV, V.B. *Scs mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler*. In: Cement and Concrete Research, n. 33, p.1279-1286, 2003.

BUI, V. K.; MONTGOMERY, D.; HINCZAK, I.; TURNER, K. *Rapid testing method for segregation resistance of self-compacting concrete*. . In: Cement and Concrete Research, n. 32, p.1489-1496, 2002.

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concreto produzido com agregado reciclado, considerando-se a variabilidade de composição do RCD**. São Carlos-SP, 2007. 280p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

CAMARGOS, U. A. (2002) Concreto Auto-Adensável e Autonivelante. *Téchne*, São Paulo, n. 59, p. 04-05, fevereiro 2002. COPPOLA, L. *Self-compacting concrete*. **In: Concrete Technology**, p. 42-47, 2000.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE **Resolução nº. 307 de 5 de julho de 2002**. Dispõe sobre gestão dos resíduos da construção civil. 2002. Disponível em: <<http://www.ibamap.hpg.ig.com.br/30702RC.htm>> Acesso: 16 mai.2012.

COPPOLA, L. *Self-compacting concrete*. **In: Concrete Technology**, p. 42-47, 2000.

DIAS, J.F., JOHN, V.M., CINCOTTO, M.A. Diagnóstico visando a reciclagem de resíduos de cerâmica vermelha. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 45.**, 2001, Florianópolis. Anais... São Paulo: ABC, 2001. p.1-13. 1 CD-ROM.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Agregado sintético fabricado com argila – desgaste por abrasão – DNER-ME 222**. Rio de Janeiro, 1994.

DIAS, J.F. A construção civil e o meio ambiente. In: **CONGRESSO ESTADUAL DE PROFISSIONAIS CREA-MG, 5.**, 2004, Uberlândia. Anais... Uberlândia: [s.n.], 2004a.

DIAS, J.F. **Avaliação de agregados reciclados de resíduos de fabricação de telhas de cerâmica vermelha para seu uso em camadas de baixo custo**, 2004. Tese(Doutorado) Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004b.

DIAS, J. F.; SILVA, W.G. da; SILVA, T. J. da. Influência do agregado reciclado cerâmico na resistência do concreto. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 50**°, 2008, Salvador. Anais... São Paulo: IBRACON, 2008, p.1-14.

EUROPEN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS (EFNARC). *Specification and guidelines for self-compacting concrete*. In: **EFNARC**. Fevereiro, 2002.

FONSECA, A. P. **Estudo comparativo de concretos com agregado graúdo reciclado de telha cerâmica e agregado graúdo natural**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia. Dissertação de mestrado. 2006 223p.

FURNAS. Concreto – **determinação da habilidade de preenchimento do concreto auto-adensável utilizando-se o cone de Abrams (*slump flow test*)** – método de ensaio. **Manual de qualidade**, p.1-6, 2004a.

FURNAS. Concreto – **determinação da habilidade de preenchimento do concreto auto-adensável pelo método do funil V** – método de ensaio. **Manual de qualidade**, p.1-7, 2004b.

FURNAS. Concreto – **determinação das habilidades passantes e de preenchimento do concreto auto-adensável pelo método da caixa L** – método de ensaio. **Manual de qualidade**, p.1-7, 2004c.

FURNAS. Concreto – **determinação das habilidade passante do concreto auto-adensável pelo método da caixa U** – método de ensaio. **Manual de qualidade**, p.1-7, 2004d.

GOMES, P. C. C. *Optimization and Characterization of High-Strength Self-Compacting Concrete* - Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2002.

GOMES, P.C.C; GETTU, R.; AGULLÓ, L.; TENÓRIO, J.J.L. *Concreto autoadensável um aliado ao desenvolvimento sustentável do concreto*. In: 45º Congresso Brasileiro Do Concreto, CD-ROM, Vitória, 2003.

GRAUERS, M (coordinator). *In: Brite EuRam Program: Rational production and improved working environments through using self compacting concrete. 9 Tasks*, 1998.

HANSEN T. C. **Recycling of demolished concrete and masonry**. London: Chapman & Hall, 1992. 305p. (RILEM Report 6).

- HELENE, P.; TERZIAN, P. *Manual de dosagem e controle do concreto*. Pini, São Paulo, 1992.
- HELENE, P. Dosagem dos concretos de cimento Portland. **In: Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. Ed: G.C. ISAIA. São Paulo, volume 1, capítulo 15, p.439-471, 2005.
- HENDRIKS, C. H.; PIETERSEN, H. S.; FRAAY, A. F. A. Recycling of building and demolition waste – an integrated approach. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Tecnologia de edificações**. São Paulo: Pini,1988.
- HENRIQUES Jr., M. F. et al. Manual de conservação de Energia na Indústria de Cerâmica Vermelha. **Ministério da Ciência e Tecnologia/INT**. Rio de Janeiro. Setembro/1993. 39p.
- IPR. Ministério dos Transportes. DNER. **Estudos e pesquisas de rochas de pedreiras para estabelecimento de critérios de qualidade frente as normas e procedimentos existentes e sua aceitação**. Rio de Janeiro: IPR, 1998. 153p. Relatório Final.
- ISAIA, G.C. O concreto: da era clássica à contemporânea. **In: Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. Ed: G.C. ISAIA. São Paulo, volume 1, capítulo 1, p.1-43, 2005.
- JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 2000. 102p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- LEVY, S.M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. 2002. 194p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- LISBÔA, E.M. *Obtenção do Concreto Auto-Adensável Utilizando Resíduo do Beneficiamento do Mármore e Granito e Estudo de Propriedades Mecânicas*. - Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2004. 121p.

MENDES, H. S. *Análise da ligação entre o substrato de concreto antigo e concreto auto adensável com lançamento subaquático*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2009. 86p.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. *Concreto: estruturas, propriedades e materiais*. São Paulo: PINI, 1994.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. *Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais*. 3ª edição, IBRACON, São Paulo: Brasil, 2008.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2.ed. São Paulo. Editora Pini, 1997.

NIEBEL, P. R. *Avaliação do desempenho no estado fresco de argamassas com agregado miúdobritados utilizando curvas granulométricas parabólicas*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2008. 141p.

OKAMURA, H. *Self-compacting High-performance concrete*. **In: Concrete International**, v.19, n.7, p. 50-54, Julho 1997.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. *Self-compacting concrete*. **In: Journal of Advanced Concrete Technology**, Vol. 1, n. 1, p. 5-15, 2003.

OLIVEIRA, M. J. E. *Agregado Reciclado empregado na produção de concreto modificado com aditivo*. *Exacta*, São Paulo, V.4, n. especial, p. 15-24, 2006.

PERSSE, B. *A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete*. **In: Cement and Concrete Research**, n. 31, p. 193-198, 2001.

PETERSEN, Ö. *Preliminary mix-design*. **In: Brite EuRam Program: Rational production and improved working environment through using self compacting concrete**. Task 1, p.1- 41, 1998.

PETERSEN, Ö. *Workability*. **In: Brite EuRam Program: Rational production and improved working environments through using self compacting concrete**. Task 2, p.1-56, 1999.

PETRUCCI, E.G.R. *Concreto de cimento portland*. 12 ed. São Paulo, 1998

PINTO, T.P. *Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana*. 1999. 189p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

PROSKE, T.; GRAUBNER, C.A. – *Self-compacting concrete- pressure on formwork and ability to deaerate*. **In: *Darmstadt Concrete***, n.17, 2002.

QUARESMA, Henry U. (coord). **Diagnóstico do Setor de Cerâmica Vermelha em Santa Catarina**. Secretaria do Estado da Ciência e Tecnologia das Minas e Energia do Estado de Santa Catarina, Florianópolis/SC, julho/1990. Relatório, 58p.

RAVINDRA GETTU; ZERBINO, R. L.; BARRAGÁN, B. E.; AGULLÓ, L. Propuesta de Procedimientos Experimentales para la Evaluación de La Autocompactabilidad Del Hormigón Fresco. Informe C4745/2, Departamento de Ingeniería de la Construcción, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2004;

RIGUEIRA VICTOR, J.W.; SERNA ROS, P.; PINTO BARBOSA, M.; MARTI VARGAS, J.R. Utilização de modelos de ensaios reduzidos para a caracterização dos concretos autoadensáveis. **In: 45º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**. CD-ROM, Vitória, 2003.

ROONEY, M. J. Assessment of the Properties of Fresh Self-Compacting Concrete with Reference to Aggregate Segregation. 2002. Tese (Doutorado). University of Paisley/USA.

SILVA, W. G.; DIAS, J.F.; SILVA, T. J. Avaliação de concreto auto-adensável com agregado reciclado de telha cerâmica. 52o CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2010, Fortaleza. **Anais... IBRACON**, 2010.

SJÖSTRÖM, C. Durability and sustainable use of building materials. In: LLEWELLYN, J. W.; DAVIES, H. (Ed.). **Sustainable use of materials**. London: BRE/RILEM, 1992.

SU, N.; HSU, K.C.; CHAI, H.W. *A simple mix design method for self-compacting concrete*. **In: *Cement and Concrete Research***, n. 31, p. 1799-1807, 2001.

TUTIKIAN, B.F. *Método para dosagem de concretos auto-adensáveis*. 2004. 149p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

TUTIKIAN, B.F. *Proposição de um método de dosagem experimental para concretos autoadensáveis*. 2007. Tese de doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

TVIKSTA, L.G. *Quality control*. **In: Brite EuRam Program: Rational production and improved working environment through using self compacting concrete. Task 8.4**, p.1-28, 2000.

VALLE, C. E. **Qualidade Ambiental: ISO 14000**. São Paulo-SP.: Editora SENAC, 5ª ed., 195p., 2004

VERÇOSA, E.J. *Introdução*. **In: Materiais de Construção**, L.A Falcão Bauer. Editora LTC, 5º edição, V.1, p.1-10, 2003.