

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

EVERTON LUIZ DA SILVA MENDES

**CARACTERIZAÇÃO E COMPOSIÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS PARA  
OBTENÇÃO DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL LEVE RECICLADO COM FINS  
ESTRUTURAIS**

Maceió  
2016

EVERTON LUIZ DA SILVA MENDES

**CARACTERIZAÇÃO E COMPOSIÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS PARA  
OBTENÇÃO DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL LEVE RECICLADO COM FINS  
ESTRUTURAIS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Paulo César  
Correia Gomes

Coorientador: Prof. Dr. Rafael Giuliano  
Pileggi

Maceió  
2016

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**  
**Bibliotecário Responsável: Valter dos Santos Andrade**

M538c Mendes, Everton Luiz da Silva.  
Caracterização e composição de agregados reciclados para obtenção de concreto Autoadensável leve reciclado com fins estruturais / Everton Luiz da Silva Mendes. – 2016.  
116 f. : il.

Orientador: Paulo César Correia Gomes.  
Coorientador: Rafael Giuliano Pileggi.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Maceió, 2016.

Bibliografia: f. 112-116.

1. Agregado reciclado. 2. Argamassa. 3. Concreto. 4. Concreto autoadensável.  
I. Título.

CDU: 691.32



Universidade Federal de Alagoas – UFAL  
Unidade Acadêmica Centro de Tecnologia – CTEC  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC

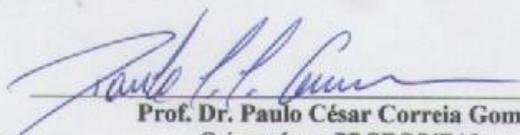


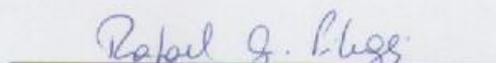
**CARACTERIZAÇÃO E COMPOSIÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS PARA  
OBTENÇÃO DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL LEVE RECICLADO COM FINS  
ESTRUTURAIS**

**EVERTON LUIZ DA SILVA MENDES**

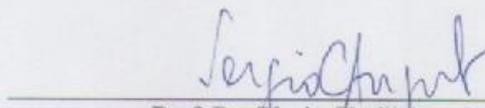
Dissertação submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas e aprovada no dia 09 do mês de dezembro do ano de 2016.

Banca Examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Paulo César Correia Gomes**  
Orientador – PPGEC/UFAL

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Rafael Giuliano Pileggi**  
Coorientador – EPUSP/SP

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Karoline Alves de Melo Moraes**  
CTEC/UFAL

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Sérgio Cirelli Angulo**  
EPUSP/SP

*Dedico este trabalho aos meus pais, Luiz Carlos e Maria Edileuza, e minha irmã Cynthia, pelo amor, amizade e incentivo que sempre tive na minha formação como profissional, e a minha noiva Camila, pelo seu amor e amizade.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa e ao Projeto Universal/CNPq 483935/2012-3, pelo apoio na pesquisa.

Ao Projeto Casadinho PROCAD/552300/2011-0, que possibilitou a parceria UFAL e a USP/SP para desenvolvimento da minha pesquisa.

Ao Laboratório de Estruturas e Materiais (LEMA) da UFAL, e a todas as pessoas que compõe a sua equipe de trabalho, que de alguma forma contribuía para realização deste trabalho.

Ao Laboratório de Microestrutura (LME) e sua equipe de professores, técnicos e alunos de iniciação científica, que muito me ajudaram no desenvolvimento do meu trabalho.

Ao Dr. Roberto César Romano, pelo treinamento nos equipamentos do LME e todo auxílio no desenvolvimento da minha pesquisa.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), na pessoa de Eng. Raphael Baldusco e Dr. Valdecir Quarcioni, pela disponibilidade e pelos equipamentos.

A todos que contribuíram com os materiais utilizados nesta pesquisa: Empresa TELESIL, pelo resíduo; e, GRACE, BASF e MC BAUCHEMIE, pelos aditivos.

Ao professor orientador Dr. Paulo César, pelos ensinamentos, pela orientação e, sobretudo, pela sua amizade.

À professora Dr<sup>a</sup> Karoline Alves, que vem acompanhamento deste a graduação, pelo sua disponibilidade, sugestões e amizade.

Aos professores Dr. Rafael Pileggi e Dr<sup>a</sup> Maria Alba, pelos ensinamentos que foram fundamentais.

Ao professor Dr. Sérgio Angulo, pelos ensinamentos e por todo suporte dado na minha permanência na USP/SP.

Ao Grupo de Pesquisa MECOEFICON, que tanto me ajudaram para o desenvolvimento do trabalho experimental.

Aos amigos formados durante esta jornada, tanto da UFAL quanto da USP/SP, que tanto me ajudaram e encorajaram.

A minha família e minha noiva, que estiveram sempre presentes na vida e torceram por esta minha conquista.

Enfim, a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

A utilização de agregado reciclado na produção de concreto autoadensável (CAA) é relativamente recente. Poucos estudos têm sido desenvolvidos, mas, observam-se inúmeras vantagens em sua aplicação. O concreto autoadensável leve reciclado (CAALR) oferece diversas vantagens do CAA, devido às propriedades de autoadensabilidade, absorve resíduos de construções, na utilização como agregados reciclados, e a leveza devido a menor massa específica dos agregados reciclados, promove a redução das cargas devido ao peso próprio. No entanto, estudos realizados em concreto com agregados reciclados (AGR), têm se mostrado muito complexos devido às características destes agregados, como: elevada porosidade, alto teor de absorção de água, forma irregular, superfície rugosa, etc. Características estas que tendem a conduzir a misturas pouco trabalháveis e de resistência mecânica inferior. Desta forma, o estudo teve como objetivo a obtenção CAALR, separando o processo em duas etapas: agregados e argamassa. Onde, a caracterização do AGR é o meio para o entendimento de suas características e das limitações que ele irá impor na mistura de concreto. Já o estudo de argamassa, o objetivo foi verificar uma composição com os melhores parâmetros de fluidez e reológicos, visto as dificuldades enfrentadas por pesquisadores em obter-se misturas trabalháveis. Assim, verificou-se que as metodologias de caracterização normatizadas, para agregados naturais, enfrentam algumas dificuldades na sua aplicação em agregados reciclados, tornando-as pouco eficientes. As características do agregado reciclado miúdo puderam ser atenuadas com um estudo de composição, chegando a argamassas muito trabalháveis, com baixa tensão de escoamento e viscosidade moderada. A obtenção do CAA foi possível, através de um estudo de teor máximo de agregado reciclado graúdo, através de ensaios em concreto. O concreto obtido apresentou resistência de 30 MPa e massa específica aparente de 2000 kg/m<sup>3</sup>, classificando-o como concreto de aplicação estrutural e leve.

**Palavras-chave:** *Agregado reciclado, Argamassa, Concreto, Concreto Autoadensável.*

## ABSTRACT

The use of recycled aggregate in the production of self-compacting concrete (SCC) is relatively recent. Few studies have been developed, but, there are numerous advantages in its application. The recycled lightweight self-compacting concrete (RLSCC) offers several advantages of SCC, due to the self-compacting properties, it absorbs construction residues, in the use as recycled aggregates, and the lightness due to the smaller specific mass of the recycled aggregates, it promotes the reduction of the loads due to the own weight. However, studies carried out in concrete with recycled aggregates (RA) have shown to be very complex due to the characteristics of these aggregates, such as: high porosity, high water absorption, irregular shape, rough surface, etc. These characteristics tend to lead to mixtures with less workable and lower mechanical strength. In this way, the study had as objective to obtaining the RLSCC, separate the process in two steps: aggregates and mortar. Where, the characterization of the RA is the way to understand its characteristics and the limitations that it will impose in the mixture of concrete. The study of mortars, to verify a composition with the best parameters of fluidity and rheological, since the difficulty faced by researchers in obtaining workable mixtures. Thus, it was verified that the standardized characterization methodologies, for natural aggregates, face some difficulties in their application in recycled aggregates, rendering them inefficient. The characteristics of the recycled aggregate could be attenuated with a composition study, reaching very workable mortars, with low yield stress and moderate viscosity. The SCC was obtained through a study of maximum content of recycled coarse aggregate, through concrete tests. The obtained concrete presented compression strength of 30 MPa and apparent specific mass of 2000 kg/m<sup>3</sup>, classifying it as concrete of structural application and light.

**Keywords:** *Recycled aggregate, Mortar, Concrete, Self-Compacting Concrete.*

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Fatores que influenciam as propriedades reológicas do CAA .....	27
Quadro 2 - Resumo dos ensaios e quantidade de amostras. ....	45
Quadro 3 - Características dos aditivos. ....	46
Quadro 4 - Composição do concreto seco para fabricação dos blocos que originaram os resíduos. ....	48
Quadro 5 - Resistência dos blocos de alvenaria estrutural. ....	49
Quadro 6 - Peneiras utilizadas para determinação da composição granulométrica a partir do Método A. ....	57
Quadro 7 - Peneiras utilizadas para determinação da composição granulométrica a partir do Método B. ....	57
Quadro 8 - Divisões do AGRM em faixas, com seus respectivos procedimentos de verificação da distribuição granulométrica. ....	58
Quadro 9 - Argamassas produzidas para avaliação da estabilidade. ....	67
Quadro 10 - Composição do AGRM das argamassas. ....	69
Quadro 11 - Composições de agregados das argamassas desenvolvidas no estudo de Mendes <i>et al.</i> (2015a). ....	70
Quadro 12- Procedimento de mistura das argamassas. ....	71
Quadro 13 - Ensaio de autoadensabilidade. ....	77
Quadro 14 - Ensaio do concreto no estado endurecido. ....	77
Quadro 15 – Valores médios da morfologia dos Agregados. ....	88
Quadro 16 - Massa específica real dos materiais secos. ....	88
Quadro 17 - Massa Específica pela ABNT. ....	90
Quadro 18 – Propriedades de Fluides e dosagem de aditivo das argamassas. ....	96
Quadro 19 - Comparativo entre o torque de escoamento e o espalhamento das argamassas. ..	99
Quadro 20 - Comparativo entre a viscosidade e o tempo de fluides das argamassas. ....	99
Quadro 21 - Resumo dos concretos produzidos. ....	103
Quadro 22 - Parâmetros de fluides das argamassas. ....	108
Quadro 23 – Parâmetros de fluides dos concretos. ....	109
Quadro 24 - Propriedades mecânicas dos concretos. ....	110
Quadro 25 - Propriedades dos concretos segundo a ABNT NBR 9778:2014. ....	111

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Primeiro protótipo do CAA. ....	20
Figura 2- Condição de umidade das partículas de agregado. ....	38
Figura 3 - Relação da massa específica e absorção. ....	38
Figura 4 - Equipamentos de ensaios dos parâmetros de fluidez da pasta: <i>minislump</i> (à esquerda); e, cone de Marsh (à esquerda).....	41
Figura 5 - Equipamentos de ensaios de fluidez de argamassas: mini tronco de abatimento (à esquerda); e Funil V de argamassa (à direita). ....	42
Figura 6 - Fluxograma das atividades experimentais. ....	43
Figura 7 - Diagrama de resumo das características analisadas e técnicas utilizadas.....	44
Figura 8 - Resíduo de blocos de concreto.....	47
Figura 9 - Resíduo de bloco recolhido da obra.....	48
Figura 10 - Britador de Mandíbulas. (a) Vista lateral do britador, com o recipiente de coleta logo abaixo; (b) Mandíbulas.....	49
Figura 11 - Detalhe das chapas na parte traseira do britador para regular a abertura da mandíbula. ....	50
Figura 12 - Fluxograma do processo de cominuição do resíduo e geração dos agregados. ....	51
Figura 13 - Processo de formação da pilha de homogeneização.....	52
Figura 14 - Pilha de homogeneização: (a) corte das extremidades; (b) separação de alíquotas. ....	52
Figura 15 - Alíquotas separadas. ....	52
Figura 16 - Diagrama do funcionamento do sistema ADI.....	54
Figura 17 - Detalhe da calha vibratória. ....	54
Figura 18 - Imagem captura câmera do equipamento de ADI. ....	55
Figura 19 - Detalhe de como se processa a informação do tamanho das partículas analisadas por EQPC.....	55
Figura 20 - Diagrama do processo que coleta de dados do sistema GL. ....	56
Figura 21 - Quarteador do Tipo JONES.....	59
Figura 22 - Determinação dos parâmetros de morfologia das partículas. ....	60
Figura 23 - Relação entre a esfericidade e a relação de aspecto.....	60
Figura 24 - Esquema do processo de obtenção do volume da amostra dentro do picnômetro de gás hélio.....	61

Figura 25 - Detalhe dos vazios existentes entre os grãos dos agregados, dos poros dos agregados e do envelope que envolve cada grão.....	63
Figura 26 - Recipiente de ensaio para determinação do volume ocupado pela amostra no equipamento de picnometria de pó.....	63
Figura 27 - Imagem real do processo de colocação da amostra juntamente com o pó. ....	64
Figura 28 - Recipiente do ensaio após o processo de compressão da amostra e verificação da diferença entre a distância inicial e final do pistão.....	64
Figura 29 - Dispensor de alta energia.....	67
Figura 30- Reômetro rotacional Poli-USP. Componentes: (1) Dispositivo rotacional; (2) Base e console; (3) Elevador; (4) Recipiente de ensaios; (5) Geometria de mistura. ....	68
Figura 31 – Equipamentos para determinação dos parâmetros de fluidez: (a) Funil V para argamassas; (b) Minislump.....	71
Figura 32 - Reômetro programável. ....	72
Figura 33 - <i>Spindle</i> do tipo <i>T-Bar</i> .....	72
Figura 34 - Ensaio de ciclo de cisalhamento, cada ponto representa um leitura de viscosidade e torque realizado pelo equipamento durante o ensaio.....	73
Figura 35 - Fluxograma de avaliação de quebra dos agregados.....	74
Figura 36 – Misturadores utilizados no estudo. (A) Misturador de eixo vertical e planetário; (B) misturador de eixo inclinado, betoneira. ....	75
Figura 37 - Procedimentos de misturas para avaliação do efeito de quebra do agregado. (1) Ponto de colocação da água para ambos os procedimentos adotados; (2) Ponto de colocação do AGRG do procedimento 2 adotado. ....	76
Figura 38 - Distribuição granulométrica média do AGRM segundo ANBT NBR 7211:2009.	79
Figura 39 - Distribuição granulométrica média do AGRG segundo ABNT NBR 7211:2009.	80
Figura 40 – Comparação entre os métodos de determinação da distribuição granulométrica do AGRM, em porcentagem retida acumulada. ....	81
Figura 41 - Comparação dos métodos utilizados para determinação da distribuição granulométrica do AGRM, em porcentagem retida. ....	81
Figura 42 - Comparação dos métodos utilizados para determinação da distribuição granulométrica do AGRG, em porcentagem retida acumulada.....	82
Figura 43 - Comparação dos métodos utilizados para determinação da distribuição granulométrica do AGRG, em porcentagem retida simples.....	83
Figura 44 - Análise do processo de peneiramento.....	84
Figura 45 – Análise realizado pelo método ADI, formulação EQPC. ....	84

Figura 46 - Distribuição granulométrica dos Finos. ....	85
Figura 47 - Granulometria das Faixas .....	86
Figura 48 – Parâmetros morfológicos para cada faixa de agregado reciclado. ....	87
Figura 49 - Correlação entre os parâmetros de esfericidade e de relação de aspecto.....	87
Figura 50 - Gráfico da variação da massa específica aparente das partículas. ....	89
Figura 51 – Curvas reológicas das argamassas produzidas com fator a/c 0,30: (a) AGRM 1,18 mm – 4,75 mm; (b) AGRM 0,15 mm – 1,18 mm.....	93
Figura 52 - Argamassas produzidas com fator a/c 0,47: (a) Argamassa com AGRM 1,18 mm – 4,75 mm; (b) Argamassa com AGRM 0,15 mm – 1,18 mm. ....	94
Figura 53 - Ensaio de ciclo de cisalhamento. ....	97
Figura 54 - Perfil de viscosidade das argamassas. ....	98
Figura 55 - Perfil de viscosidade das argamassas aproximado. ....	98
Figura 56 - Aspectos dos concretos produzidos na argamassadeira (A) e na betoneira (B). .	101
Figura 57 - Curva de torque ao longo do processo de mistura do concreto pelos procedimentos avaliados. ....	101
Figura 58 - Ensaio de Slumpflow para o concreto CARM.....	104
Figura 59 - Slumpflow do Concreto CARM6550. ....	105
Figura 60 - Slumpflow final do Concreto CARM5060.....	106
Figura 61 - Slumpflow final do Concreto CARMR5060. ....	107
Figura 62 - Análise estatística das propriedades mecânicas.....	111
Figura 63 - Análise estatística das propriedades físicas dos concretos no estado endurecido. ....	112

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
1.1 COMENTÁRIOS INICIAIS .....	16
1.2 OBJETIVOS .....	18
1.3 JUSTIFICATIVA .....	19
<b>2. CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM AGREGADO RECICLADO .....</b>	<b>20</b>
2.1 BREVE HISTÓRICO E DEFINIÇÕES .....	20
2.2 APLICAÇÕES E VANTAGENS.....	21
2.3 CARACTERÍSTICAS DE AUTOADENSABILIDADE .....	24
2.4 PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO CAA .....	25
2.5 PROPRIEDADES DO CAAR .....	28
2.5.1 Propriedades do concreto fresco.....	29
2.5.2 Propriedades do concreto endurecido.....	30
2.6 MATERIAIS.....	32
2.6.1 Cimento .....	32
2.6.2 Adições Minerais .....	33
2.6.3 Aditivos .....	34
2.6.4 Agregados.....	36
2.7 MÉTODOS DE DOSAGEM DO CAA.....	40
<b>3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>43</b>
3.1 MATERIAIS E MÉTODOS .....	46
3.2 ORIGEM, PROCESSO E GERAÇÃO DO AGREGADO RECICLADO 46	
3.2.1 Resíduo .....	46
3.2.2 Processo e Geração do Agregado Reciclado.....	49
3.3 CARACTERIZAÇÃO .....	53
3.3.1 Distribuição Granulométrica .....	53

3.3.2	Morfologia.....	59
3.3.3	Massa Específica e Porosidade.....	61
3.3.4	Absorção de água dos Agregados.....	65
3.4	FORMULAÇÃO E OBTENÇÃO DO CAA .....	65
3.4.1	Argamassa .....	65
3.4.2	Estudo de quebra.....	73
3.4.3	Composição dos agregados .....	76
3.5	PROPRIEDADES DO CONCRETO .....	77
3.5.1	No estado fresco.....	77
3.5.2	No estado endurecido.....	77
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES.....</b>	<b>79</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	79
4.1.1	Distribuição Granulométrica .....	79
4.1.2	Morfologia dos Agregados.....	85
4.1.3	Massa Específica.....	88
4.1.4	Absorção de Água dos Agregados.....	90
4.1.5	Conclusões.....	90
4.2	FORMULAÇÃO E OBTENÇÃO DO CAA .....	92
4.2.1	Argamassa .....	92
4.2.2	Estudo de quebra.....	100
4.2.3	Composição dos Agregados .....	102
4.2.4	Conclusões.....	107
4.3	PROPRIEDADES DO CONCRETO .....	109
4.3.1	Propriedades no estado fresco .....	109
4.3.2	Propriedades no estado endurecido .....	110
4.3.3	Conclusões.....	112
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>114</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>117</b>

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 COMENTÁRIOS INICIAIS

Na engenharia civil, as vantagens e predominância do uso de materiais cimentícios (grauete, pasta, argamassa, concreto), como material de construção, são conhecidas. O elevado consumo desses materiais, especificamente o concreto, é comparado ao da água (MEHTA; MONTEIRO, 2006). Este alto consumo reflete na elevada extração de recursos naturais (HAWLITSCHKEK, 2014); poluição do meio ambiente, através da geração de CO<sub>2</sub> na fabricação do cimento, e geração de resíduos (ANGULO, 2005). Um quadro, que, apesar de preocupante, tem sido um motivador para o desenvolvimento de diversas pesquisas voltadas para a redução da geração de resíduos e do consumo de recursos naturais e do cimento, assim como para a reciclagem de resíduos (ANGULO, 2000). Nestas pesquisas, tem-se buscado obter concretos especiais e novos materiais cimentícios, e o uso de materiais não convencionais, visando a aplicação de materiais ecoeficientes e sustentáveis, capazes de reverter ou reduzir os reflexos citados.

Concretos especiais, como os autoadensáveis (CAA), têm sido tratados como concretos ambientalmente amigáveis. É comum nas composições dos CAA altas dosagens de resíduos (GOMES; BARROS, 2009). Sua aplicação traz benefícios ao ambiente construtivo, menos consumo de energia, ruídos e danos aos operários, além de garantir uma melhor qualidade da construção, em termos de acabamento, durabilidade e resistência (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008). No entanto, fatores adequados, como distribuição granulométrica dos agregados e dosagem dos aditivos, têm sido decisivos para a obtenção dos CAA. Já os concretos com agregados reciclados têm surgido do apelo à reciclagem dos resíduos produzidos nos diversos setores da indústria da construção civil, especificamente os de classe “A” – resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados dos processos de construção e demolição (CONAMA, 2002).

Sabe-se que a utilização de agregados reciclados em concreto é uma prática em muitos países, e que algumas normas já os especificam como materiais de construção (ANGULO, 2005). No Brasil, esta prática vem sendo incentivada por diversas pesquisas e a norma NBR 15116 (ABNT, 2004), que especifica os requisitos dos agregados reciclados para pavimentação e

concretos sem função estrutural. No entanto, características dos agregados reciclados, como porosidade (absorção, densidade, resistência), granulometria (tamanho de partículas, formas), reatividade (cimentícia, pozolânica, filer) e composição mineralógica (mista, concreto, cerâmica), precisam ser melhores determinadas e avaliadas. Isto é mais ainda necessário quando esses agregados reciclados substituem em total os agregados naturais, e são exigidos para atenderem determinadas propriedades tanto em termos de melhor distribuição de partículas quanto de resistência do material. Para isso, técnicas novas e avançadas, com o uso de equipamentos mais sofisticados, têm sido utilizadas para melhor conhecer as propriedades destes agregados reciclados (ANGULO *et al.*, 2012).

Agregados reciclados, em particular os finos, dependendo da natureza do material e do processo de cominuição aplicado, apresentam granulometrias, formas e propriedades bastante distintas. Além disso, podem apresentar reatividade química quando são derivados de materiais cimentícios (concreto, argamassa), devido à existência de partículas de cimento não hidratadas, ou de partículas finas de material cerâmico com potencial pozolânico (PINTO, 1998 *apud* TENÓRIO, 2007).

Agregados Reciclados de Concreto (AGRC) têm sido utilizados para substituição dos agregados naturais na fabricação de novos elementos construtivos de concreto. Além de possuir composição mineralógica muito próxima das materiais primas utilizadas na produção de concreto, apresentam menor porosidade e forma menos irregular, quando comparados aos materiais cerâmicos (LEVY, 2001 *apud* TENÓRIO, 2007). A diferença básica dos agregados reciclados de concreto (AGRC), quando comparados aos agregados naturais, é a existência de pasta de cimento e argamassa envolta dos agregados naturais, e de agregados de argamassas. Estes são responsáveis pela forma irregular das partículas e pela elevada porosidade, que consequentemente modificam as propriedades no estado fresco e reduzem a resistência mecânica e de durabilidade dos concretos reciclados (FALESCHINI, 2014).

A utilização de agregados reciclados de concreto na composição de Concreto Autoadensável (CAA) é relativamente recente, verificado nos trabalhos de: Grdic *et al.* (2010); Kou e Poon (2009); Girish (2012); Silva (2012); Moreira (2012a); Moreira (2012b); Panda e Bal (2013); Faleschini *et al.* (2014); Carro-López *et al.* (2015); Mendes *et al.* (2015a); Mendes *et al.* (2015b). E verifica-se que, assim como na dosagem de concreto convencional com agregado reciclado, são enfrentadas dificuldades devido às características dos agregados. No entanto, obteve-se êxito na obtenção dos CAA com AGR (CAAR), realizando modificações

necessárias na composição. Além das propriedades de autoadensabilidade, Silva (2012) verificou a redução da massa específica do CAAR, com a utilização de AGR originados de material cerâmico, comprovando a possibilidade de produção do CAAR Leve (CAALR) fazendo uso de AGR, que a depender de sua composição pode apresentar massa específica inferior as dos agregados naturais (ÂNGULO, 2005). Com agregados reciclados de concreto, especificamente agregados originados de blocos de concreto, alguns estudos tem sido iniciado pelo grupo de pesquisa MECOEFIGON/UFAL (GOMES *et al*, 2015), e pelo projeto Casadinho/PROCAD em artigo publicado no IV Congresso Ibero-americano sobre Betão Auto-compactável - BAC (MENDES *et al*, 2015a), onde verificou-se que a utilização destes agregados em concretos promovem a redução da massa específica, abaixo dos 2000 kg/m<sup>3</sup>.

Dentro deste contexto, o presente estudo pretende contribuir para a obtenção de concreto autoadensável leve reciclado (CAALR), com agregados reciclados. Para isso, as diferentes características e a melhor composição dos agregados reciclados, fazendo uso de ferramentas mais práticas e avançadas, serão analisadas visando contribuir na obtenção das propriedades de autoadensabilidade, leveza e resistência à compressão para fins estruturais.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal do estudo é a obtenção do Concreto Autoadensável Leve Reciclado (CAALR), priorizando o atendimento as propriedades de autoadensabilidade, leveza e resistência à compressão para fins estruturais, com  $f_{c28} > 20$  MPa.

Os objetivos específicos propostos no estudo para o alcance do objetivo principal são:

- Avaliar as diferenças entre técnicas caracterização: convencionais, através de ensaios normatizados; e, não convencionais, através de equipamentos específicos de resposta rápida;
- Avaliar a influência da absorção do agregado reciclado na dosagem de superplastificante e água;
- Obter o CAALR a partir da junção das composições de argamassa e dos agregados;
- Avaliar, em argamassas, a influência de diferentes composições granulométricas de agregados reciclados miúdos (AGRM), nas propriedades: fluidez, densidade e reológicas, e selecionar a melhor argamassa que favoreça a obtenção do CAALR;

- Avaliar o desempenho e benefícios do uso de Resíduos de Beneficiamento de Mármore e Granito (RBMG) em substituição do AGRM;
- Obter as propriedades de autoadensabilidade do CAALR com superplastificantes e finos de resíduos, sem o uso de outros aditivos químicos, como modificadores de viscosidade e incorporadores de ar;
- Avaliar a integridade do agregado reciclado e o comportamento da mistura de concreto em diferentes misturadores;
- Verificar o atendimento do CAALR aos parâmetros de autoadensabilidade e resistência mecânica, para se justificar sua aplicação como concreto autoadensável para fins estruturais.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

O concreto autoadensável leve reciclado, denominado de CAALR, trata-se de um concreto especial e relativamente novo, que apresenta características de autoadensabilidade, leveza e ambientalmente amigável. A questão ambiental provém da substituição dos agregados naturais por agregados reciclados, beneficiando o meio ambiente e reduzindo o impacto ambiental causado pelos resíduos da construção civil. A leveza advém dos agregados reciclados utilizado no estudo, considerando que alguns agregados reciclados são mais porosos e menos densos que outros, como por exemplo, os de blocos de concreto, proporcionando concretos menos pesados, diminuindo o peso dos elementos e facilitando, no caso de pré-fabricados, o manuseio e o transporte. Já a autoadensabilidade, advém da ação conjunta do superplastificante, finos (fíler do agregado reciclado ou de outros resíduos) e da composição dos agregados reciclados, proporcionando ao concreto alta fluidez e viscosidade moderada, facilitando a aplicação do concreto, com menos consumo de energia e maior rapidez de concretagem.

Portanto, trata-se do estudo um concreto de caráter inovador e de avanço tecnológico, que se justifica pelos motivos indicados neste item, e que pode ser aplicado na fabricação de elementos estruturais pré-moldados ou moldado *in loco*.

## 2. CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM AGREGADO RECICLADO

### 2.1 BREVE HISTÓRICO E DEFINIÇÕES

No início da década de 80, o problema de durabilidade das estruturas de concreto do Japão estava em alta. A falta de mão de obra qualificada na construção civil estava levando a vários defeitos nas estruturas de concreto armado, principalmente decorrente da ineficiência do processo de adensamento. Como o grau de compactação do concreto é o grande responsável na obtenção de estruturas duráveis, a solução encontrada foi o desenvolvimento de um concreto com a capacidade de se autoadensar sobre o peso próprio, sem a necessidade de vibração (OKAMURA e OUCHI, 2003).

Diante disso, Hajime Okamura, professor da Universidade de Tóquio, desenvolveu o Concreto Autoadensável (CAA) em 1986, que tinha a capacidade de preencher adequadamente todos os espaços da fôrma sem necessidade de aplicação de forças externas (adensamento), o espalhamento era devido, apenas, a ação da gravidade (GOMES e BARROS, 2009).

O CAA é considerado o desenvolvimento mais revolucionário na construção em concreto das últimas décadas (EFNARC, 2002; GOMES e BARROS, 2009). O primeiro protótipo foi finalizado em 1988, em Ozawa no Japão, desenvolvido com os materiais comumente comercializados. Na Figura 1 está apresentado o primeiro protótipo, pode-se observar que para obter as propriedades de autoadensabilidade o CAA apresenta maior quantidade de pasta e menor consumo de agregados na composição, comparado com o concreto convencional, além da utilização do aditivo superplastificante (OKAMURA; OUCHI, 2003).

**Figura 1 - Primeiro protótipo do CAA.**

CONCRETO AUTOADENSÁVEL (Aditivo Superplastificante)				
AR	ÁGUA	FINOS	AREIA	PEDRA
CONCRETO CONVENCIONAL				
AR	ÁGUA	CIMENTO	AREIA	PEDRA

Fonte: Okamura e Ouchi, 2003.

Desde então, em vários países tem sido identificados estudos em torno do CAA, a fim de difundir a sua utilização. Assim, vários congressos, simpósios e até eventos específicos, em torno deste material, tem sido verificados, o que demonstra interesse de pesquisadores (MELO, 2005).

O objetivo inicial do CAA era compensar a falta de mão de obra qualificada, que vinha prejudicando a durabilidade das estruturas de concreto armado. Mas, o CAA mostrou que pode ser benéfico economicamente – pela redução o número de processos construtivos, mão de obra, energia, etc – e ambientalmente – pela eliminação do ruído produzido pelo processo de adensamento por vibração, a capacidade de utilização de resíduos industriais como adição mineral (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008; GOMES; BARROS, 2009).

Além dos resíduos de industriais, a utilização de agregado reciclado também pode ser tratada como ambientalmente benéfica, pela redução de resíduos de construção, demolição e reforma. O processo de tratamento do resíduo (britagem) para produção de agregado reciclado, geralmente, gera grande quantidade de finos. Estes podem ser utilizados para aumento do volume de pasta do CAA, muito necessário para a obtenção das propriedades de autoadensabilidade.

O Concreto Autodensável com Agregado Reciclado (CAAR) pode ser definido com um concreto de alto desempenho, unindo as características do CAA no estado fresco (elevada fluidez, coesão e autocompactação) com a utilização do agregado reciclado (AGR), preocupando-se com o desenvolvimento sustentável. Como apresentado anteriormente, trata-se de um material recente, mas com uma quantidade relativa de trabalhos, observando-se, assim, que o CAAR é muito promissor, principalmente no contexto atual de sustentabilidade.

## 2.2 APLICAÇÕES E VANTAGENS

Existe a necessidade das empresas atentarem para utilização do CAA, devido às vantagens de sua aplicação, que reduzem o custo final e aumentam a durabilidade das edificações. Além disso, tanto as construtoras quanto as concreteiras não necessitam de qualquer tipo de investimento inicial para aplicação do CAA (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

No Brasil, muitas aplicações de CAA já foram verificadas em indústrias de pré-moldados, em produção de estruturas *tilt up*, pré-moldados moldados *in loco*, e concreto para estruturas convencionais moldadas *in loco* (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008; FARIA, 2008).

Faria (2008) verificou que a utilização de CAA possibilitou a redução em 2h no tempo de concretagem de um pavimento de 250 m<sup>2</sup>, com lajes e vigas, em uma edificação residencial. Houve redução do número de trabalhadores como lançadores, espalhadores e acabadores, e eliminando os vibradores, havendo a redução do custo de mão de obra por m<sup>3</sup> concretado, mais encargos, de R\$ 7,18/m<sup>3</sup>, com o uso do concreto convencional, para R\$ 0,70/m<sup>3</sup>, com o uso de CAA.

Tutikian e Dal Molin (2008) acompanharam a substituição do concreto convencional pelo CAA em uma indústria de pré-moldado. Foi verificada uma redução do custo global (materiais, mistura, transporte, lançamento, adensamento, acabamento e reparo), onde a utilização do concreto convencional apresentou custo de R\$ 216,89/m<sup>3</sup>, superior ao do CAA, que custou R\$ 210,19/m<sup>3</sup>.

O CAAR é um material relativamente recente, com pouco tempo de desenvolvimento, menos que uma década. Desta forma, não foi verificada nenhuma aplicação realizada. No entanto, concreto com agregado reciclado ou concreto reciclado (CAR) apresenta inúmeras aplicações. Segundo Hansen (1999), nos Estados Unidos o CAR tem sido utilizado para pavimento rígido, fundações de prédios e pontes, calçadas e concreto estrutural. Kotrayothar (2012) verificou a aplicação de CAR na Austrália, constatando o seu emprego em passeios e ciclovias, com resistência de até 30 MPa. No Brasil, a utilização do AGR ainda é muito limitada, sendo mais utilizados em pavimentação.

Como visto no histórico, o CAA tinha como objetivo inicial a produção de estruturas mais duráveis, sem a interferência da mão de obra no processo adensamento. No entanto, outros benefícios foram obtidos, como apresentados a seguir.

#### Redução dos custos com a execução das estruturas

Devido a sua capacidade de se autoadensar pela ação do peso próprio, não há a necessidade de adensamento com vibração, ou outro. Desta forma, pôde-se reduzir a quantidade de mão de obra, energia elétrica e tempo, que eram necessários para realização desta tarefa (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

O aumento do consumo de pasta melhora o acabamento superficial das estruturas de concreto, havendo a redução e/ou eliminação da necessidade de aplanamento e outros eventuais acabamentos, que demandam, principalmente, horas de mão de obra. De maneira geral, todos estes aspectos apresentados culminam em ritmo de obra mais acelerado e com menos mão de obra (NUNES, 2001).

#### Flexibilidade do projeto estrutural

No dimensionamento das estruturas de concreto armado, além dos aspectos relacionados com a resistência aos esforços mecânicos solicitantes, deve-se verificar a exequibilidade da estrutura. A disposição das armaduras é de fundamental importância, que depende basicamente da habilidade passante do concreto, influenciada pelo diâmetro máximo do agregado e da abertura necessária para passagem da agulha de vibração por imersão (NUNES, 2001).

A capacidade de se autoadensar, sob a ação do peso próprio, elimina a necessidade de verificar espaçamento da passagem da agulha de vibração, no entanto, deve-se atentar no espaçamento entre as barras e diâmetro máximo do agregado, para que não ocorra bloqueio. O diâmetro máximo do agregado graúdo, comumente utilizado no CAA, é limitado a 20 mm (GOMES; BARROS, 2009). Além disso, o teor de agregado graúdo é reduzido, para evitar a segregação e bloqueio. Desta forma, o projeto estrutural apresenta maior flexibilidade no espaçamento entre as barras e formas das estruturas.

#### Redução de impactos ambientais

A eliminação do processo de vibração, tanto na aplicação *in loco* quanto nas indústrias de pré-moldados, reduz os problemas com a vizinhança e riscos da exposição dos trabalhadores ao ruído. No que diz respeito a ser um material ambientalmente amigável, pode-se citar a incorporação de resíduos industriais em sua composição, geralmente, utilizados como adição mineral (GOMES; BARROS, 2009). Além disso, como apresentado anteriormente, muitos estudos experimentais, na utilização de AGR no CAA, têm sido produzidos por vários pesquisadores, em substituição ao agregado natural.

#### Acabamento superficial e durabilidade

Devido ao seu excelente acabamento superficial e capacidade de se autoadensar, ocupando todo o espaço da fôrma, sem segregação, não existe a necessidade de custos com reparos. A

compacidade obtida pelo CAA, devido ao autoadensamento, e o grande teor de finos aumentam a durabilidade das estruturas (NUNES, 2001).

## 2.3 CARACTERÍSTICAS DE AUTOADENSABILIDADE

Segundo a normalização brasileira vigente, o CAA pode ser definido como:

[...] concreto com a capacidade de fluir, autoadensar pelo peso próprio, preencher todo o espaço da fôrma e passar por embutidos (armaduras, dutos e insertos), mantendo, ao mesmo tempo, a sua homogeneidade (ausência de segregação) nas etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento (ABNT, 2010).

Para isto, o CAA precisa apresentar simultaneamente: fluidez, habilidade passante e resistência à segregação, caso contrário, não poderá ser considerado autoadensável.

A habilidade passante é a característica que o concreto tem de passar pelas armaduras sem obstrução de fluxo ou segregação, também pode ser explicada pela coesão necessária para o escoamento entre as barras sem comprometer a mistura (ABNT, 2010). A granulometria do agregado graúdo influencia na habilidade passante e na coesão do concreto. Gomes e Barros (2008) recomendam que o diâmetro máximo dos agregados graúdos seja escolhido em função da abertura entre as armaduras.

A NBR 15823 (ABNT, 2010) apresenta algumas propriedades a serem avaliadas para determinação que um concreto é autoadensável:

### Habilidade de preenchimento ou fluidez

É a capacidade do concreto de fluir dentro da fôrma e preencher todos os vazios, apenas devido ao peso próprio, mantendo a homogeneidade da mistura. Obtida com a utilização de aditivos superplastificante, principalmente de terceira geração (MELO, 2005), tomando-se cuidado com a segregação e exsudação, geralmente controlada pela quantidade de finos. Os aditivos de terceira geração, à base de policarboxilatos, são mais utilizados por apresentarem maior poder de desaglomeração das partículas de cimento.

### Resistência à segregação

Capacidade de se manter coeso durante as etapas de transporte, lançamento e acabamento. A coesão está ligada à viscosidade, quanto mais viscosa a mistura, mais coesa e melhor a

capacidade manter as partículas de agregados em suspensão. A coesão pode ser obtida com o aumento de adições minerais, com granulometrias muito finas e/ou aditivos promotores de viscosidade (GOMES e BARROS, 2009).

Quando a mistura apresenta baixa viscosidade, existe a grande possibilidade da argamassa não conseguir sustentar os agregados graúdos dentro da mistura, havendo um estado de segregação, devido ao efeito de sedimentação dos agregados graúdos, devido ao seu peso. Quando utilizados agregados graúdos são leves (argila expandida ou agregado reciclado de baixa densidade, por exemplo), eles tendem a emergir, havendo segregação da mesma forma.

#### Viscosidade plástica aparente

É um parâmetro indicativo da facilidade de um fluido escoar continuamente sob a ação de uma tensão de cisalhamento externa (PANDOLFELLI *et al.*, 2000), no caso no CAA sob a ação da tensão gerada pelo peso próprio. Quanto maior a viscosidade do concreto, maior a sua resistência ao escoamento. O aumento da viscosidade pode ser alcançado com fatores a/c baixos, grande quantidade de finos e fazendo uso de promotores de viscosidade.

#### Habilidade Passante

É a capacidade que o concreto tem de passar por embutidos sem que haja. Ela está ligada a proporção de agregado miúdo/agregado graúdo da mistura, no diâmetro máximo dos agregados e no volume e viscosidade da pasta. As partículas de agregado graúdo devem ficar bem revestidas por argamassa, reduzindo o efeito de arco que causa bloqueio em abertura estreitas (GOMES e BARROS, 2009).

## 2.4 PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO CAA

Segundo Banfill (2003), a reologia é ciência que estuda a deformação e o fluxo da matéria, a ênfase no fluxo está ligada a relação entre tensão, deformação, taxa de deformação e do tempo. As principais características reológicas do CAA são nominalmente a tensão de escoamento ( $\tau_0$ ) e a viscosidade plástica ( $\mu$ ). A tensão de escoamento consiste na tensão de cisalhamento mínima necessária para que o escoamento se inicie, e está relacionada ao estado de floculação ou dispersão das partículas (MELO, 2005).

Concretos plásticos são capazes de se manter uma determinada forma sem fluir no estado fresco, sob a ação do seu peso próprio, sem necessitar de suporte durante o processo de desenvolvimento de resistência e rigidez. Assim, seu comportamento se assemelha a um sólido, em baixo estado de tensão. Desta forma, a análise mais simples envolvendo este material é o modelo de Bingham, onde o material pode ser considerado sólido em baixas tensões de cisalhamento ( $\tau$ ), inferiores a tensão de escoamento, mas em tensões de cisalhamento altas, ele escoava como um fluido (BANFILL, 2003). O modelo de Bingham é linear, representado pela Equação 1, que relaciona a tensão de cisalhamento com a taxa de cisalhamento ( $\gamma$ ), onde a viscosidade é a inclinação da reta.

$$\tau = \tau_o + \mu \cdot \gamma \text{ Equação 1}$$

O CAA não segue o modelo linear descrito por Bingham, devido à sua capacidade de se autoadensar sob o peso próprio, apresenta tensão de escoamento menor e viscosidade moderada, comparado ao concreto convencional, que apresenta alta tensão de escoamento e baixa viscosidade (GOMES; BARROS, 2009).

No entanto, o cálculo da tensão de escoamento utilizando a Equação de Bingham, para o CAA, resultará em um valor negativo (FERRARIS *et al.*, 2001). Assim, o modelo de Herschel-Bulkley, descrito pela Equação 2, é mais adequado para descrever suspensões fluídas (DE LARRARD *et al.*, 1998, *apud* FERRARIS *et al.*, 2001). Este modelo relaciona a tensão de cisalhamento com a taxa de cisalhamento baseado em uma função potencial. Os parâmetros  $a$  e  $b$  são novas características que descrevem o comportamento do concreto. A viscosidade neste caso não pode ser obtida diretamente.

$$\tau = \tau_o + a \cdot \gamma^b \text{ Equação 2}$$

Contudo, os concretos necessitam ser definidos por dois parâmetros, pois ele apresenta resistência inicial ao escoamento e viscosidade plástica, que governa o escoamento após o seu início do escoamento, característicos do modelo de Bingham. Assim, alguns autores consideram a aplicação da equação de Bingham, para determinar os parâmetros do CAA (MELO, 2005; GOMES; BARROS, 2009).

Os ensaios realizados para determinação dos parâmetros de fluidez dos concretos fazem análises pontuais (*Slumpflow* e Funil V, por exemplo), no entanto, a aplicação dos reômetros

para caracterização consegue descrever melhor o comportamento dos concretos fluídos (CASTRO, *et al.*, 2011).

A grande dificuldade de avaliação das propriedades reológicas do concreto no estado fresco é devida as grandes partículas de agregados que compõem a mistura, o que impossibilita a utilização de reômetros mais simples, como o viscosímetro. Mesmo existindo reômetros de dimensões suficientemente grandes para a utilização da quantificação reológica, eles ainda não são muito difundidos devido ao elevado custo e complexidades (MELO, 2005).

Assim, vários autores da literatura optaram por realizar estudos reológicos em pasta e argamassas através de viscosímetros e encontraram relação da reologia dessas misturas cimentícias com a reologia do concreto. Castro *et al.* (2011) citam que como a pasta de cimento envolve os agregados no concreto, as propriedades reológicas do concreto podem ser relacionadas com aquelas da pasta, no entanto, devido à complexidade de ambas as misturas, nem sempre haverá esta correlação. Inúmeros fatores podem influenciar os parâmetros reológicos do CAA, no Quadro 1 estão apresentados alguns destes fatores.

**Quadro 1 - Fatores que influenciam as propriedades reológicas do CAA**

<b>FATORES</b>	<b>TENSÃO DE ESCOAMENTO</b>	<b>VISCOSIDADE PLÁSTICA</b>
Alto teor de água	Redução	Redução
Alto teor de agregado	Aumento	Aumento
Superplastificante	Redução	Sem efeito
Cimento	Aumento	Aumento
Adições Minerais	Redução	Aumento
Distribuição granulométrica ampla	Redução	Redução
Partículas mais esféricas	Redução	Redução

Fonte: Banfill (2003).

Banfill (2003) apresenta valores típicos de tensão de escoamento e viscosidade, para pastas, argamassas e CAA:

- Pastas:  $\tau_0=10$  a 100 Pa,  $\mu=0,01$  a 1 Pa.s;
- Argamassas:  $\tau_0=80$  a 400 Pa,  $\mu=1$  a 3 Pa.s;

- CAA:  $\tau_0=50$  a 200 Pa,  $\mu=20$  a 100 Pa.s;

No entanto, existe dificuldade em estabelecer uma padronização de valores dos parâmetros reológicos, que estabeleçam faixas adequadas para misturas autoadensáveis. Diferentes equipamentos e geometria ou *spindle*, aplicados a mesma composição podem gerar resultados diferentes, mesmo verificando a mesma tendência de comportamento. Logo, deve-se atentar para a escolha e utilização do equipamento para medição destes parâmetros.

Os ensaios padronizados para determinação dos parâmetros de autoadensabilidade, ou reológicos como apresentados por vários autores, como os estabelecidos pela NBR 15823 (ABNT, 2010), por exemplo, possibilitam melhor comparação entre os resultados obtidos entre misturas. Apresentam custo mais acessível, de fácil obtenção para qualquer laboratório ou obra que deseja fazer uso do CAA. Assim, estes ensaios têm sido muito utilizados nas produções científicas.

## 2.5 PROPRIEDADES DO CAAR

A utilização do AGR tem sido estimulada com o intuito de redução dos resíduos da construção civil, que causam diversos problemas ambientais, sociais e econômicos, devido à deposição em locais inadequadas e a necessidade de grandes áreas para armazenamento. A reutilização e reciclagem se faz necessária para redução destes impactos.

Mas, a utilização do AGR gera gastos, devido ao processo de geração destes agregados a partir do resíduo – processo de britagem, peneiramento, lavagem, separação por densidade, etc – e na utilização de outros materiais (cimento, adições minerais e aditivos) para que o concreto obtenha as propriedades no estado fresco e endurecido requeridas.

Como já foram apresentadas, as características dos AGR são influenciadas, basicamente, pelo tipo de resíduo a partir do qual ele foi originado, composição química e mineralógica e o processamento. A depender das características dos AGR, estas irão influenciar de maneira mais intensa ou menos intensa nos concretos.

As alterações causadas pelo AGR nas propriedades dos concretos convencionais, nos estados fresco e endurecido, tem sido estudadas por vários anos. No entanto, não existem tantos estudos desenvolvidos acerca da avaliação do AGR na produção de CAA, por se tratar e

material recente. Logo, a seguir serão abordadas algumas das propriedades de concretos gerais, com agregados reciclados.

## 2.5.1 Propriedades do concreto fresco

### 2.5.1.1 Massa Específica Aparente

O tipo de resíduo utilizado influencia diretamente na massa específica aparente dos concretos. Como apresentado, os agregados reciclados que apresentam baixa massa específica, tendem a possuir maior porosidade e capacidade de absorver água, como é o caso dos agregados derivados de materiais cerâmicos, de argamassa e pasta de cimento (ÂNGULO, 2000).

Assim, o agregado reciclado tende a reduzir a massa específica do concreto no estado fresco, em relação aos concretos com agregados naturais. Os vazios existentes, nem sempre são ocupadas pela pasta, sendo incorporados ao concreto produzido, conferindo-lhe menor massa específica, podendo chegar a valores inferiores a  $2000 \text{ kg/m}^3$ , caracterizando-se como concreto leve (LEITE, 2001 *apud* LATTERZA, 1998; MACHADO Jr., 1999). Este efeito foi observado por Silva (2012), em seu estudo de CAA com Agregado Reciclado de Telha Cerâmica.

### 2.5.1.2 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade do CAR é uma das propriedades mais afetadas pelo uso de agregados reciclados, apresentando, de maneira geral, menor índice de consistência, quando comparado ao concreto com agregados naturais. Isto se deve as características dos agregados reciclados: formato anguloso, textura superficial mais áspera e alta absorção (LEITE, 2001; TENÓRIO, 2007). A utilização de água e/ou aditivo se torna imprescindível para promover melhoria da trabalhabilidade.

Como apresentado, a porosidade dos agregados reciclados está relacionada com a absorção de água. Desta forma, agregados provenientes do resíduo de agregados naturais geralmente apresentam menor absorção de água com relação aos demais tipos de resíduos (argamassa, pasta e cerâmica), por apresentam porosidade muito ínfima. Assim, quanto mais poroso o agregado, o efeito de perda de trabalhabilidade será mais observado.

Vários autores citam a utilização da pré-molhagem do agregado reciclado, como forma de impedir que este absorva a água de amassamento da mistura, e assim, a perda de trabalhabilidade (LEITE, 2001). No entanto, a depender do tipo de agregado, o tempo que o

mesmo leva para absorver tal quantidade de água pode variar, podendo ocorrer o aumento da água da mistura, aumento da porosidade da pasta e gerando água na interface da zona de transição, reduzindo a resistência do concreto.

Para reduzir o efeito da alta absorção de água, alguns autores citam a aplicação de tratamentos superficiais para reduzir a porosidade. A aplicação de pasta de cimento sobre os agregados tem sido estudada como forma de para reduzir a porosidade. Verificou-se que sua aplicação resultou na redução da absorção dos agregados, aumento da massa específica aparente, aumento da resistência e o aumento de resistência à compressão dos concretos produzidos (ZHIHUI *et al.*, 2013).

A utilização de fíler nas misturas de CAR, com AGR em substituição parcial ou total do agregado natural, reduz o efeito da perda de abatimento, verificada por muitos autores, geralmente justificada pelo alto teor absorção de água do AGR (LIMBACHIYA *et al.*, 1998).

Devido à grande utilização de materiais finos (adições minerais) e aditivos superplastificantes, os estudos de CAAR não têm se verificado muitos problemas em obterem-se os parâmetros de autoadensabilidade, desta forma, o efeito da absorção dos agregados pode ser considerado desprezível (MOHITKAR; MODANI, 2015). No entanto, alguns problemas podem ser verificados no uso de alto teor de substituição de areia natural por agregado reciclado miúdo (AGRM), na obtenção dos parâmetros de autoadensabilidade, e no tempo de manutenção destes, devido ao efeito da absorção, principalmente em tempos superiores a 45 min (CARRO-LÓPES *et al.*, 2015).

## 2.5.2 Propriedades do concreto endurecido

Em comparação com misturas de concreto com agregados naturais, as misturas contendo agregado reciclado de concreto apresentaram, na maioria das vezes, resistências inferiores. A depender do tipo de agregado e do teor de substituição dos agregados naturais, por eles, este efeito pode ser atenuado.

### 2.5.2.1 Resistência à Compressão

A resistência à compressão do concreto é o principal controle de qualidade para os engenheiros. Existe uma relação inversa entre a resistência e a porosidade, assim, por ser um material de várias fases, a porosidade de cada componente se torna um fator limitante (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

A compactidade do concreto é um dos pontos mais importantes para obtenção de resistência mecânica e durabilidade. A utilização de AGR, principalmente os que apresentam elevada porosidade irão causar a redução da resistência, tornando um fator limitante (TENÓRIO, 2007).

Carro-López *et al.* (2015) verificaram redução da resistência a compressão dos CAAR, com AGR miúdo em substituição em mais de 20% da areia natural. Mohitkar e Modani (2015) verificaram este efeito com menor intensidade, mesmo com a substituição 100% da pedra natural pelo agregado reciclado graúdo (AGR<sub>G</sub>). De maneira geral, verifica-se uma tendência de redução da resistência do CAAR com o aumento da quantidade de agregados reciclados.

#### 2.5.2.2 Resistência à Tração

A resistência do concreto à tração é, geralmente, influenciada pelas características da matriz cimentícia e da zona de transição (BUTTLER, 2003). Devido à superfície áspera e irregular das partículas, hipoteticamente, o agregado reciclado favoreceria a resistência à tração do concreto, pois tendem a reter grande quantidade de partículas de cimento em sua superfície, resultando em uma excelente aderência entre agregado e a pasta.

Mohitkar e Modani (2015) verificaram que o aumento do teor do agregado graúdo natural por AGR graúdo resultaram na redução uma redução moderada da resistência à tração do CAAR, apresentando diferença de 1 MPa, entre o sem substituição e o com substituição de 100%. Panda e Bal (2013) também verificaram este efeito.

Sou e Poon (2009) conseguiram combater a redução da resistência à tração e à compressão a utilização de cinza volante (outro resíduo industrial), aumentando tanto a resistência à tração, quanto à compressão, fazendo de 100% de AGR na composição do concreto.

#### 2.5.2.3 Módulo de Elasticidade

Os valores de módulo de elasticidade são utilizados no cálculo de estruturas de concreto, geralmente estimados por expressões empíricas, que assume a dependência direta com a resistência e a densidade do concreto. Onde os três componentes do concreto – pasta de cimento, agregado e zona de transição – estão relacionados com a resistência do concreto, levando em consideração as suas resistências individuais e do conjunto (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Pode-se notar que o módulo de elasticidade do agregado está diretamente relacionado com a sua porosidade, ele controla a capacidade do agregado de restringir as variações de volume de matriz. Agregados densos tem alto módulo de elasticidade, assim, grandes quantidades destes agregados na composição do concreto resultarão em alto módulo de elasticidade (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Em termos de concreto convencional, Tenório (2007) verificou que concretos com AGR de concreto, que apresentam grande quantidade de rocha natural na composição dos agregados, apresentaram valores de módulos de elasticidade semelhantes aos concretos com agregados naturais de mesmas resistências. Observando-se que a influência da quantidade de rochas natural, explicando assim o fato de se constatar valores de módulos de elasticidade próximos.

Da mesma forma, Latterza (1998, *apud* LEITE, 2001) não observou grande variação dos valores obtidos do módulo de elasticidade dos concretos com agregado reciclado em substituição parcial ou total dos agregados naturais. Ele explica que isto pode ser devido à penetração da pasta nos poros superficiais dos agregados reciclados, o que garantiu uma melhor interação entre pasta e agregado.

No entanto, Moreira (2012) verificou que o módulo de elasticidade do CAAR decresceu suavemente com o aumento da porcentagem de substituição dos agregados naturais por reciclados. Vale ressaltar, que a literatura (MELO, 2005) verifica menor módulo de elasticidade em CAA devido à redução da quantidade de agregados graúdos presentes.

## 2.6 MATERIAIS

Os materiais utilizados na composição do CAA é basicamente os mesmos dos concretos convencionais – cimento, agregados e água. No entanto, devido aos parâmetros de fluidez exigidos, existe a necessidade de utilização de aditivos e adições minerais.

### 2.6.1 Cimento

Os cimentos utilizados na produção do CAA podem ser os mesmo utilizados nos concretos convencionais, sendo as mesmas as prescrições normativas referentes à durabilidade e aos usos adequados (TUTIKIAN; DALMOLIN, 2008). Segundo Gomes e Barros (2009), a escolha do cimento irá depender das especificidades da aplicação.

A dosagem típica de cimento para o CAA é de 350-450 kg/m<sup>3</sup>, tomando-se cuidado na utilização em quantidade superior a 500 kg/m<sup>3</sup> pode elevar o calor de hidratação gerada, aumentando a possibilidade de fissuração por retração. Na utilização de quantidade inferior a 350 kg/m<sup>3</sup> deve-se utilizar de adições minerais, como: fíleres, cinza volante, pozolana e etc (EFNARC, 2002).

Melo (2005) cita que as principais características que deve ser levadas em consideração na escolha do cimento é a superfície específica e a capacidade de adsorção de aditivo superplastificante. Quanto maior a superfície específica, menor a tensão de escoamento e maior a viscosidade da mistura, devido ao aumento da quantidade de partículas em contato com a água, diminuindo a distância e aumentando a frequência de colisão entre elas (NEVILLE, 1997 apud MELO, 2005). Jolicoeur e Simard (1998, apud MELO, 2005) citam a adsorção do aditivo pelo cimento se dá nos aluminatos (C<sub>3</sub>A e C<sub>4</sub>AF) por isso recomenda-se emprego de cimentos com quantidade moderada.

Deve-se evitar o uso de cimento com teores de C<sub>3</sub>A acima de 10%, que podem resultar em perda rápida de fluidez, prejudicando a aplicação do CAA em obras correntes. Quanto menor o teor de C<sub>3</sub>A, mais fácil o controle da perda de trabalhabilidade e reologia (TUTIKIAN; DALMOLIN, 2008; EFNARC, 2002).

### 2.6.2 Adições Minerais

Como apresentado anteriormente, um dos pontos fortes do CAA é a elevada resistência à segregação entre os eventos de transporte, lançamento e acabamento. Isto se deve a coesão da mistura, garantida pela utilização de adições minerais e/ou aditivo modificador de viscosidade (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

As adições minerais também desempenham papel importante na reologia, melhorando e aumentando o tempo de trabalhabilidade. A sua utilização também permitem a redução do consumo de cimento e na redução do calor de hidratação e a retração (EFNARC, 2002).

As adições podem ser classificadas quanto a sua ação no concreto, como: inertes e reativas. Adições inertes, também são chamadas de adições sem atividade química. Seu maior efeito na mistura é o efeito físico, principalmente preenchendo os vazios existentes entre os agregados, sendo o caso de fíler calcário, pó de quartzo, resíduo do beneficiamento de mármore de granito – RBMG (LISBÔA, 2004). Já as reativas, ou adições quimicamente ativas,

contribuem com a formação de produtos hidratados, divididas em: pozolanas – metacaulim, cinza da casca de arroz, sílica ativa, cinza volante com baixo teor de cálcio; cimentantes – escória de alto forno; e, pozolânicas cimentantes – cinza volante com alto teor de cálcio (MELO, 2005).

O efeito físico das adições minerais pode ser dividido em três partes: efeito fíler, o aumento da compacidade da mistura através do preenchimento de vazios existentes pelas pequenas partículas de adição; refinamento da estrutura de poros e dos produtos de hidratados do cimento, através dos sítios de nucleação formados pelas partículas de adição; e, na zona de transição, reduzindo ou eliminando a existência de água livre retida sobre os agregados (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Já o efeito químico ocorre a partir da capacidade da adição de reagir com o hidróxido de cálcio, que ocupa os espaços vazios existentes na pasta e na zona de transição, aumentando a resistência mecânica e a durabilidade do concreto (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

### 2.6.3 Aditivos

Os aditivos químicos utilizados na produção do CAA devem respeitar as exigências normativas disponíveis. Os aditivos mais utilizados são os superplastificante e os modificadores de viscosidade, o primeiro devido da sua capacidade de dispersão das partículas promovendo maior fluidez da mistura, o segundo devido a sua capacidade de aumentar a coesão e viscosidade, prevenindo a segregação e exsudação. Outros aditivos também são utilizados, no entanto em menor quantidade e para aplicações mais específicas, como: incorporadores de ar, aceleradores e retardadores de pega (MELO, 2005; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008; GOMES; BARROS, 2009;).

#### Aditivo Superplastificante

O aditivo superplastificante (SP) está dentro da classe dos aditivos redutores de água, ele pode ser dividido em tipo I e tipo II. O tipo I apresenta base química contendo sais condensados de naftaleno sulfonato ou melamina sulfonato, ambos os produtos sintéticos obtidos através de polimerização. Já o tipo II, apresenta base química de policarboxilatos-poliéteres, que diferentemente das bases do tipo I, pode se apresentar de diferentes maneiras, a depender a aplicação requerida, tais como: comprimento de cadeia molecular e a frequência, o tamanho e composição das cadeias laterais anexadas à cadeia principal (GOMES; BARROS, 2009).

Os SP do tipo I, também são conhecidos como de segunda geração, que permitem a redução da água da mistura em até 25%. Já os SP do tipo II, são denominados de terceira geração e permitem até 40% da água da mistura. A redução de água é devida ao aumento de fluidez possibilitado pela ação destes aditivos. No entanto, os mais eficientes e utilizados na produção de CAA são os aditivos SP de terceira geração (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Segundo Gomes e Barros (2009), a ação dos SP tem sido estudada, no entanto, os fenômenos acarretados por eles não são totalmente compreendidos, como as interações com outros aditivos e mudança das propriedades reológicas do concreto. Banfill (2003) cita que os SP podem apresentar ação espetacular, mas às vezes, seus efeitos na reologia de sistemas cimentícios podem ser imprevisíveis.

O modo de ação do SP é dado através da repulsão eletrostática e/ou estérica das partículas, sendo no SP de terceira geração a repulsão estérica o modo de ação mais importante. Em ambos os casos, as moléculas de aditivo são adsorvidas pela superfície das partículas de cimento, possibilitando a liberação da água aprisionada nos aglomerados de partículas, gerados a partir de forças de atração de Van der Waals, ocasionadas pela hidratação do cimento. A água liberada reduz a viscosidade da mistura, e as cadeias de aditivos adsorvidas na superfície das partículas promovem a desaglomeração e dispersão, havendo assim o aumento de fluidez. A repulsão estérica é o modo mais eficiente de repulsão dos grãos. As longas cadeias laterais de policarboxilatos, presente nos SP de terceira geração, atuam como uma barreira física, impedindo o contato e o efeito de floculação (RONCERO, 2000 *apud* MELO, 2005).

#### Aditivo Modificador de Viscosidade

Os VMA são polímeros solúveis em água utilizados em concretos e argamassas para alteração das propriedades reológicas. Os utilizados na produção de CAA são geralmente a base de polissacarídeos naturais solúveis em água (Xanthan gum, Guar gum, Welan gum, entre outros), copolímeros de estireno com grupos carboxílicos e polieletrólitos sintéticos (GOMES; BARROS, 2009) com cadeias poliméricas de alto peso molecular ou de base orgânica (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

São geralmente utilizados quando o teor de finos do concreto é limitado, com a função de aumentar a viscosidade para garantir a coesão da mistura e a resistência à segregação (MELO, 2005). Suas cadeias poliméricas incorporam e adsorvem água, aumentando de volume e

entrelaçando-se, formando uma rede de retenção de água, suspendendo os grãos. Assim, aumentando a viscosidade da pasta e evitando a exsudação da pasta e segregação dos agregados (REPETTE, 2005 *apud* KRAUS, 2006).

#### 2.6.4 Agregados

Basicamente, os agregados para a produção do CAA devem atender as mesmas exigências normativas dos utilizados no concreto convencional. As características dos agregados são avaliadas pela normalização brasileira de agregados para concreto, NBR 7211(ABNT, 2009). Este norma é válida para agregados de origem natural, fragmentados naturalmente (areia) ou por processo de britagem (pedra britada).

No entanto, o uso de agregados reciclados para produção de concreto requer adaptações, pois não existe norma brasileira específica para sua caracterização. Assim, muitos pesquisadores tem feito o uso dos mesmos ensaios presentes na NBR 7211(ABNT, 2009), para determinação das características dos agregados reciclados. Algumas limitações são verificadas, na aplicação destes métodos, devido às diferenças presentes entre os agregados naturais e reciclados.

Independentemente da origem dos agregados, algumas características devem ser levadas em consideração, no momento de realizar a dosagem do concreto, pois elas afetam drasticamente o desempenho da mistura no estado fresco, principalmente se tratando de CAA, e também no estado endurecido.

Os agregados de origem natural apresentam características que podem dificultar as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido, mas, em menor proporção, quando comparado ao AGR. As características e qualidade do AGR irão depender da origem do resíduo proveniente, da composição química e mineralógica, porosidade e processamento.

A seguir serão apresentadas as características dos agregados reciclados que influenciam no desempenho dos concretos.

##### Morfologia e textura superficial

A morfologia e a textura superficial do agregado influência todos os tipos de concreto, no estado fresco e endurecido. Estas características são fortemente influenciadas pela natureza do material – rocha ou resíduo de origem – e pelo processo de desgaste para sua obtenção –

processo de erosão natural, no caso de areia natural; processo de cominuição, no caso de pedra britada, areia industrial e agregado reciclado.

Com relação à morfologia, as partículas podem ser classificadas em arredondadas, alongadas e arestas vivas (MELO, 2005). Partículas arredondadas tendem a melhorar a trabalhabilidade das misturas, por reduzirem o atrito entre as partículas maiores, por promoverem a redução do índice de vazios e apresentarem menor área superficial específica, demandando menor quantidade de pasta para envolvê-las e as tornarem misturas trabalháveis.

A textura superficial das partículas pode ser classificada em ásperas e lisas. Partículas ásperas melhoram a aderência entre a pasta e o agregado, promovendo maiores resistências mecânica do concreto final. As partículas de textura ásperas e formas mais irregulares (alongada e/ou angulosa), como as dos agregados reciclados, requerem maior quantidade de pasta para se tornarem trabalháveis (MEHTA; MONTEIRO, 2006). A forma e a textura também podem variar de acordo com a composição do resíduo e o equipamento utilizado para geração dos agregados (ANGULO, 2000; LEITE, 2001).

A caracterização da morfologia, através da normalização brasileira, é limitada ao Agregado Graúdo. O ensaio apresentado por ela é muito oneroso e necessita de grande atenção do operador para obtenção de resultados mais precisos. Atualmente, a existência de equipamentos dotados de um sistema de análise da morfologia de partículas, através de imagens delas geradas, aumentou a eficiência do procedimento e caracterização mais precisa (HAWLITSCHK, 2014).

### Absorção de água

A absorção de água dos agregados é o processo pelo qual a água é conduzida e tende a ocupar os poros permeáveis das partículas do agregado. Na Figura 2 estão apresentadas as condições de molhagem do agregado. Quando os poros permeáveis se encontram cheios e não existe a presença de um filme de água sobre suas superfícies, é dito que o está na condição de saturado superfície seca (ABNT NBR NM 30, 2001; MEHTA; MONTEIRO, 2006). O teor de absorção é dado pela quantidade de água necessária deixar o agregado na condição de saturado superfície seca. Quanto maior o coeficiente de permeabilidade dos agregados, maior o teor de absorção.

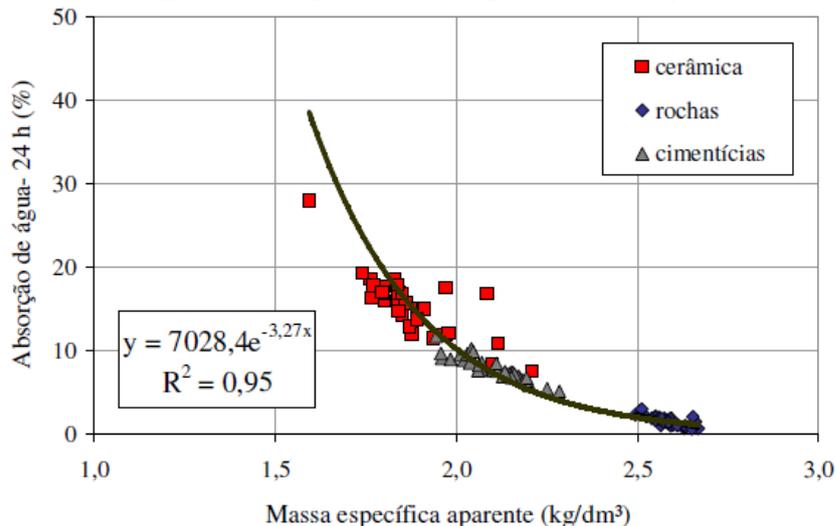
**Figura 2- Condição de umidade das partículas de agregado.**

Estado	Seco em Estufa	Seco ao Ar	Saturado, superfície seca	Saturado
<b>Total de água</b>	Nenhuma	Menor que o potencial de absorção	Igual ao potencial de absorção	Maior que a absorção

Fonte: Mehta e Monteiro (2006).

A porosidade dos agregados é diretamente proporcional ao teor de absorção água. A composição do resíduo é forte fator de influencia no teor de absorção. Ângulo (2000) verificou que AGR de origem do resíduo de materiais cerâmicos apresentam os maiores teores de absorção de água, seguido das pastas e argamassas, e por fim, das rochas, como apresentado na Figura 3.

**Figura 3 - Relação da massa específica e absorção.**



Fonte: Angulo, 2000.

Para os agregados convencionais, a taxa de absorção de água não exerce quase nenhum tipo de influência nas misturas de concreto, pois os agregados apresentam pouca, ou nenhuma, porosidade. No entanto, quando se utiliza agregados reciclados para produção de concretos, esta influência torna-se uma grande preocupação, pois este material apresenta valores mais altos de absorção que os agregados naturais geralmente utilizados (LEITE, 2001).

A porosidade dos materiais cerâmicos é dependente da composição da matéria-prima e do processo de queima. Na pasta de cimento, a porosidade está relacionada com o fator a/c utilizado para a sua produção, quanto maior for, maior será a porosidade. Na argamassa, a porosidade da pasta de cimento e a má distribuição granulométrica são as principais responsáveis.

Com relação aos AGR de resíduo de concretos, autores identificam que a absorção de água cresce com a quantidade de argamassa aderida aos agregados naturais, sendo uma das problemáticas na produção dos concretos. Os valores de absorção de água dos agregados miúdos são maiores que os agregados graúdos, devido a existência de maior quantidade de partículas finas de cimento hidratado (ANGULO, 2000; MARIE; QUIASRAWI, 2012; TENÓRIO, 2007).

#### Massa Específica

A massa específica dos agregados é dependente da porosidade e composição química e mineralógica do material de origem. Em se tratando dos AGR, como apresentado na Figura 2, a massa específica está ligada a composição do resíduo. Materiais cerâmicos apresentam massa específica menor, em comparação com os materiais cimentícios e rochas (ÂNGULO, 2000).

Os AGR de concretos apresentam as seguintes composições de particular: rocha, rocha com argamassa aderida e argamassa. Quanto maior a quantidade de partículas de argamassa e rocha com argamassa aderida, menor é a densidade do agregado. Os autores indicam que a porcentagem ideal de argamassa aderida nos agregados naturais é de 44%, assim a absorção dos agregados será inferior a 8% e sua densidade superior a 2,16 kg/dm<sup>3</sup> (DE JUAN, GUTIÉRREZ, 2004 *apud* CARRIJO 2005). Estudo da massa específica somente da argamassa antiga de concreto com diferentes relações a/c verificou-se valores em torno de 2,00 kg/dm<sup>3</sup> (HANSEN, 1999).

Existe um consenso de que tanto a massa específica, quanto a massa unitária dos agregados reciclados apresentam valores um pouco menores que os apresentados pelos agregados naturais correntemente utilizados na produção de concretos (LEITE, 2001). Menores valores de massa específica podem atuar positivamente, como redutor de peso dos artefatos de concretos, aliviando o carregamento das estruturas, significando uma econômica considerável na produção de elementos (CABRAL, 2007).

## 2.7 MÉTODOS DE DOSAGEM DO CAA

Atualmente, não existe um método padronizado, cada método desenvolvido visa adequar-se as propriedades dos materiais utilizados, visto que existe uma grande gama deles, e a experiência de quem o estão executando.

Segundo Moreira (2012), existe duas filosofias aplicadas na dosagem de CAA, e vários métodos, internacionais ou nacionais, seguem-nas. A primeira baseia-se no cálculo dos componentes do CAA para sua produção direta, realizando eventuais ajustes, semelhante ao processo realizado no concreto convencional. A segunda baseia-se no estudo da composição de pasta e/ou argamassa separadamente do estudo dos materiais secos, determinando o volume de pasta através de um concreto prévio.

### Primeira Filosofia: Dosagem dos componentes em conjunto

Alguns métodos brasileiros que se aplicam a primeira filosofia seguem os seguintes passos: (1) Desenvolvimento de concreto de base, pela determinação do teor ideal de argamassa a partir da dosagem de concreto convencional IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992), fazendo uso de cimento, água e agregados miúdos e graúdos; (2) Posteriormente, através da incorporação gradativa de aditivo superplastificante e adições minerais, ao concreto de base, faz-se a correção dos parâmetros de autoadensabilidade, verificando-os a cada incremento através de ensaios de padronizados (FOCHS, 2012).

Outros métodos seguindo esta mesma filosofia segue os seguintes passos: (1) Determinação do esqueleto granular dos agregados, independente da quantidade agregados na composição (composições binária, ternária e até quaternária); (2) Determinação da quantidade mínima de pasta, suficiente para ocupar os vazios entre os agregados; (3) Realização de ajustes durante a produção, para que a mistura atenda a todas as exigências devido a autoadensabilidade (GOMES; BARROS, 2009).

### Segunda Filosofia: Formulação de Fases separadas

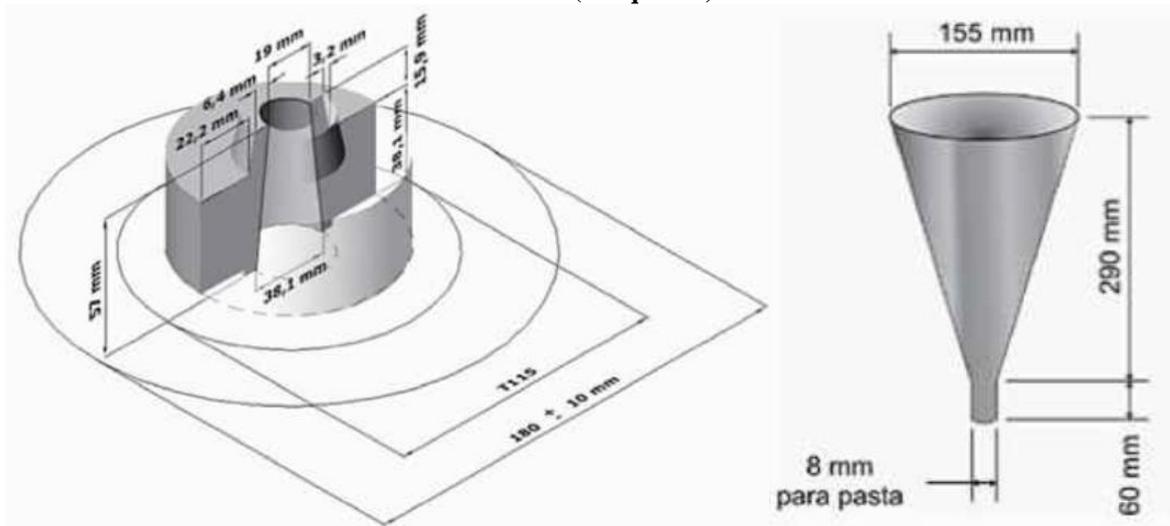
Esta filosofia baseia-se em teste iniciais em pasta e/ou argamassa, com o objetivo de avaliar as propriedades de fluidez e compatibilidade do aditivo superplastificante, cimento, agregado miúdo e adições minerais, para posterior produção do CAA. Esta metodologia foi proposta,

inicialmente, por Okamura, Maekawa e Ozawa (1993, *apud* Moreira, 2012), seguida por outros autores, Repette-Melo (2005) e Gomes e Barros (2009).

- Ensaio em Pasta

Os estudos parâmetros de pastas têm como objetivo determinar a melhor proporção cimento/finos e o teor de saturação do aditivo superplastificante, visando os melhores parâmetros de fluidez. Estes parâmetros são medidos através do Cone de Marsh, verificando a viscosidade aparente, e o espalhamento do *minislump*, verificando o poder de espalhamento da pasta, apresentados na Figura 4 .

**Figura 4 - Equipamentos de ensaios dos parâmetros de fluidez da pasta: *minislump* (à esquerda); e, cone de Marsh (à esquerda).**

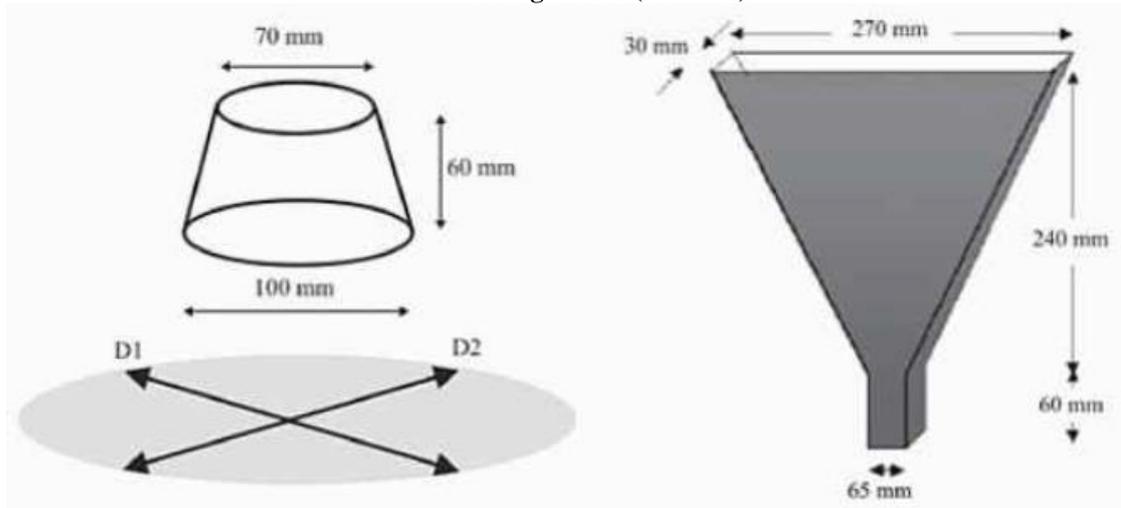


Fonte: Gomes e Barros (2009).

- Ensaio em Argamassa

O estudo de argamassa, geralmente, tem a finalidade de determinar a melhor proporção entre pasta e agregado miúdo, realizando ajustes necessários na quantidade de aditivo, para chegar-se aos melhores parâmetros de fluidez. Estes parâmetros são medidos através do Funil V, verificando a viscosidade aparente, e o espalhamento do mini tronco de abatimento, verificando o poder de espalhamento, apresentados na Figura 5.

**Figura 5 - Equipamentos de ensaios de fluidez de argamassas: mini tronco de abatimento (à esquerda); e Funil V de argamassa (à direita).**

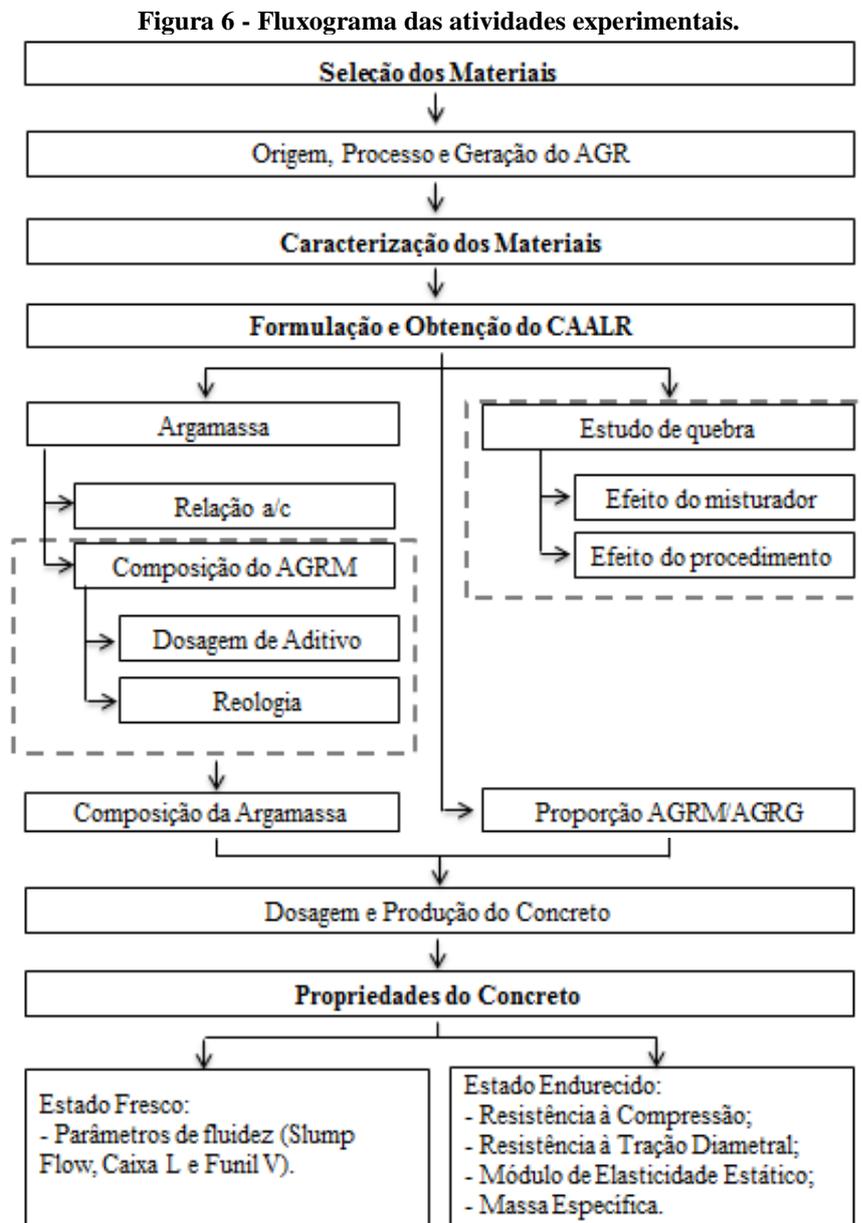


Fonte: Gomes e Barros (2009).

Por fim, através do ensaio em concreto, é verificado o teor de agregado gráudo em relação ao volume de argamassa, realizando os ajustes necessários, principalmente na quantidade de aditivos. O teor de agregado ideal será aquele em que o CAA consiga atingir todos os parâmetros de autoadensabilidade exigidos.

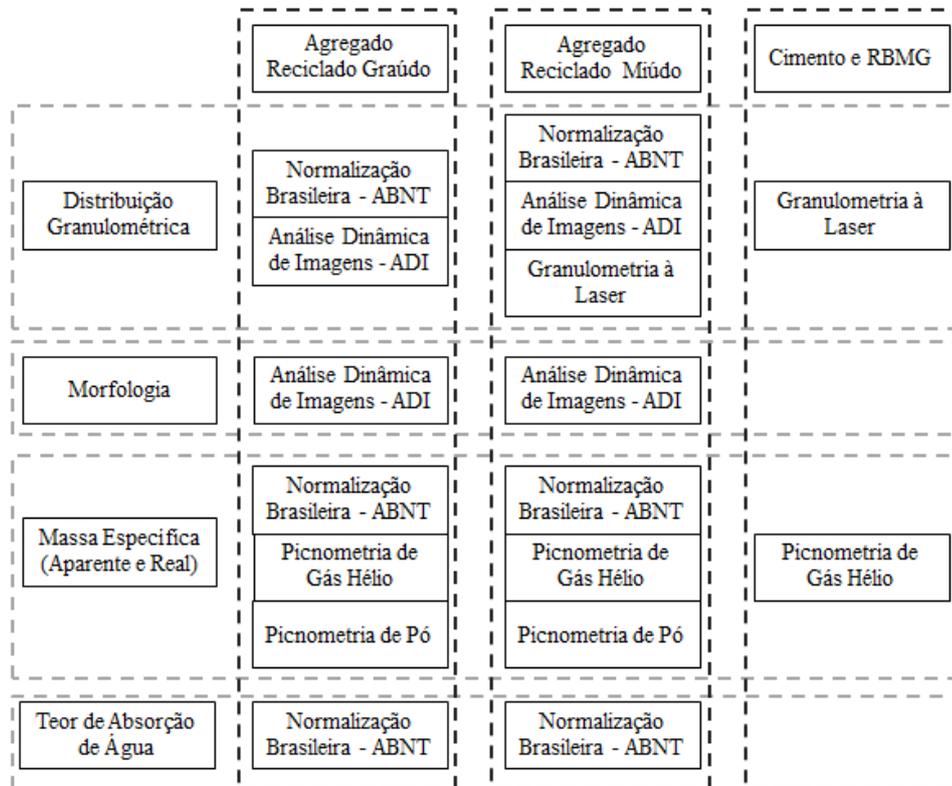
### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para atender ao objetivo principal do estudo que consiste na obtenção do concreto autoadensável leve reciclado, denominado de CAALR, um programa experimental foi discutido e elaborado. As etapas experimentais do programa são descritas no fluxograma, na Figura 6.



Para atendimento das diferentes etapas experimentais propostas no programa, várias técnicas, procedimentos e ensaios foram aplicados de acordo com as recomendações de normas técnicas, fabricantes e da literatura. Na Figura 7 estão apresentados os ensaios de caracterização realizados nos agregados e nos finos (cimento e RBMG).

**Figura 7 - Diagrama de resumo das características analisadas e técnicas utilizadas.**



No Quadro 2 está apresentada a quantidade de amostras utilizadas em cada ensaio de caracterização dos materiais (agregados, cimento e adição), formulação da argamassa de base para os concretos e determinação das propriedades dos concretos, no estado fresco e endurecido.

Quadro 2 - Resumo dos ensaios e quantidade de amostras.

ESTUDO	ENSAIOS/MÉTODOS	AMOSTRAS
CARACTERIZAÇÃO	<b><i>Distribuição Granulométrica:</i></b>	
	- ABNT NBR NM 248:2003	2 de AGR
	- ABNT NBR NM 248:2003 (modificado)	2 de AGR
	- Análise Dinâmica de Imagens	1 de AGR
	- Análise de Partícula a Laser	1 de Finos
	<b><i>Massa Específica:</i></b>	
	- ANBT NBR NM 52:2009	2 de AGRM
	- ANBT NBR NM 53:2009	2 de AGRG
	- Picnometria de Gás Hélio	1 de AGR e Finos
	- Picnometria de Pó	3 de AGR
	<b><i>Absorção de Água:</i></b>	
	- ABNT NBR NM 30:2001	2 de AGRM
	- ABNT NBR NM 53:2009	2 de AGRG
FORMULAÇÃO E OBTENÇÃO DO CAALR	<b><i>Argamassas</i></b>	
	- Relação a/c	1 argamassa/ Composição de AGR
	- Fluidez (Funil V e <i>Mini Slump</i> )	3 argamassa/ Composição de AGRM
	- Reologia	3 argamassa/ Composição de AGRM
	<b><i>Estudo de quebra</i></b>	
	- Efeito do Misturador	1 Concreto / Tipo de Misturador
	- Efeito do Procedimento	1 Concreto / Procedimento
PROPRIEDADES DO CONCRETO	<b><i>Estado Fresco</i></b>	
	- Slump Flow	2 de concreto/ Composição
	- Caixa L	1 de concreto/ Composição
	- Funil V	1 de concreto/ Composição
	<b><i>Estado Endurecido</i></b>	
	- Resistência à Compressão	4CPs/concreto
	- Resistência à Tração	4CPs/concreto
	- Módulo de Elasticidade	3CPs/concreto
	- Massa Específica	4CPs/concreto

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Microestrutura (LME) da USP, no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) e no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEMA) da UFAL.

### 3.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados foram: cimento CP II-E-32, que atende às exigências da NBR 5733 (ABNT, 1991); CP V-ARI, que atende às exigências da NBR 11578 (ABNT, 1991); resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG); agregados reciclados graúdos e miúdos, gerados de resíduos de blocos de concreto; e aditivo superplastificante, SP1 e SP2, com propriedades, fornecidas pelos fabricantes, apresentadas no Quadro 3.

**Quadro 3 - Características dos aditivos.**

<b>Aditivo</b>	<b>Densidade</b>	<b>Teor de sólido</b>	<b>Base química</b>
SP1	1,070 g/cm <sup>3</sup>	34%	Polímeros de Policarboxilatos
SP2	1,087 g/cm <sup>3</sup>	30%	Éter Policarboxilatos

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Microestrutura (LME) da USP, no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) e no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEMA) da UFAL, por este motivo houve a necessidade de se utilizar dois tipos de cimento e aditivos, devido à disponibilidade destes em cada Estado.

### 3.2 ORIGEM, PROCESSO E GERAÇÃO DO AGREGADO RECICLADO

Neste item estão apresentadas as características do resíduo utilizado para a geração dos agregados e as metodologias de caracterização aplicadas.

#### 3.2.1 Resíduo

Para atendimento ao proposto no estudo, o resíduo escolhido para o desenvolvimento deste trabalho foi o resíduo de blocos de concreto para alvenaria estrutural, por entender-se que se trata de um resíduo de concreto menos denso que o resíduo de concreto estrutural, favorecendo a característica de leveza do CAALR. Estudos prévios com a utilização deste tipo de resíduo para obtenção de concreto leve foram desenvolvidos (GOMES *et al.*, 2015; MENDES *et al.*, 2015a). Outros fatores que também contribuíram para escolha deste resíduo foram:

- **Produção do Resíduo**

É comum em toda fábrica de produção de elementos pré-moldados ocorrerem perdas durante o processo, gerando resíduos. Não é diferente com a produção de blocos de concreto, podendo chegar a 8,5% das unidades de blocos, quando somadas as perdas durante o processo de cura e embalagem. Porém, devido à crescente construção de

edificações de interesse popular, do programa Minha Casa Minha Vida, muitas construtoras optaram pelo uso de blocos vazados de concreto para aplicação em sistemas de alvenaria estrutural, gerando um considerável volume de resíduos. Na grande maioria das construtoras os blocos eram produzidos nos próprios canteiros de obra, e nestes casos, verificou-se, que a falta de preparo dos operários e de experiência com o tipo de material, equipamentos de compactação, vibro-prensa, e manuseio dos blocos, elevava a produção de resíduos de blocos (Figura 8).

**Figura 8 - Resíduo de blocos de concreto.**



Fonte: Próprio Autor.

- **Origem**

Por tratar-se de um resíduo de bloco de concreto derivado de um processo industrial, com dosagem específica e controle de materiais, o resíduo apresenta uma composição mineralógica derivada de materiais de concreto, ausente de contaminantes. Diferentemente de resíduos de construção, demolição e reforma, que geralmente apresentam contaminantes (CABRAL, 2007), além disso, quase sempre outros tipos de resíduos são encontrados, como restos de solo, madeira, plástico, papel, metais, gesso, vidro, etc. O resíduo de bloco era coletado na própria fábrica, montada no canteiro de obra, não tendo a necessidade de separação de outros resíduos. Separações que muitas vezes são onerosas e consomem muita energia e recursos.

O resíduo de bloco foi coletado no canteiro de obra e transportado para o laboratório para a geração dos agregados reciclados. O material era composto de blocos inteiros, parcialmente danificados, e pedaços de bloco quebrados, como apresentado na Figura 9.

**Figura 9 - Resíduo de bloco recolhido da obra.**



Fonte: Próprio Autor.

Os materiais do concreto seco utilizados na fabricação dos blocos que originaram os resíduos são mostrados no Quadro 4. As medidas eram realizadas em volume e em relação ao saco de cimento. Devido à falta de controle com a umidade dos agregados, a água era controlada pela experiência dos operários.

**Quadro 4 - Composição do concreto seco para fabricação dos blocos que originaram os resíduos.**

Fator a/c	Traço unitário (massa)				Consumo de Materiais (m <sup>3</sup> )				
	Cimento	Areia Grossa	Pó de Pedra	Aditivo	Água	Cimento	Agreg. Miúdo	Agreg. Graúdo	Aditivo
0,46	1	3,2	5,4	0,12	115 L	250 kg	120 L	180 L	6 mL

As resistências à compressão do lote dos blocos que originaram os resíduos estão apresentadas no Quadro 5. A resistência à compressão média observada foi de 9,65 MPa, aos 30 dias. Os blocos atenderam aos requisitos mínimos de resistência da ABNT NBR 6136:2014, de 4 MPa.

**Quadro 5 - Resistência dos blocos de alvenaria estrutural.**

Resistência (MPa)	
CP1	7,80
CP2	9,80
CP3	11,13
CP4	8,25
CP5	10,14
CP6	10,80
<b>Média</b>	<b>9,65</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>1,35</b>

### 3.2.2 Processo e Geração do Agregado Reciclado

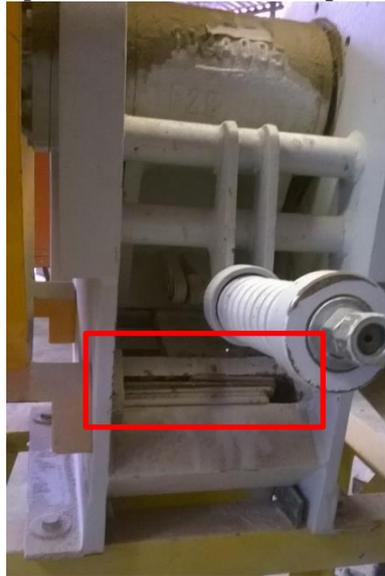
O equipamento escolhido para a realização do processo de cominuição do resíduo foi o britador de mandíbulas, apresentado na Figura 10. A abertura de mandíbulas deste britador é regulável através de chapas de metal. O detalhe do encaixe das chapas está apresentado na Figura 11. Assim, quanto maior a quantidade de chapas, menor a abertura entre as mandíbulas. Para este trabalho foi determinada uma quantidade de chapas equivalentes a 2,5 cm de espessura. Este valor foi determinado após um estudo desenvolvido com o britador, onde nesta abertura, o processo de britagem resultaria em cerca de 50% de agregado miúdo e 50% de graúdo.

**Figura 10 - Britador de Mandíbulas. (a) Vista lateral do britador, com o recipiente de coleta logo abaixo; (b) Mandíbulas.**



Fonte: Próprio Autor.

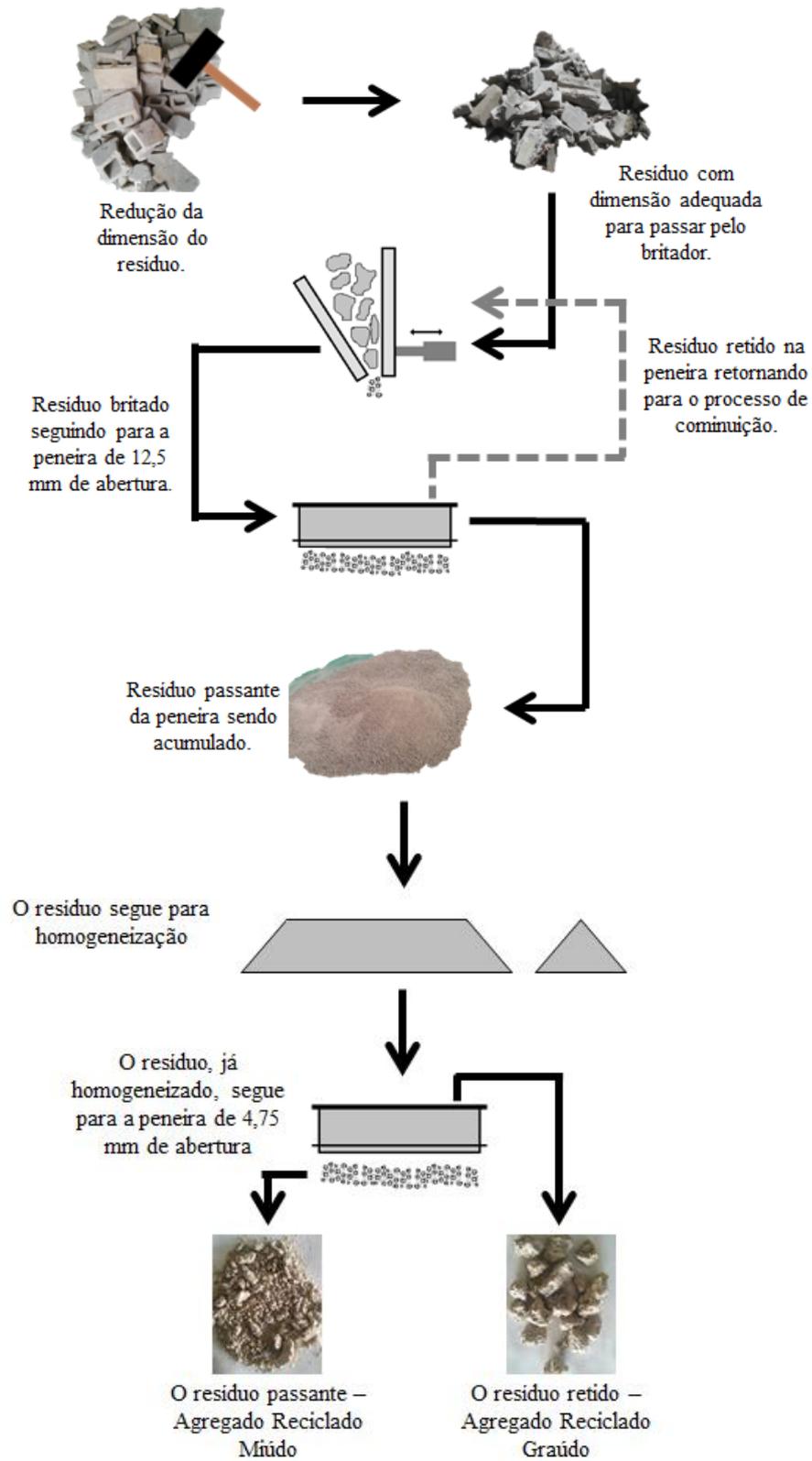
**Figura 11 - Detalhe das chapas na parte traseira do britador para regular a abertura da mandíbula.**



Fonte: Próprio Autor.

Primeiramente, os pedaços maiores do resíduo foram quebrados com marreta, para que adquirissem uma dimensão adequada para passarem pelas mandíbulas do britador. Em seguida, o resíduo foi britado e passado na peneira 12,5 mm. O material retido foi processado novamente no britador. Este processo foi repetido até que todo material passasse pela peneira de 12,5 mm. A escolha da peneira 12,5 mm se deu para atendimento ao objetivo do trabalho, que é a obtenção de CAA, cuja predominância da dimensão máxima do agregado é igual ou inferior a 12,5 mm. Um fluxograma é apresentado na Figura 12 mostrando essas etapas do processo de britagem do resíduo e geração dos agregados reciclados de bloco.

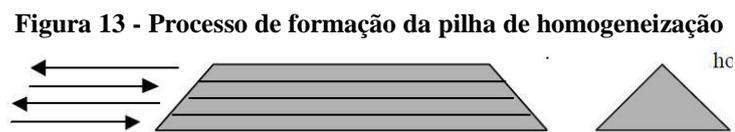
Figura 12 - Fluxograma do processo de cominuição do resíduo e geração dos agregados.



Fonte: Próprio Autor.

Com o intuito de reduzir a variabilidade do material, onde a retirada de uma porção, sem haver um critério, poderia ocasionar predominância de algumas faixas granulométricas, entre uma retirada e outra, o material passante na peneira foi homogeneizado através do processo de homogeneização por pilha, do tipo Chevron (ABICHEQUER, 2010).

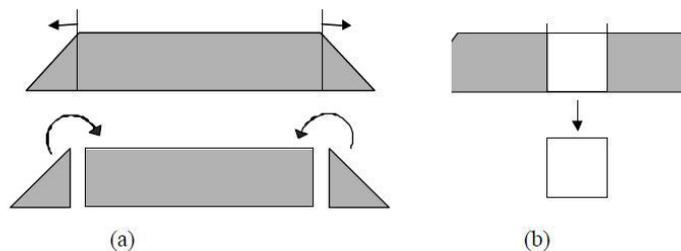
O processo consiste na sobreposição de camadas sucessivas do material, em direções alternadas, para formação de um prisma de seção triangular, contendo minério retirado das diversas frentes de trabalho (ABICHEQUER, 2010; ÂNGULO, 2005). O processo pode ser verificado na Figura 13.



Fonte: Angulo (2005).

Após a formação da pilha, retiram-se as extremidades, como apresentado na Figura 14(a) e repete-se o procedimento de colocação desse material em camadas sucessivas em direções alternadas. Então, o material é separado em alíquotas para utilização posterior, como mostrado nas Figuras 14(b) e 15. A homogeneização do resíduo, como já foi citada, tem o intuito de reduzir a variabilidade das alíquotas de materiais retiradas para uso.

**Figura 14 - Pilha de homogeneização: (a) corte das extremidades; (b) separação de alíquotas.**



Fonte: Angulo (2005).

**Figura 15 - Alíquotas separadas.**



Fonte: Próprio Autor.

A geração dos agregados foi feita por separação do resíduo em agregado graúdo e miúdo, sendo o graúdo todo o material retido na peneira 4,75 mm e o miúdo todo o material passante na peneira 4,75 mm, de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009).

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO

Neste item serão apresentadas as metodologias utilizadas para determinação das características dos materiais: agregado reciclado, cimento e RBMG. A Figura 7, já apresentada, mostrou resumidamente, as características avaliadas e suas respectivas metodologias. Observa-se que não foram aplicadas as mesmas técnicas para todos os materiais, assim foram adotadas as técnicas que mais se adequavam as especificidades de cada um.

Os ensaios normatizados pela ABNT, para caracterização de agregados para concreto, foram utilizados neste estudo. Mas, por apresentarem algumas limitações para caracterização dos agregados reciclados, e até mesmo dos agregados naturais, também foram buscadas algumas metodologias e equipamentos de caracterização mais recentes, visando uma caracterização mais fiel e rápida dos agregados reciclados.

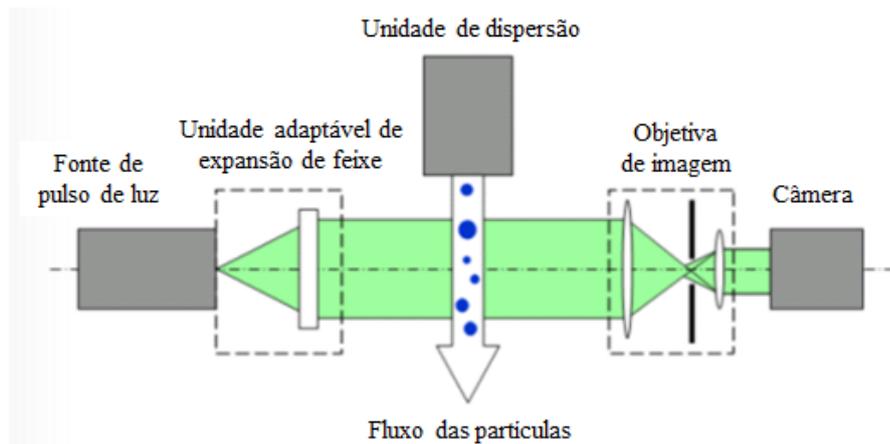
#### 3.3.1 Distribuição Granulométrica

Os agregados reciclados para produção do CAALR foram caracterizados, quanto à sua granulometria, pela NBR 7211 (ABNT, 2009). Verifica-se que a série de peneiras estabelecidas pela norma deixa várias lacunas em seus resultados, devido ao fato de haver uma diferença grande entre as aberturas das malhas das peneiras utilizadas.

Como forma de obter uma distribuição granulométrica mais refinada e com mais informações das dimensões e formas das partículas, foram utilizados equipamentos de Análise Dinâmica de Imagens (ADI) e Granulometro a Laser (GL).

O sistema de ADI é uma técnica para a análise de partículas a partir da captura de imagens de uma amostra de material que se desloca diante da lente da câmera, com o auxílio de uma fonte luz. Na Figura 16 é apresentado um diagrama do processo de funcionamento de um equipamento que realiza este tipo de análise.

**Figura 16 - Diagrama do funcionamento do sistema ADI.**



Fonte: SYMPATEC.

A amostra de partículas a ser analisada é colocada na unidade de dispersão, que consiste em uma calha vibratória, que permite a regulação do fluxo de queda das partículas que passarão pela lente da câmera. Na Figura 17 está apresentada a calha do equipamento utilizado. A amostra é colocada no funil, que com o processo vibratório, vai sendo esvaziado gradativamente. Este processo é importante, para evitar a sobreposição de imagens entre duas ou mais partículas, causando uma avaliação incorreta do material.

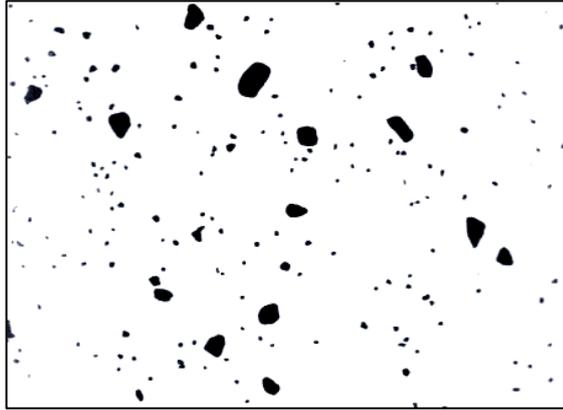
**Figura 17 - Detalhe da calha vibratória.**



Fonte: Nakano *et al.* (2014).

A luz é pulsada por uma fonte e segue para a unidade de expansão do feixe de luz, criando um feixe paralelo. Este ilumina o fluxo das partículas dispersas que estão em queda livre. Assim, as imagens das partículas passam pela objetiva e são, finalmente, fotografadas por uma câmera de alta velocidade, de 500 quadros por segundo. Na Figura 18 pode ser observada uma imagem gerada pelo equipamento.

**Figura 18 - Imagem captura câmera do equipamento de ADI.**

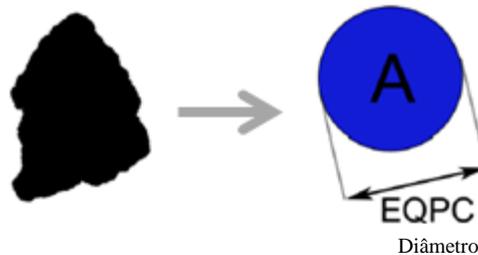


Fonte: HORIBA.

As imagens registradas são analisadas por um algoritmo para o cálculo de parâmetros relacionados ao tamanho das partículas (para geração da distribuição granulométrica) e morfologia, padronizados pela ISO 13322-2:2006.

O parâmetro utilizado para determinação do tamanho de partículas foi o EQPC (*Equal Projection of Circle Area*), onde o tamanho corresponde ao diâmetro do círculo com área igual a da projeção da partícula gerada pelo equipamento.

**Figura 19 - Detalhe de como se processa a informação do tamanho das partículas analisadas por EQPC.**



Fonte: Nakano *et al.* (2014).

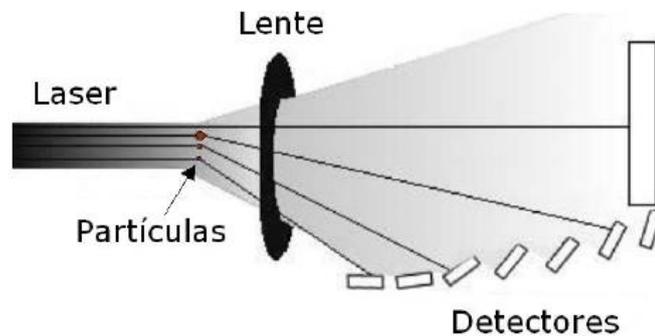
Devido à limitação do equipamento utilizado em avaliar as partículas com dimensões na ordem de micrometros, esta metodologia foi aplicada apenas aos agregados miúdos com dimensões acima de 150  $\mu\text{m}$  e agregados graúdos.

Já o método GL é uma técnica que possibilita a determinação do tamanho de partículas na ordem de nm e  $\mu\text{m}$ , padronizada pela ISO 13320:2009. Este sistema apresenta medições rápidas, além de boa repetibilidade, o que aumenta a produtividade de um laboratório.

Esta técnica baseia-se na medição da distribuição de tamanho das partículas por meio da variação angular de um feixe de laser interage com as partículas dispersas da amostra

analisada. Partículas grandes tendem a dispersar a luz em pequenos ângulos, em relação ao feixe de laser, e partículas pequenas em ângulos grandes, como mostrado na Figura 20. A distorção de ângulo é captada por detectores e segue para análise em um algoritmo para determinação do padrão de dispersão com base na teoria de difusão de Mie.

**Figura 20 - Diagrama do processo que coleta de dados do sistema GL.**



Fonte: MALVERN.

As amostras do estudo foram dispersas em água, devido à característica do equipamento utilizado. No entanto, nesta técnica a amostra pode ser dispersa em outros fluidos (líquido ou gás).

Esta técnica foi aplicada aos materiais finos utilizados neste trabalho – cimento, RBMG e agregado miúdo de dimensão inferior a 150  $\mu\text{m}$  – devido à característica da técnica e limitação da metodologia ADI.

Neste trabalho, foram aplicadas cinco metodologias de caracterização da distribuição granulométrica dos agregados e dos finos, duas aplicadas em ambos agregados reciclados, uma em AGRG, outra em AGRM e uma para os finos (cimento e fíler):

- **Método A:** Peneiramento, utilizando as séries de peneiras estabelecidas pela NBR 7211 (ABNT, 2009). Como visto no processo de produção, a dimensão máxima característica dos AGRM e AGRG foi limitada pela abertura das peneiras 4,75 mm e 12,5 mm, respectivamente. No Quadro 6 são apresentadas as peneiras utilizadas.

**Quadro 6 - Peneiras utilizadas para determinação da composição granulométrica a partir do Método A.**

<b>Método A</b>	
<b>Peneiras (mm)</b>	
AGRM	AGRG
4,75	19
2,36	12,5
1,18	9,5
0,6	6,3
0,3	4,75
0,15	Fundo
Fundo	

- **Método B:** Peneiramento, utilizando uma série mais completa de peneiras, em comparação com as estabelecidas pela NBR 7211 (ABNT, 2009). No Quadro 7 estão apresentadas as séries de peneiras utilizadas.

**Quadro 7 - Peneiras utilizadas para determinação da composição granulométrica a partir do Método B.**

<b>Método B</b>		
<b>Peneiras (mm)</b>		
AGRM		AGRG
4,75	0,5	19
4	0,43	12,5
3,35	0,36	9,5
2,8	0,3	8
2,36	0,25	6,7
2	0,21	5,6
1,7	0,18	4,75
1,4	0,15	Fundo
1,18	0,13	
1	0,11	
0,85	0,09	
0,71	0,08	
0,6	Fundo	

- **Método C:** Foram combinadas as metodologias ADI e GL para caracterização do AGRM. Devido às características dos equipamentos utilizados foi determinado que as partículas retidas em 0,15 mm seriam analisadas pelo sistema ADI e as passantes pelo sistema GL. Como o material é previamente separado em peneiras, sabe-se a proporção existente de cada porção, assim, pode-se realizar a combinação dos

resultados. No Quadro 8 estão apresentadas as subdivisões realizadas, as metodologias utilizadas e as massas de cada amostra.

**Quadro 8 - Divisões do AGRM em faixas, com seus respectivos procedimentos de verificação da distribuição granulométrica.**

Metodologia	GL	ADI	
Faixa (retido-passante)	0 – 0,15 mm	0,15 mm – 1,18 mm	1,18 mm – 4,75 mm
Massa da Amostra (g)	100	100	600

Os agregados ensaiados por ADI foram separados em faixas para uma melhor caracterização do material, visto que para o melhor desempenho do ensaio há a necessidade de grande número de partículas. Assim, quanto menor a dimensão dos grãos, menor a massa da amostra necessária a ser ensaiada, e quanto maior, maior a massa necessária. Os equipamentos de ADI e de GL, utilizados neste trabalho, apresentam, respectivamente, 48 e 56 faixas granulométricas.

- **Método D:** Foi aplicada a metodologia ADI para caracterização do AGRG (retido na peneira 4,75 mm). A massa da amostra utilizada foi de 1000 g, devido a maior dimensão dos grãos.
- **Método E:** Foi aplicada a metodologia GL para caracterização dos demais finos (cimento e adições). A massa das amostras utilizadas foi de 100g.

Nos procedimentos dos Métodos A e B, as amostras foram preparadas segundo as especificações da NBR 7211 (ABNT, 2009), sendo quarteadas, no quarteador do tipo JONES (Figura 21), a partir de uma alíquota. Para os demais procedimentos, as amostras também foram quarteadas e secas em estufa a 100°C por 24h. O AGRM foi separado em mais de uma fração, em peneiras previamente especificadas. Vale ressaltar que para os métodos que fizeram uso de ADI, foi utilizada apenas uma amostra de cada material, devido ao equipamento apresentar boa repetibilidade.

**Figura 21 - Quarteador do Tipo JONES.**



Fonte: Próprio Autor.

### 3.3.2 Morfologia

A normalização brasileira apresenta a NBR 7809 (ABNT, 2008) para determinação do índice de forma dos agregados, no entanto, engloba apenas os agregados graúdos. Além disso, a metodologia é realizada com o paquímetro em 200 de grãos, realizando medições partícula a partícula. Este procedimento demanda tempo e também é dependente do operador, que deverá identificar e medir a maior e menor dimensão apresentada pelo grão.

Quando utilizado o equipamento de ADI, verifica-se que além dos parâmetros de tamanhos das partículas, o equipamento também fornece parâmetros de indicativos de morfologia das partículas. Todos os materiais, no qual a metodologia ADI para determinação da distribuição granulométrica foi aplicada, foram analisados em termos de morfologia.

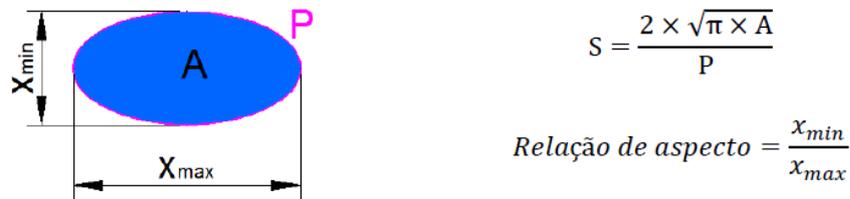
As imagens geradas pelo equipamento são analisadas por um software. Em termos de morfologia, o software gera dados de relação de aspecto e a esfericidade.

- Relação de aspecto ( $b/l$ ) – quociente entre a maior e a menor dimensão da partícula entre duas retas paralelas que tangenciam a projeção da partícula; descreve quão achatada é a partícula; apresenta valor  $0 < b/l \leq 1$ , onde 1 é o valor máximo e significa que a partícula é esférica ou equiaxial; quanto mais próximo de 0, mais alongada é a partícula;
- Esfericidade ( $S$ ) – relação entre o perímetro de um círculo de área igual à projeção da partícula com o perímetro real da projeção; quanto mais reentrâncias houver na partícula maior será o seu perímetro real e menor será o valor da relação; esta relação indica a macro rugosidade da partícula; apresenta valor  $0 < S \leq 1$ , onde 1 é o valor

máximo, significando que a partícula apresenta uma superfície esférica e lisa; quanto mais próximo de 0, mais irregular será a superfície da partícula.

A Figura 22 (REBMANN, 2013 *apud* NAKANO *et al*, 2014) apresenta uma ilustração dos parâmetros supracitados, além da formulação de cálculo utilizada para quantificação dos mesmos.

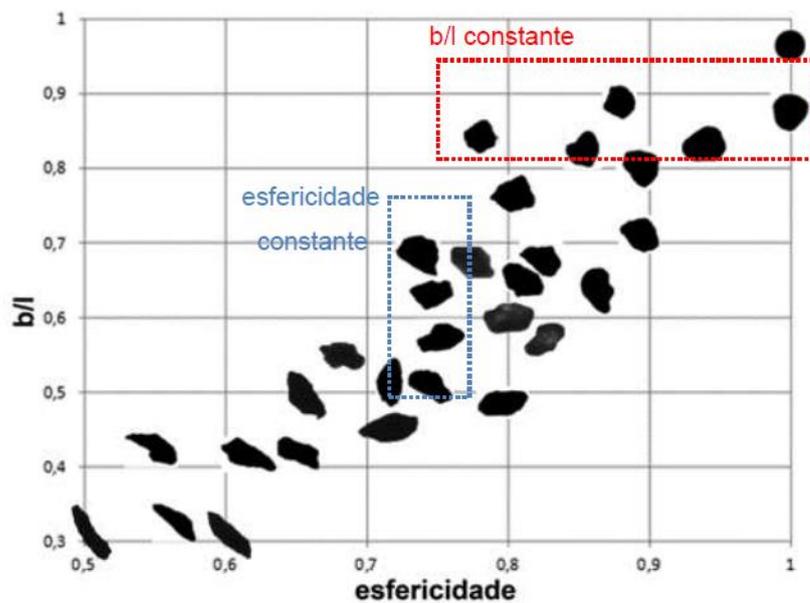
**Figura 22 - Determinação dos parâmetros de morfologia das partículas.**



Fonte: Rebmann (2013) *apud* Nakano (2014).

A Figura 23 (HAWLITSCHKEK, 2014) é uma ilustração de partículas com diferentes morfologias, obtidas por um equipamento com técnica ADI, das areias comercializadas no estado de São Paulo. A relação de aspecto apresenta uma rápida identificação dos seus valores, quanto mais alongadas, menor o valor, quanto mais próxima de uma esfera, mais próximo de 1 é o valor. Já a esfericidade não é tão clara esta visualização, ela está mais relacionada com arredondamento da partícula (HAWLITSCHKEK, 2014).

**Figura 23 - Relação entre a esfericidade e a relação de aspecto.**



Fonte: Hawlitscheck (2014).

### 3.3.3 Massa Específica e Porosidade

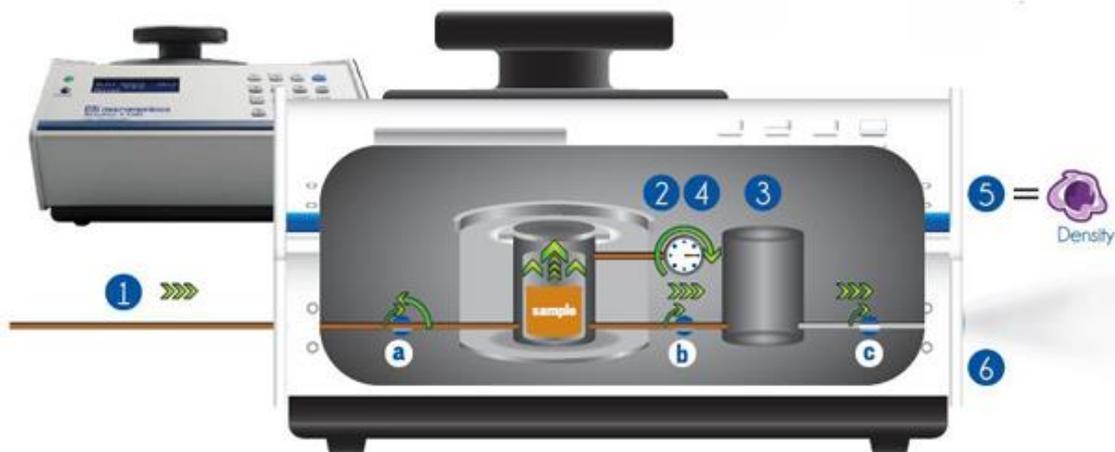
A massa específica dos agregados, de maneira geral, é a relação entre sua massa e o volume ocupado por ela. As normas brasileiras de agregados miúdos e graúdos, respectivamente, NBR NM 52 (2009) e NBR NM 53 (2003), caracterizam a massa específica da seguinte forma: Massa Específica Aparente do Agregado Seco (MEA), Massa Específica do Agregado Saturado Superfície Seca (MES) e Massa Específica Real (MER).

Os procedimentos estabelecidos nas normas citadas baseiam-se em princípios básicos, fazendo uso de equipamentos de baixo custo. No entanto, há estudos (ÂNGULO *et al.*, 2012), que propõem para agregados reciclados a determinação destas características através das técnicas de picnometria de gás e pó por serem mais rápidos que o método normalizado.

A picnometria de adsorção de gás hélio baseia-se na relação entre a pressão de gás com a célula vazia e a célula contendo os agregados. Segundo Freitas (2007), o gás tem a capacidade de adentrar todos os poros abertos, com diâmetro maior que os de suas moléculas. Os poros que não puderem ser ocupados pelo gás terão seu volume somado ao volume do sólido.

A Figura 24 apresenta o esquema do processo que ocorre dentro do equipamento durante o ensaio.

**Figura 24 - Esquema do processo de obtenção do volume da amostra dentro do picnômetro de gás hélio.**



Fonte: MICROMERITICS.

- 1) Em um primeiro momento, o recipiente que contém o gás é aberto, para poder alimentar o sistema. No entanto, o gás só entra na amostra com a abertura a válvula **a**.
- 2) O recipiente (de volume conhecido, **V<sub>rec1</sub>**) com a amostra (de massa conhecida, **m**) é preenchido com gás a uma determinada pressão (que vai depender do tipo de material

- estudado), enquanto a válvula **b** está fechada. Após chegar à pressão determinada, a válvula **a** é fechada. Havendo um equilíbrio, é feita a primeira medida de pressão **P1** dentro do recipiente com a amostra.
- 3) Logo após, a válvula **b** é aberta, permitindo a passagem do gás para um recipiente de volume conhecido (**Vrec2**), enquanto a válvula **c** está fechada. Havendo o equilíbrio entre os recipientes, é feita a segunda medida de pressão **P2** dentro do recipiente.
  - 4) Por fim, a válvula **c** é aberta, liberando o gás do sistema.

Finalizado o processo, o objetivo é determinar o volume ocupado pela amostra ( $V_{am}$ ), uma vez que já se possui a massa da mesma. Assim,  $V_{am}$  pode ser obtida a partir da expressão apresentada na Equação 3.

$$P1 \times (V_{rec1} - V_{am}) = P2 \times (V_{rec2} + V_{rec1} - V_{am}) \quad \text{Equação 3}$$

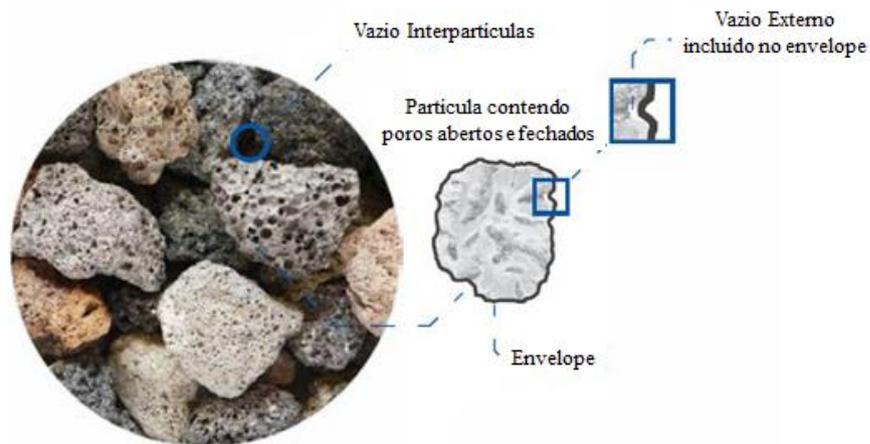
Como a massa da amostra é conhecida,  $m$ , a MER do sólido é calcula por meio da Equação 4.

$$MER = \frac{m}{V_{am}} \quad \text{Equação 4}$$

As amostras utilizadas foram de 50 g, sendo que no caso dos agregados reciclados foi feita apenas uma amostra, com AGRM e AGRG juntos na mesma amostra. Este procedimento foi utilizado por se tratar de um material sem grandes variações da sua composição.

A picnometria de pó é realizada através do envolvimento de toda a superfície externa dos grãos de agregados, também chamada de envelope, por um pó de granulometria muito fina (500  $\mu\text{m}$ ), a fim de ocupar todos os vazios intergranulares e determinar o volume aparente das partículas. A Figura 25 apresenta as regiões de vazios intergranulares e de envelope dos grãos de agregados. Os poros externos dos agregados reciclados serão ocupados pelo pó, no entanto, só os que apresentarem diâmetros superiores ao do pó.

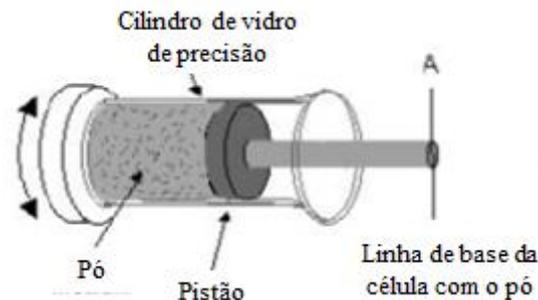
**Figura 25 - Detalhe dos vazios existentes entre os grãos dos agregados, dos poros dos agregados e do envelope que envolve cada grão.**



Fonte: MICROMERITICS.

A metodologia se baseia em um processo de compactação controlada, com um pó fino (ÂNGULO *et al.*, 2012). Primeiro é determinada uma quantidade de pó suficiente para envolver a amostra de agregado. Então, como mostrado na Figura 26, o pó é comprimido por um pistão metálico dentro do recipiente de vidro, formando uma Linha “A”, linha de base, que determina o volume ocupado pelo pó.

**Figura 26 - Recipiente de ensaio para determinação do volume ocupado pela amostra no equipamento de picnometria de pó.**



Fonte: Adaptado de Ângulo *et al.* (2012).

Logo após, é colocada uma amostra do agregado, de massa conhecida, dentro o recipiente juntamente com o pó e é feita um pré-homogeneização, como apresentado na Figura 27.

**Figura 27 - Imagem real do processo de colocação da amostra juntamente com o pó.**



Fonte: Próprio Autor.

Então, a amostra segue para ser comprimida novamente, determinando agora uma Linha B, como apresentado na Figura 28.

**Figura 28 - Recipiente do ensaio após o processo de compressão da amostra e verificação da diferença entre a distância inicial e final do pistão.**



Fonte: Adaptado de Ângulo *et al.* (2012).

A distância entre a Linha “A” e Linha “B” é **h**, permitindo o cálculo do volume aparente do agregado, sólido e poros das partículas. O volume da amostra é calculado pela equação **V<sub>am</sub> = πr<sup>2</sup>h**. Assim, através da Equação 5, pode-se calcular a massa específica aparente.

$$MEA = \frac{m}{V_{am}} \quad \text{Equação 5}$$

Para os ensaios realizados segundo as normalizações brasileiras, as amostras foram preparadas seguindo os procedimentos estabelecidos pelas mesmas. Para os demais ensaios, as amostras foram secas em estufa a 100°C por 24h.

### 3.3.4 Absorção de água dos Agregados

A absorção de água dos agregados foi obtida segundo as prescrições da ABNT NBR NM 30:2001 e ABNT NBR NM 53:2003, para o AGRM e AGRG, respectivamente.

## 3.4 FORMULAÇÃO E OBTENÇÃO DO CAA

O concreto proposto no estudo é composto de uma composição de agregados reciclados, superplastificante, finos e relação água/cimento. Nenhum outro tipo de aditivo, como modificador de viscosidade e incorporador de ar, foi usado. A maioria das metodologias de dosagem de CAA obtém a sua composição através de estudos da composição da pasta e do esqueleto granular (PETERSSON *et al.*, 1996; DE LARRARD, 1999; SAAK *et al.*, 1999; SU *et al.*, 2001, GOMES *et al.*, 2003; EFNARC, 2005). Já neste estudo, a formulação do CAALR foi desenvolvida determinando a composição da argamassa e do esqueleto granular. O fato de não ter sido desenvolvido estudos na pasta, e sim na argamassa, é justificado pelo uso dos AGRM que apresentam características, como alta absorção, formas irregulares e presença de finos, que interferem consideravelmente no comportamento das pastas, principalmente com relação à dosagem de aditivos e relação água/cimento.

Nas argamassas, foi determinada a relação a/c, composição de AGRM e dosagem de aditivo, através de parâmetros de fluidez (diâmetro de espalhamento e tempo de fluidez) e de reologia (viscosidade e tensão de escoamento). A composição de agregados foi obtida através da produção de concretos com diferentes proporções de agregados. A composição de agregados com a qual se conseguiu obter autoadensabilidade de acordo com a NBR 15823 (ABNT, 2010) foi definida como a composição final. A seguir detalhes dos estudos de determinação da composição das argamassas e dos agregados são apresentados.

### 3.4.1 Argamassa

O estudo de dosagem foi desenvolvido em argamassa, conforme relatado anteriormente, devido às características dos AGRM (alta absorção, porosidade, presença de finos, forma irregular, etc.), e dividido em duas etapas. Na 1ª etapa foi avaliado o comportamento do AGRM, quanto à sua absorção, frente ao incremento da dosagem de água e de aditivo, e assim, pode-se determinar a relação a/c. Na 2ª etapa foram determinados a distribuição granulométrica do AGRM (com e sem adição do RBMG) e o teor ótimo de aditivo, para determinação da composição da argamassa de base para o CAALR.

- 1ª ETAPA

Uma avaliação da estabilidade do AGRM em argamassa foi verificada através da influência do aumento de água e aditivo nas propriedades reológicas durante o processo de mistura prolongado. No estudo, foi investigada, primeiramente, qual a relação água/cimento que possibilitaria a produção de uma argamassa fluída, frente à ação de absorção de água do AGRM. Essa investigação partiu de um ensaio de reologia, onde a mistura, com uma relação a/c inicial constante, foi mantida em fluxo constante, avaliando-se o efeito da absorção de água do agregado reciclado miúdo ao longo de um período de tempo, enquanto uma dosagem constante de água era introduzida. Em outro momento, com o mesmo ensaio reológico, agora introduzindo uma dosagem constante de aditivo, foi verificada também a capacidade do aditivo superplastificante de aumentar a fluidez sob um fator água/cimento constante.

As relações a/c trabalhadas foram 0,30 e 0,47. A relação a/c 0,30 foi selecionada por ser próxima à quantidade necessária para realização da hidratação do cimento, objetivando a promoção da fluidez apenas com aditivo superplastificante. A relação a/c 0,47 foi selecionada por se tratar da quantidade mínima necessária para obter-se uma argamassa fluída desde o início do processo de mistura. Vale ressaltar que este valor foi obtido com um percentual inicial de aditivo de 1% de solução sobre a massa de cimento.

Nesta etapa, os materiais utilizados foram: Cimento Portland CP V-ARI, AGRM e aditivo SP1. As argamassas desenvolvidas nesta etapa apresentam relação AGRM/cimento igual 2, seguindo recomendações de trabalhos desenvolvidos em CAA (LISBOA, 2004; GOMES e BARROS, 2009) e 1% de aditivo (solução) sobre a massa de cimento. Na produção foi utilizado 3 kg de material seco (1 kg de cimento e 2 kg de AGRM).

O AGRM foi dividido em duas faixas granulométricas (retida-passantes): 1,18 mm – 4,75 mm; 0,15 mm – 1,18 mm. Esta divisão teve como objetivo avaliar qual das faixas apresenta melhor comportamento frente a um procedimento de mistura prolongado, visto que o material mais fino é composto em sua maioria de pasta de cimento (ÂNGULO, 2000; TENÓRIO, 2007), material poroso que é associado à elevada absorção dos AGR de concreto, e consequentemente a perda de trabalhabilidade.

Para cada faixa granulométrica do AGRM foram produzidas quatro argamassas, duas para cada relação a/c, destas duas sendo uma com acréscimo de aditivo e outra com acréscimo temporal de água, a cada 300 s em uma quantidade de 0,2% (solução, no caso do aditivo)

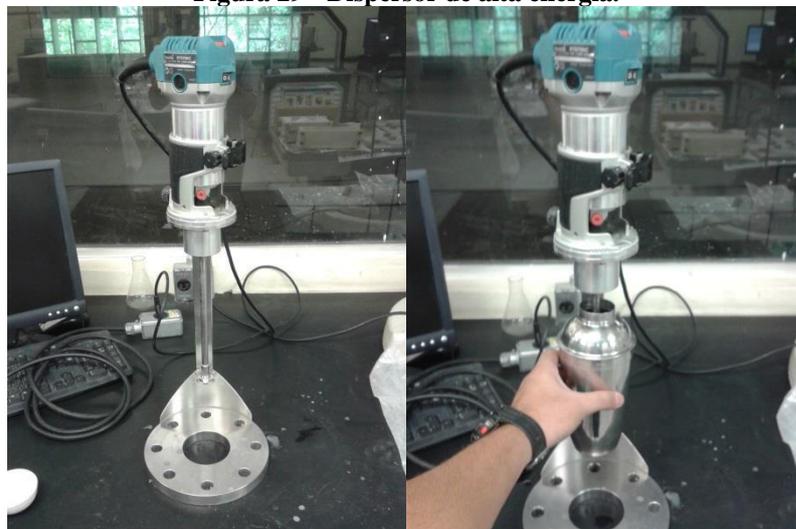
sobre a massa de cimento, como apresentado no Quadro 9. Os acréscimos tiveram como objetivo avaliar o efeito de dispersão do aditivo, frente a um fator a/c fixo, visto que a alta absorção do agregado iria consumir a água ao longo do tempo, retirando-a da mistura, causando perda de fluidez.

**Quadro 9 - Argamassas produzidas para avaliação da estabilidade.**

Faixa do Agregado	Tipo da Argamassa	Relação a/c		Acréscimo	
		0,30	0,47	água	aditivo
1,18 mm – 4,75 mm	1	x		x	
	2	x			x
	3		x	x	
	4		x		x
0,15 mm – 1,18 mm	1	x		x	
	2	x			x
	3		x	x	
	4		x		x

No processo de produção das argamassas, a pasta de cimento foi misturada previamente em um dispersor de alta energia, apresentado na Figura 29, a fim de eliminar possíveis aglomerações de partículas de cimento na pasta. Em seguida, a pasta juntou-se ao ARGM e foram misturados no reômetro rotacional desenvolvido pela Poli-USP, mostrado na Figura 30. A mistura foi realizada em velocidade constante de 300 RPM, durante 60 minutos.

**Figura 29 - Dispersor de alta energia.**

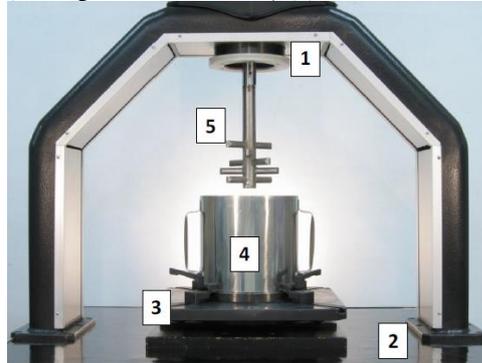


Fonte: Próprio Autor.

O reômetro rotacional (Poli-USP) apresenta a capacidade de misturar os componentes dos concretos (e outras misturas cimentícias). Durante o processo de mistura foram coletados dados de torque, parâmetro utilizado como indicativo de resistência do mistura ao processo de

homogeneização, detectado por uma célula de carga presente no equipamento. A avaliação das propriedades reológicas pode ser realizada analisando-se os valores de torque. E assim, foi realizado nas argamassa citadas.

**Figura 30- Reômetro rotacional Poli-USP. Componentes: (1) Dispositivo rotacional; (2) Base e console; (3) Elevador; (4) Recipiente de ensaios; (5) Geometria de mistura.**



Fonte: De França (2013).

- Na 2ª ETAPA

Após a análise dos dados gerados em cada argamassa na etapa anterior, e selecionada a relação a/c que melhor se adequou a produção de argamassas fluidas, partiu-se, na 2ª etapa, para o estudo e determinação da composição granulométrica do AGRM e dosagem de aditivo, com o objetivo de se obter os melhores parâmetros de fluidez e de reologia.

A composição granulométrica do AGRM foi modificada baseando-se no aumento de finos necessário para obtenção do CAA (OKAMURA; OUCHI, 2003). Inicialmente, foram considerados apenas os finos do AGRM, com possibilidade de uso de uma adição proveniente de um resíduo para substituição do AGRM, nesse caso o RBMG, já utilizado por outros autores (LISBOA, 2004; GOMES; BARROS, 2009). A substituição do AGRM pelo RBMG tem como objetivo, além de aumentar o teor de finos na composição, de tornar o processo de obtenção da composição com mais finos simplificado, sem haver interferência na composição original do AGRM, que demanda muito tempo e energia na separação deste agregado em faixas granulométricas.

Neste sentido, o estudo da composição do AGRM dividiu-se em cinco faixas granulométricas (retido-passante): 0 – 0,15 mm; 0,15 mm - 0,30 mm; 0,30 mm - 1,18 mm; 1,18 mm - 2,36 mm; 2,36 mm - 4,75 mm. O objetivo de aumentar a subdivisão do AGRM é de facilitar a avaliação do comportamento da argamassa, quando realizadas as modificações da

composição. Desta forma, foram determinadas as composições de AGRM para produção de argamassas, como apresentado no Quadro 10.

**Quadro 10 - Composição do AGRM das argamassas.**

Argamassas	Faixas retida-passante (mm)				
	0 - 0,15	0,15 - 0,30	0,30 - 1,18	1,18 - 2,36	2,36 - 4,75
ARSM	6,61%	6,41%	26,84%	26,52%	33,61%
ARF	9,96%	9,66%	40,43%	39,95%	0,00%
ARR	20,62%	5,45%	22,81%	22,54%	28,57%
ARM	12,50%	6,75%	28,25%	23,16%	29,34%
ARMR	12,50%	6,01%	25,15%	24,85%	31,49%

As nomenclaturas das argamassas podem ser entendidas como:

- 1) ARSM – Composição com agregado reciclado sem modificação, AGRM  $\leq$  4,75mm;
- 2) ARF – Composição com agregado reciclado fino, AGRM  $\leq$  2,36mm;
- 3) ARR – Composição com agregado original e RBMG em substituição do AGRM em 15% em massa;
- 4) ARM – Composição com agregado reciclado modificado;
- 5) ARMR – Composição com agregado reciclado original e RBMG em substituição da massa de AGRM em 6,31%.

Inicialmente, foi avaliado o comportamento de argamassa com a composição do AGRM sem modificação de sua composição granulométrica (ARSM), verificando suas propriedades de fluidez. As demais argamassas foram formuladas tendo esta argamassa como base, e também os resultados obtidos na 1ª Etapa.

A composição ARM foi desenvolvida em um estudo prévio (MENDES *et al.*, 2015a), que teve como objetivo verificar a influência de composição granulométrica contínua e descontínua de AGRM nas propriedades de argamassas autoadensáveis. No estudo, o agregado foi dividido em três faixas granulométricas (retido-passante): 0 – 0,15 mm; 0,15 mm – 1,18 mm; 1,18 mm – 4,75 mm. No Quadro 11 estão apresentadas a composição do AGRM original e das composições contínua e descontínua estudadas. Verifica-se que as composições estudadas apresentam maior quantidade de finos de AGRM (abaixo de 0,15 mm) requerida para obter mais fluidez. Na composição descontínua, a faixa 0,15 mm – 1,18 mm foi retirada para avaliar se com a ausência haveria melhor fluidez da argamassa. A composição contínua se assemelha com o AGRM original, com o aumento dos finos as demais faixas apresentaram redução, como esperado.

**Quadro 11 - Composições de agregados das argamassas desenvolvidas no estudo de Mendes *et al.* (2015a).**

Composições	Porcentagem retida nas faixas granulométricas (retido-passante)		
	0 – 0,15 mm	0,15 mm – 1,18 mm	1,18 mm – 4,75 mm
Sem Modificação	6,62	33,26	60,13
Contínuo	12,50	35,00	52,50
Descontínuo	12,50	0,00	87,50

Assim, a partir dos ensaios de fluidez e de reologia, verificou-se que a composição contínua apresentou melhor desempenho nos parâmetros de fluidez. Além disso, no estado endurecido apresentou massa específica aparente de 1850 kg/m<sup>3</sup>, valor inferior à mistura descontínua, acima de 2000 kg/m<sup>3</sup>. Desta forma, devido às suas características, decidiu-se incluí-la no estudo aqui realizado. As demais composições foram sendo desenvolvidas ao longo das características verificadas.

#### Composição da Argamassa

As argamassas foram produzidas com a mesma relação AGRM/cimento igual a 2, e utilizado os mesmos materiais que serão usados na produção do CAALR: Cimento Portland CP II E 32, AGRM e aditivo superplastificante SP2. O volume real produzido foi de 1,2 L, volume suficiente para realização dos ensaios de fluidez e reologia. A produção foi na argamassadeira de duas velocidades: 125 ± 10 rpm (alta) e 65 ± 5 rpm (baixa), com capacidade máxima de 5 L. As argamassas foram produzidas 3 vezes para cada composição de AGRM, a fim de assegurar os resultados. O procedimento de mistura seguiu o indicado no Quadro 12. Este visou à homogeneização prévia de todo material seco, com a colocação posterior da água de amassamento, separando 20% para lavagem do recipiente do aditivo, para evitar perdas de aditivo.

**Quadro 12- Procedimento de mistura das argamassas.**

<b>Ordem</b>	<b>Atividade</b>	<b>Velocidade de Mistura</b>	<b>Tempo (s)</b>
1	Colocação de materiais secos	Baixa	30
2	Sem parar, adiciona-se 80% da água	Baixa	60
3	Realização da limpeza das pás	Parada	30
4	Retorno à mistura	Baixa	30
5	Realização da limpeza das pás, colocação do Aditivo e dos 20% de água	Parada	30
6	Retorno à mistura	Baixa	30
7	Aumento da velocidade de mistura	Alta	150
<b>Tempo total (min)</b>			<b>6</b>

Os ensaios utilizados para avaliação da fluidez das argamassas foram o Funil V e tronco de cone, apresentados na Figura 31(a) e 31(b), respectivamente. No ensaio do Funil-V, após a abertura da saída do funil, foi medido o tempo do escoamento total da argamassa. No ensaio do tronco de cone, as argamassas não foram adensadas, devido à sua elevada fluidez. Após a liberação da argamassa, ao suspender o tronco de cone, o diâmetro de espalhamento alcançado foi medido, foram feitas três medidas de diâmetro, para determinação de um diâmetro médio de espalhamento.

**Figura 31 – Equipamentos para determinação dos parâmetros de fluidez: (a) Funil V para argamassas; (b) Minislump.**



Fonte: Próprio Autor.

A dosagem do aditivo foi determinada nas argamassas através da verificação do ponto de saturação. Ao aumentar a quantidade de aditivo na mistura, o escoamento é melhorado, diminuindo o tempo de fluxo através do funil V, e o diâmetro de espalhamento é aumentado. No entanto, ao ultrapassar um determinado limite de dosagem do aditivo, conhecido como ponto de saturação, o comportamento de fluxo do material não sofre mudanças significativas e/ou pode causar segregação da mistura.

Após a determinação do teor de aditivo das argamassas, elas foram ensaiadas em um reômetro programável, de pequeno porte, apresentado na Figura 32, onde foram determinadas as grandezas reológicas. Para os ensaios de reologia, foi empregado o *spindle* do tipo *T-bar* (disco), como apresentado na Figura 33.

**Figura 32 - Reômetro programável.**



Fonte: Próprio Autor.

**Figura 33 - *Spindle* do tipo *T-Bar*.**

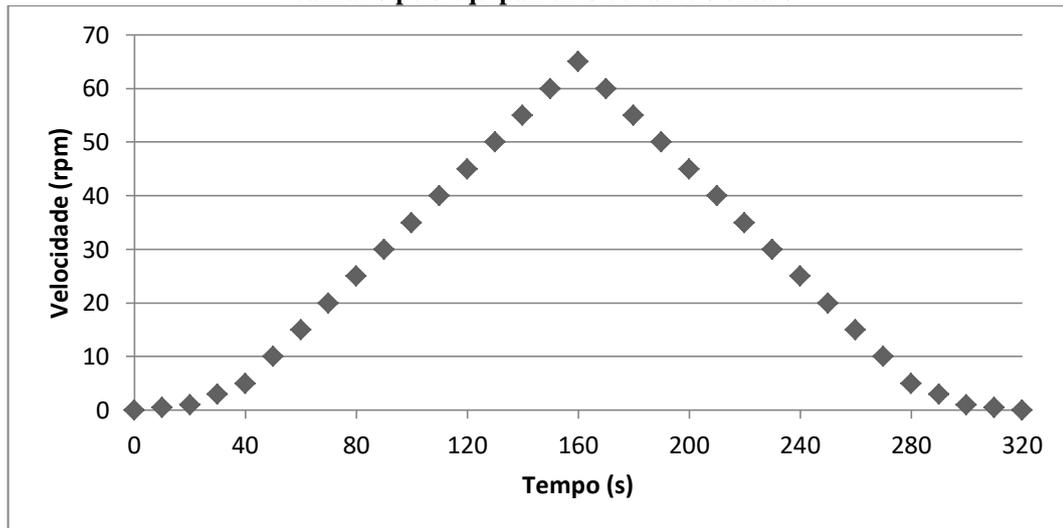


Fonte: Próprio Autor.

Antes de passar por o ensaio de ciclo de cisalhamento no reômetro, foi realizado um pré-cisalhamento na mistura, aplicando-se no *spindle* uma variação de velocidade entre 0 e 70 RPM, realizando uma homogeneização da mistura e a introdução de um estado de tensão, como forma de garantir as mesmas condições de ensaio para as argamassas.

O procedimento do ciclo de cisalhamento realizado está apresentado na Figura 34, onde foram realizadas leituras dos parâmetros de viscosidade e torque em velocidades especificadas, ao longo do processo de aceleração do sensor, onde a velocidade aumenta de 0 até 65 RPM, e do processo de desaceleração, de 65RPM até 0.

**Figura 34 - Ensaio de ciclo de cisalhamento, cada ponto representa um leitura de viscosidade e torque realizado pelo equipamento durante o ensaio.**



### 3.4.2 Estudo de quebra

Após a definição da argamassa, foi realizado o estudo de composição AGRM/AGRGR para o CAALR. Inicialmente, considerando a influência do misturador e do processo de mistura na homogeneização e integridade da composição dos agregados reciclados, foi desenvolvido um estudo em diferentes misturadores e intensidade para a verificação da quebra dos agregados reciclados.

Durante o processo de mistura é muito comum a quebra de agregados reciclados, apesar da pouca divulgação a esse respeito, verifica-se que esse efeito afeta consideravelmente a composição final dos agregados. Devido às características dos agregados reciclados utilizados, principalmente sua alta porosidade, que contribui para a baixa resistência do agregado, a verificação de quebra dos agregados e homogeneização da mistura é de grande importância para a determinação adequada do misturador e procedimento de mistura. Assim, dependendo da avaliação, o procedimento de sequência de colocação dos materiais e/ou o tipo de misturador poderão ser modificados para diminuir esse efeito nos agregados e garantir uma mistura mais homogênea.

O efeito de quebra altera a composição granulométrica dos agregados, transformando os agregados de maior dimensão em agregados de menor dimensão. Isto é verificado com mais intensidade nos agregados graúdos, aumentando o teor de agregado miúdo, e conseqüentemente, a quantidade de argamassa na mistura. O efeito de dispersão, homogeneização da mistura, é geralmente influenciado pelo misturador, quanto maior a

energia que o misturador impõe aos componentes da mistura maior o efeito de desaglomeração das partículas, principalmente de finos, que tende a se aglomerar na presença de água.

Neste sentido, visando verificar a quebra dos agregados e a alteração nas composições de agregados iniciais, ambos foram estudados em duas fases: 1) Avaliação do efeito do procedimento de mistura; e, 2) Avaliação do efeito do misturador. Para ambas, a avaliação e a determinação quantitativa da quebra dos agregados durante o processo de mistura foi através do procedimento apresentado na Figura 35. Basicamente, o método consiste em determinar a composição granulométrica e a massa dos agregados antes e após o processo de mistura. Após a mistura, o concreto passa por um processo de lavagem em peneiras com aberturas de 4,75mm. O material retido segue para secagem em estufa por 24h a 100°C. Em seguida, o material é pesado, e calculado a porcentagem de perda em cima do peso inicial.

**Figura 35 - Fluxograma de avaliação de quebra dos agregados.**



Fonte: Próprio Autor.

#### 3.4.2.1 Avaliação do efeito do tipo de misturador

Para avaliação da intensidade de mistura, foram utilizados dois tipos de misturadores, um de eixo vertical do tipo planetário e uma betoneira de eixo inclinado, apresentados na Figura 36(a) e 36(b), respectivamente. O misturador de eixo inclinado (betoneira) tem capacidade de 150 litros e rotação de tambor de 34 RPM, enquanto que o misturador de eixo vertical planetário (argamassadeira) tem a capacidade total 40 L (capacidade útil 22 L) e duas

velocidades,  $65 \pm 5$  RPM e  $125 \pm 10$  RPM. Foram produzidos concretos de mesma composição e com a mesma sequência de mistura – relação agregados/cimento igual a 2, relação AGRM/AGRM em massa igual a 1 (esqueleto granular em massa, com 50% AGRM e 50% AGRG), relação a/c 0,65 e aditivo superplastificante.

**Figura 36 – Misturadores utilizados no estudo. (A) Misturador de eixo vertical e planetário; (B) misturador de eixo inclinado, betoneira.**



Fonte: Próprio Autor.

A eficiência dos misturadores na produção de concretos fluídos foi avaliada através da comparação do ensaio de *SlumpFlow* dos concretos, produzidos em misturadores diferentes (argamassadeira e betoneira). Esta metodologia tem por objetivo avaliar a capacidade de dispersão e homogeneização dos concretos em equipamentos diferentes.

#### 3.4.2.2 Avaliação do Efeito do Procedimento de Mistura

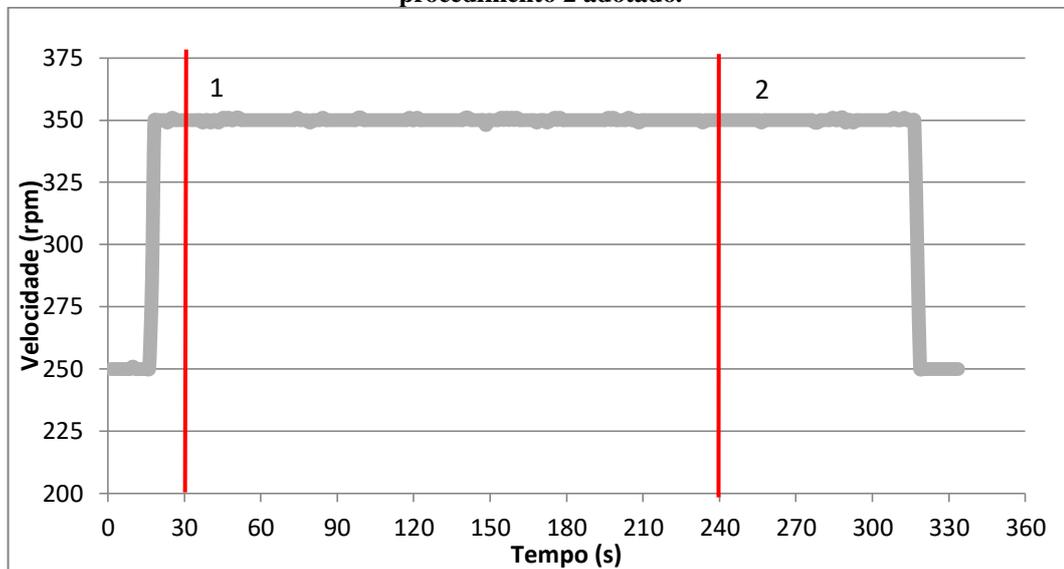
Para avaliar o efeito do procedimento de mistura na quebra dos agregados, foi utilizando o Reômetro Universal, apresentado na Figura 30. Foram produzidos dois concretos de mesma composição – relação agregados/cimento igual a 1, esqueleto granular em massa 50% AGRM e 50% AGRG, relação a/c 0,30 e aditivo superplastificante.

Os concretos foram produzidos alterando-se a ordem de colocação do AGRG, conforme os procedimentos de sequência descritos a seguir:

- Procedimento 1 – todos os materiais secos (cimento e agregados reciclados) entram no início da mistura. Aos 30 s foi colocada toda a água, como marcado na tarja 1 da Figura 37, e a mistura continua até atingir 330 s;

- Procedimento 2 – o cimento e o AGRM são colocados no início da mistura. Aos 30 s a água é colocada e aos 240 s o AGRG é colocado, conforme a tarja 2 da Figura 37, permanecendo na mistura por 90 s.

**Figura 37 - Procedimentos de misturas para avaliação do efeito de quebra do agregado. (1) Ponto de colocação da água para ambos os procedimentos adotados; (2) Ponto de colocação do AGRG do procedimento 2 adotado.**



Após cada procedimento a porcentagem de quebra dos agregados era determinada conforme procedimento apresentado no fluxograma da Figura 35. Devido a capacidade do Reômetro Poli-USP de realizar mistura, além dos dados coletados de variação de torque com o tempo, também foi realizada a captação de dados de torque ao longo do processo de mistura. Estes dados permitem verificar o que estava ocorrendo nos instantes de colocação dos materiais. Os resultados seguem apresentados no Item 4.

### 3.4.3 Composição dos agregados

Uma vez definido o procedimento de sequência e o tipo de misturador, seguiu-se determinando a composição dos agregados reciclados. Para isso, a composição de AGRM/AGRG foi determinada durante a própria produção do concreto. Inicialmente, foi adotada a porcentagem de 50 % em massa para ambos agregados (AGRM e AGRG) de acordo com as porcentagens determinadas em estudos prévios (GOMES, 2002; LISBOA, 2004; MONTEIRO, 2015). Os parâmetros especificados pela NBR 15823 (ABNT, 2010), para atendimento as propriedades de autoadensabilidade do CAA, foram os indicadores para selecionar qual a melhor composição de agregados para o CAALR.

### 3.5 PROPRIEDADES DO CONCRETO

Os CAALRs obtidos foram ensaiados para verificação do atendimento as propriedades no estado fresco e endurecido desejadas. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais (UFAL).

#### 3.5.1 No estado fresco

Os concretos foram ensaiados no estado fresco seguindo os ensaios apresentados no Quadro 13. O *Slump Flow* foi utilizado para avaliar a capacidade de o concreto se espalhar sob a ação do peso próprio, o Funil V para avaliar a resistência ao escoamento do concreto e a Caixa L para avaliar a habilidade de o concreto passar por obstáculos sem sofrer segregação.

A massa específica aparente no estado fresco foi medida a partir do cálculo da relação de massa/volume. Assim, foram utilizados os moldes de CP (10 cm x 20 cm) como recipientes. Eles foram medidos para determinação do seu volume, e foram pesados. Após serem preenchidos por concreto, sem haver adensamento, e rasados, então foram pesados novamente. Da pesagem final foi descontado o peso do molde vazio e realizado o cálculo da massa específica aparente no estado fresco.

**Quadro 13 - Ensaio de autoadensabilidade.**

<b>DETERMINAÇÃO</b>	<b>MÉTODO DE ENSAIO</b>
Slump Flow	NBR-15823-2/2010
Funil V	NBR-15823-5/2010
Caixa L	NBR-15823-4/2010

#### 3.5.2 No estado endurecido

Em termos de propriedades no estado endurecido, o Quadro 14 apresenta os ensaios que foram realizados, seguindo as normas da ABNT vigentes.

**Quadro 14 - Ensaio do concreto no estado endurecido.**

<b>DETERMINAÇÃO</b>	<b>MÉTODO DE ENSAIO</b>
Resistência à Compressão	NBR 5739/2007
Resistência à Tração por Compressão Diametral	NBR 7222/2011
Módulo de Elasticidade Estática	NBR 8522/2008
Absorção de água, índice de vazios e massa específica	NBR 9778/2009

Para os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade foram moldados aos 28 dias de idade. Os demais ensaios foram realizados apenas aos 56 dias, onde os corpos de prova utilizados para realização da resistência à tração foram os mesmos para determinação dos parâmetros de absorção de água, índice de vazios e massa específica.

## 4. RESULTADOS E ANÁLISES

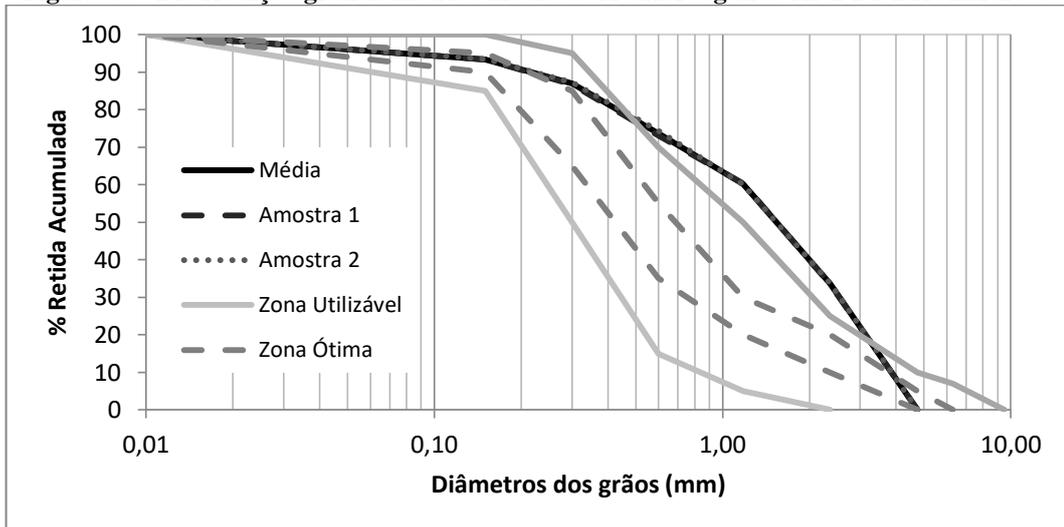
### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

#### 4.1.1 Distribuição Granulométrica

Como foi visto na metodologia, cinco métodos de ensaios foram aplicados para determinar e avaliar a distribuição granulométrica dos agregados e finos, e um para verificar a morfologia dos agregados reciclados. O objetivo disto é conseguir informações mais precisas sobre essas características que são importantes para o desenvolvimento do estudo.

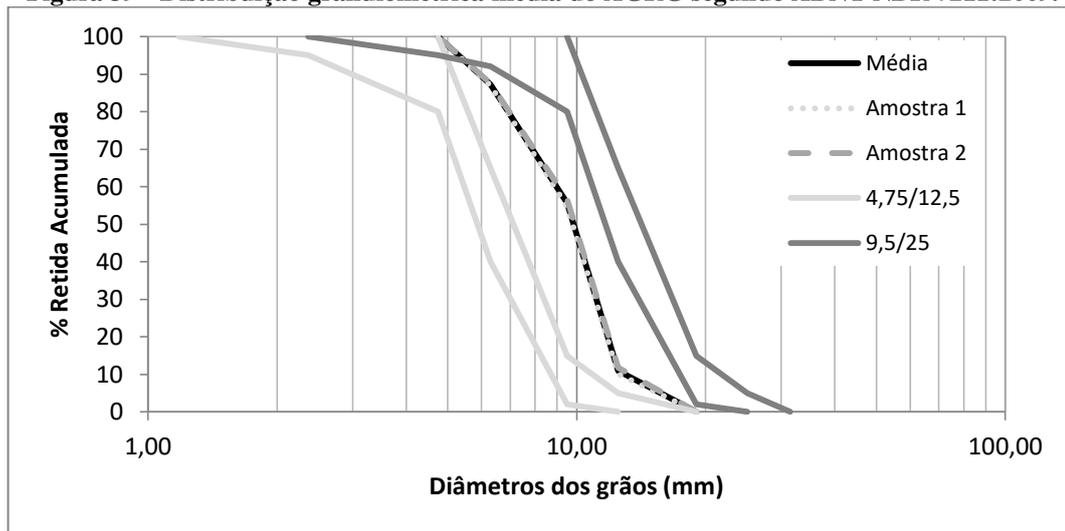
Pelo do método A, de acordo com a norma NBR 7211 (ABNT, 2009), foram determinadas as curvas de distribuição granulométrica do AGRM e AGRG, com o resultado da média obtida de duas amostras de agregados miúdos e graúdos, apresentadas nas Figuras 38 e 39, respectivamente.

**Figura 38 - Distribuição granulométrica média do AGRM segundo ANBT NBR 7211:2009.**



Fazendo uma análise segundo as prescrições da NBR 7211 (ABNT, 2009), observa-se na Figura 38 que a distribuição granulométrica do agregado miúdo não se enquadra dentro dos limites utilizáveis estabelecidos pela norma. O módulo de finura calculado foi de 3,48 e dimensão característica máxima foi de 4,75 mm. Este fato se deve ao procedimento de beneficiamento adotado, uma vez que já foi verificado em outros trabalhos que os processos de beneficiamento podem tornar os agregados reciclados semelhantes e melhores que os agregados naturais (ULSEN, 2011).

**Figura 39 - Distribuição granulométrica média do AGRG segundo ABNT NBR 7211:2009.**

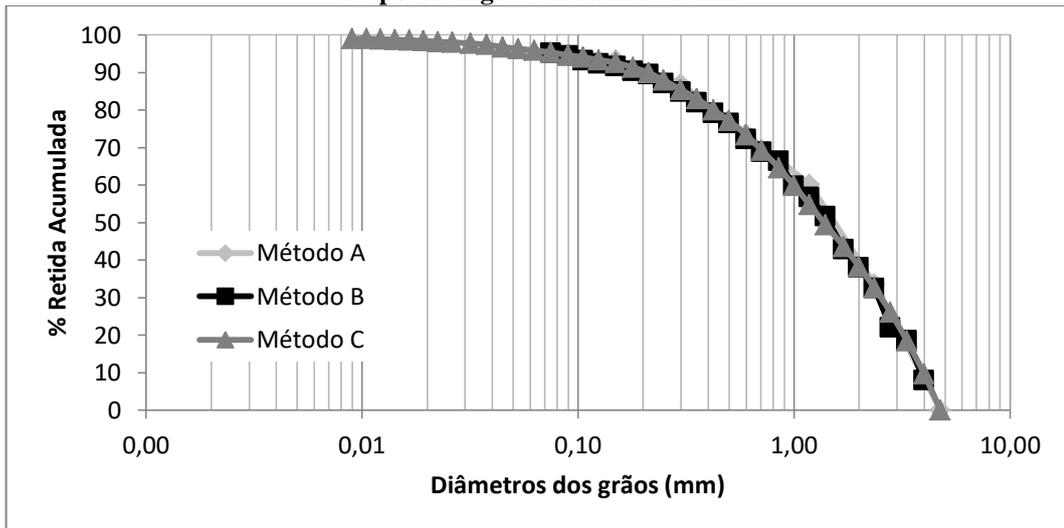


Realizando a mesma análise para a distribuição granulométrica do AGRG, verifica-se que o agregado não se enquadra em nenhuma faixa granulométrica estabelecida na mesma norma. Ficando entre as faixas 4,75/12,5 e 9,5/25, como mostrado na Figura 39. A dimensão característica máxima do AGRG foi 19 mm.

Pode ser observado que nos gráficos das Figuras 38 e 39, que não houve diferença significativa entre as amostras, mesmo sendo colhidas de alíquotas diferentes. Isto quer dizer que o processo de homogeneização do agregado reciclado foi eficiente, evitando assim, a variabilidade entre as alíquotas.

Na Figura 40 estão apresentadas as curvas de distribuição granulométrica do AGRM, em porcentagem retida acumulada, dos Métodos 'A', 'B' (maior número de peneiras) e 'C' (ADI e GL, para AGRM).

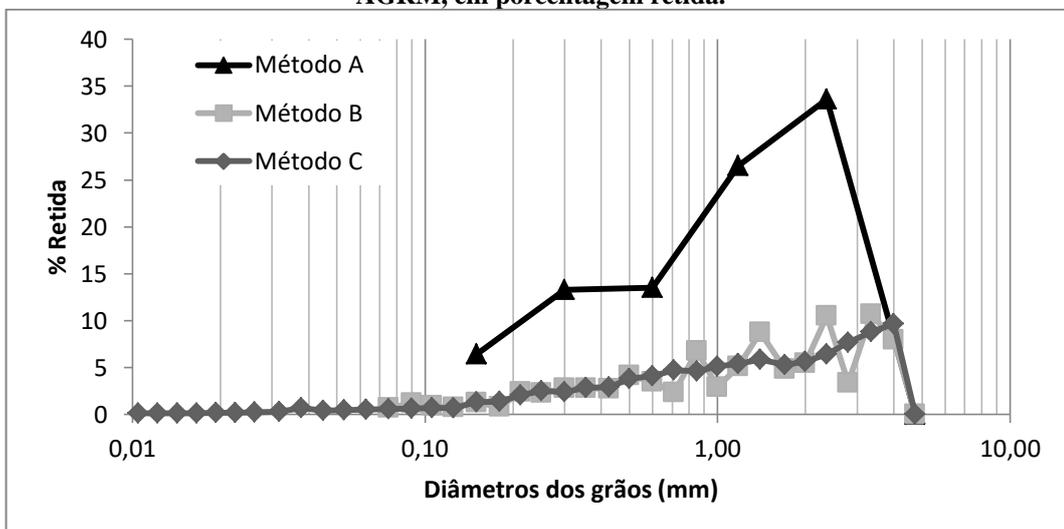
**Figura 40 – Comparação entre os métodos de determinação da distribuição granulométrica do AGRM, em porcentagem retida acumulada.**



Comparando-se as curvas, da Figura 40, verificam-se pequenas diferenças entre elas. A curva gerada pelo método 'A' apresenta pontos acima das demais entre as faixas 0,30 mm e 1,18 mm. Já a curva do método 'B' apresenta pontos abaixo das demais, mas muito próxima da curva do método 'C'. Mas, em geral, não se verificam diferenças significativas entre as curvas. Este fato é devido à soma das parcelas acumulada em cada uma das peneiras, que não permite uma identificação mais real da distribuição dos tamanhos das partículas.

No entanto, na Figura 41 ao se verificar os mesmos dados gerados pelos métodos de verificação da distribuição granulométrica do AGRM, mas agora em termos de porcentagem retida, pode ser observada a diferença entre as curvas.

**Figura 41 - Comparação dos métodos utilizados para determinação da distribuição granulométrica do AGRM, em porcentagem retida.**

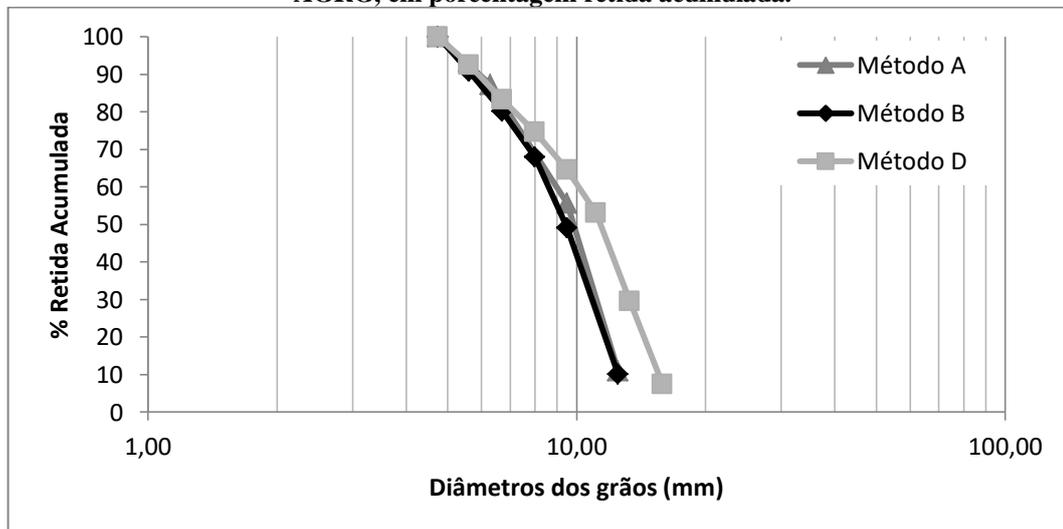


Na Figura 41, verifica-se que há uma diferença considerável entre as curvas obtidas por cada método. É observado que quanto mais subdivisões apresentam o método, caso dos Métodos B e C, mais as curvas geradas por eles se aproximam, distanciando das curvas gerados por métodos com poucas subdivisões.

Isto se deve ao fato de que pelo Método A, por apresentar menos subdivisões, uma grande quantidade fica retida uma única faixa granulométrica, verificada pelos pontos mais elevados da curva. Assim, quanto mais subdivisões, maior a quantidade de pontos analisados, menor a amplitude (em porcentagem) destes pontos e mais suave a curva, caso do método 'C'.

Em relação ao AGRG, a Figura 42 apresenta curvas obtidas pelos métodos 'A', 'B' e 'D' (ADI). Comparando-se as curvas, observa-se um descolamento da curva do método 'A' para direita, em relação às demais. As curvas geradas pelos métodos 'B' e 'D' apresentam diferenças mínimas.

**Figura 42 - Comparação dos métodos utilizados para determinação da distribuição granulométrica do AGRG, em porcentagem retida acumulada.**

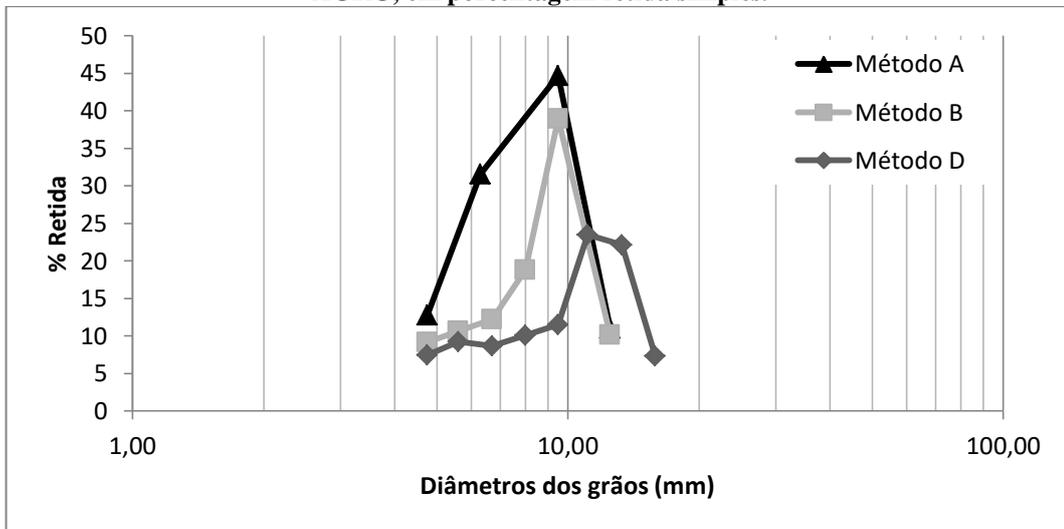


Neste caso, o comportamento inicialmente observado para AGRM não ocorreu, onde a porcentagem retida acumulada tendeu a deixar as curvas muito próximas. A quantidade de subdivisões, para analisar o AGRG, para os três Métodos são muito próximas, e pequenas em comparação aos métodos utilizados no AGRM. Assim, a tecnologia ADI empregada deve ser a maior responsável pelo resultado obtido.

Na Figura 43 estão apresentados os mesmos dados obtidos pelos métodos 'A', 'B' e 'D', mas em curvas de distribuição granulométricas em porcentagem retida. Assim, como visto na Figura 40, para o AGRM, quanto mais subdivisões apresenta o método, maior a quantidade de

pontos analisados e menor a amplitude entre os pontos, a curva gerada pelo método 'D' para o AGRG permaneceu abaixo das demais.

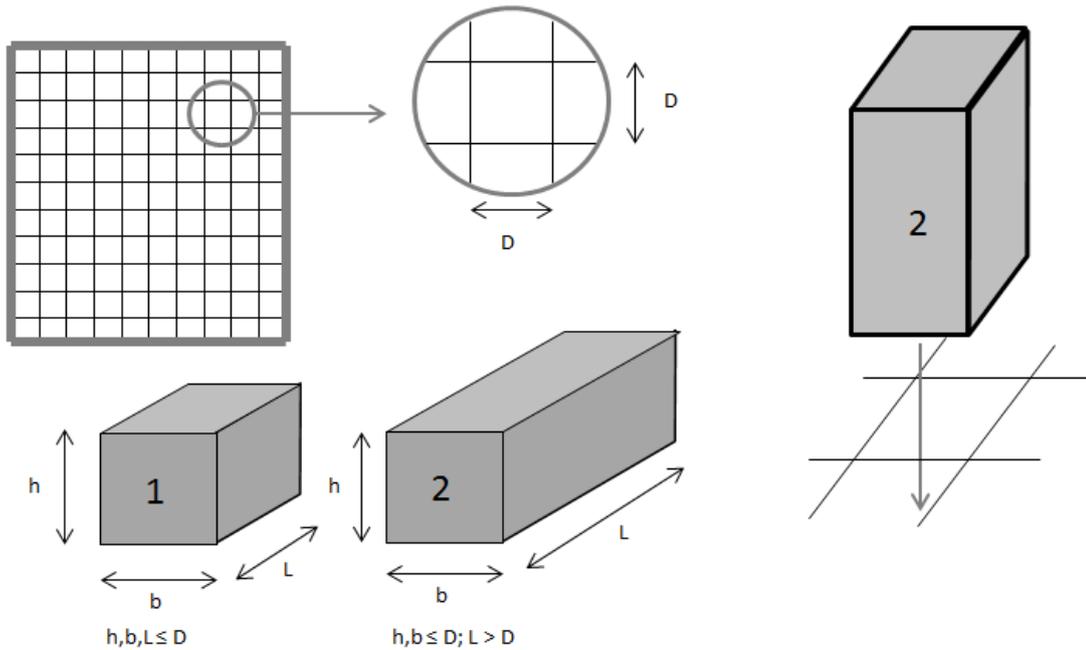
**Figura 43 - Comparação dos métodos utilizados para determinação da distribuição granulométrica do AGRG, em porcentagem retida simples.**



Ainda na Figura 43, verifica-se o mesmo processo de deslocamento da curva para a direita, confirmando o que foi apresentado para as curvas de material retido acumulado, na Figura 42. Podendo-se ser observada a presença de um ombro, após a dimensão de 12,5 mm, com porcentagem elevada, de 22% de material retido, excedendo a quantidade observada nas peneiras.

O surgimento do deslocamento para direita nas curvas apresentadas nas Figuras 42 e 43 pode ser explicado pela diferença que existe entre os métodos de análise com o uso de peneiras e a ADI. Na Figura 44 pode-se observar que a abertura da peneira é quadrada, de lado D, no entanto duas partículas, 1 e 2, de tamanhos diferentes podem passar pela mesma abertura.

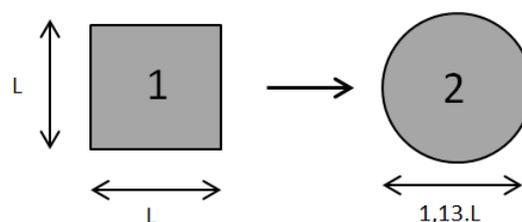
**Figura 44 - Análise do processo de peneiramento.**



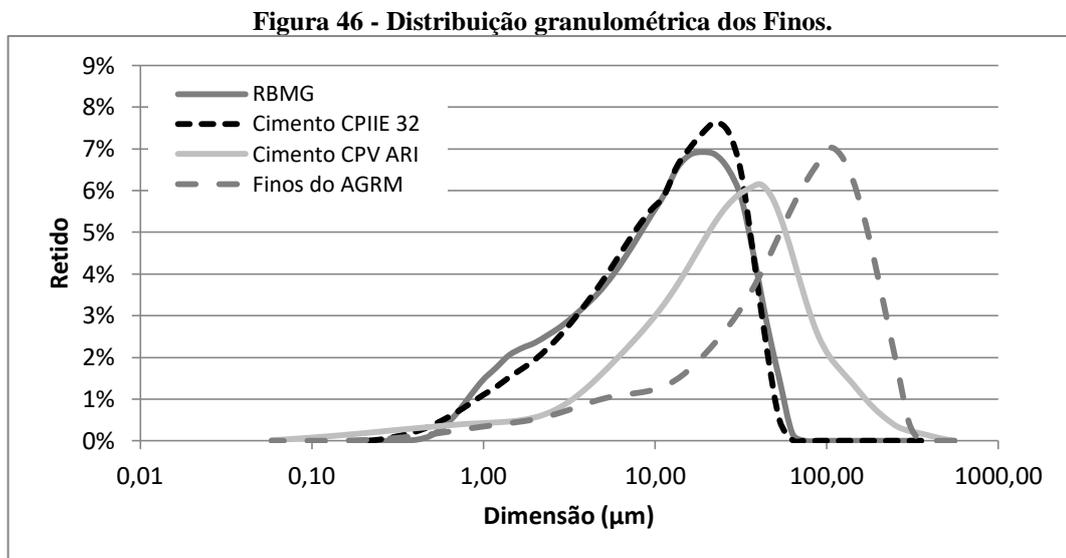
Pode-se verificar que a partícula 1 apresenta todas as suas dimensões (altura, largura e comprimento) inferiores a  $D$ , logo, esta partícula passará pela abertura da peneira. Já a partícula 2 apresenta uma de suas dimensões superior a  $D$ , logo, a depender a posição com que chegue na peneira, pode ser que ela fique retida ou passe, como é o caso de elas passarem com face de menor área, como pode ser visto na Figura 44. Assim, o processo de peneiramento permite a passagem das partículas onde uma de suas dimensões características seja maior que sua dimensão de abertura, este fato faz com que os Métodos A e B se pareçam tanto na comparação.

No entanto, pelo método ADI, fazendo uso da análise por EQPC, esta consideração não é válida. Na Figura 45, pode-se verificar a análise por EQPC da seguinte forma, considerando a partícula 1 como uma partícula quadrada de lado  $L$ , sendo  $L$  igual a abertura de uma peneira qualquer, e uma partícula 2, circular. Para que esta partícula 2 apresente a mesma área que a partícula 1, ela deverá ter diâmetro  $1,13.L$ , sendo verificada como uma partícula de maior dimensão, justificando a presença do deslocamento nas curvas do AGRG pelo método  $D'$ .

**Figura 45 – Análise realizado pelo método ADI, formulação EQPC.**



Na Figura 46 estão apresentados os resultados das distribuições granulométricas dos materiais finos (cimento e RBMG), juntamente com os Finos do AGRM. Nestes materiais foi aplicado o método 'E'(GL).



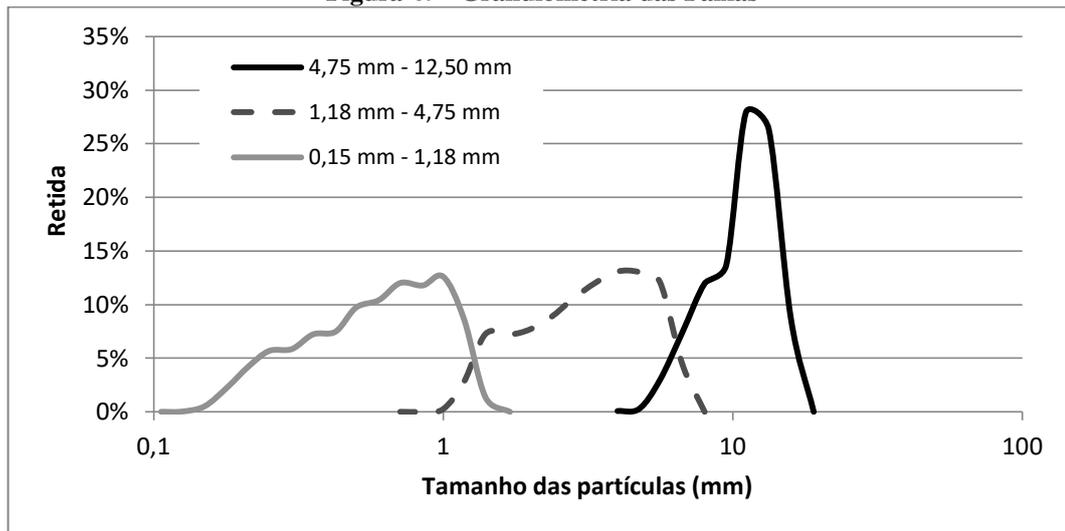
Observa-se que o RBMG apresenta granulometria próxima a do cimento CP-II-E-32, com maior presença de partículas de 16 µm. Os finos do AGR apresentam partículas maiores, com maior presença de 100 µm.

#### 4.1.2 Morfologia dos Agregados

No estudo de morfologia dos agregados reciclados, através dos métodos de imagem (ADI), foram obtidos parâmetros indicativos de morfologia, relação de aspecto ( $b/l$ ) e esfericidade. Vale ressaltar que as partículas inferiores a 0,15 mm não foram analisadas devido a limitação do equipamento.

O agregado foi separado em faixas granulométricas, as quais também serviram de base para realização do estudo de variação das composições dos agregados na produção das argamassas e concretos. Na Figura 47 estão apresentadas as curvas de distribuição granulométrica das faixas de agregados analisados.

**Figura 47 - Granulometria das Faixas**



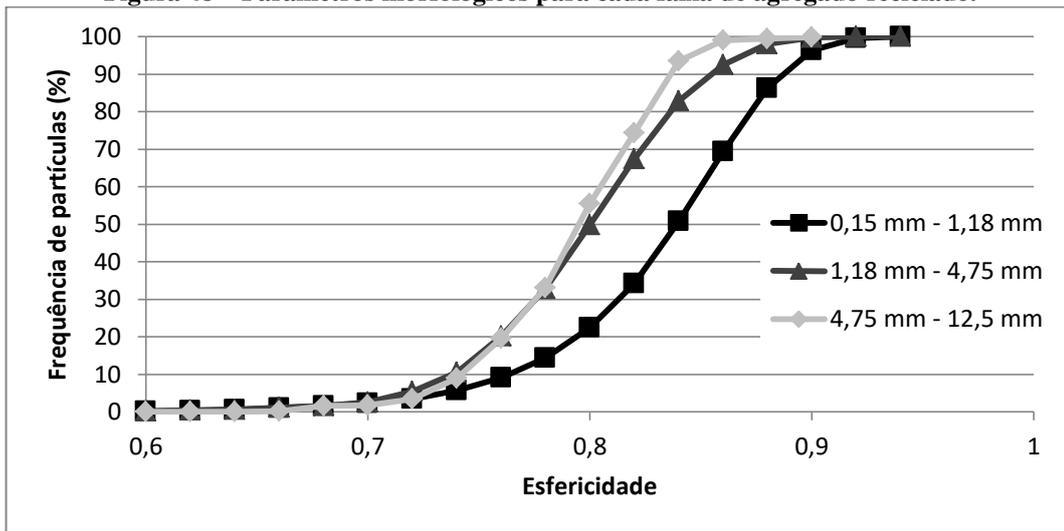
As curvas das faixas granulométricas apresentam distribuição apropriada ao tamanho de partículas, havendo maior quantidade de partículas próximas ao limite da faixa. Nenhuma das curvas apresenta falta de partículas em uma dimensão dentro da faixa.

Na Figura 48 e 49 estão apresentados os resultados dos parâmetros morfológicos para cada faixa de divisão granulométrica dos agregados reciclados analisada na Figura 47. Nos gráficos, foi realizada a relação entre os parâmetros de morfologia – esfericidade e relação de aspecto ( $b/l$ ) – e a frequência de partículas para faixas de valores determinadas.

Os resultados de esfericidade estão apresentados na Figura 48. Observa-se que a faixa de agregado 0,15 mm – 1,18 mm apresentam cerca de 80% de suas partículas com esfericidade superior a 0,80. As demais faixas analisadas apresentam relação de partículas e esfericidade bastante semelhantes, com cerca de 50% de suas partículas com esfericidade acima de 0,80.

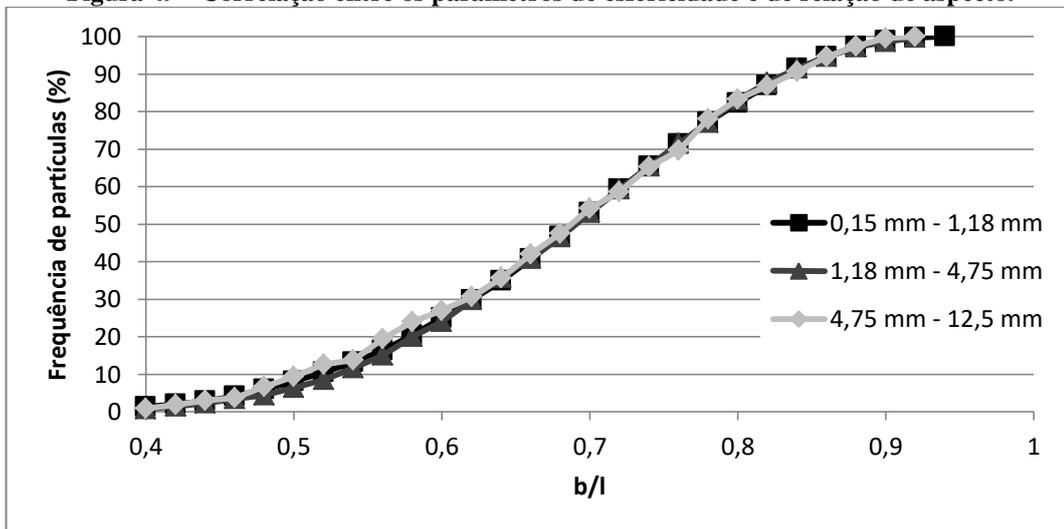
A presença de maior quantidade de partículas com esfericidade acima de 0,80, na faixa 0,15 mm – 1,18 mm podem ser justificadas pelo procedimento de beneficiamento do resíduo utilizado. Geralmente, as partículas presentes nesta faixa passaram por maior choque mecânico, o que causou maior desgaste de sua superfície, tornando-a mais arredondada.

**Figura 48 – Parâmetros morfológicos para cada faixa de agregado reciclado.**



Os parâmetros de relação de aspecto ( $b/l$ ) estão apresentados na Figura 49. As curvas apresentadas mostram que as relações entre a frequência de partículas de  $b/l$  são iguais nas três faixas granulométricas analisadas.

**Figura 49 - Correlação entre os parâmetros de esfericidade e de relação de aspecto.**



Observando-se os gráficos das Figuras 48 e 49 é possível constatar, com base no processo de beneficiamento adotado e nas características dos agregados, que existe correlação entre a esfericidade e a relação de aspecto, no entanto, esta varia com a dimensão do agregado.

O Quadro 15 apresenta o resumo dos resultados obtidos, através dos valores médios dos parâmetros de morfologia, a partir de uma média ponderada. Pode-se observar que não existe diferença entre os valores médios dos parâmetros de morfologia de cada faixa, assim sendo, não existe diferença na forma entre as faixas de agregados.

**Quadro 15 – Valores médios da morfologia dos Agregados.**

<b>Faixa (retida-passante)</b>	<b>Esfericidade Média</b>	<b>Relação de Aspecto Média</b>
0,15 mm - 1,18 mm	0,830	0,682
1,18 mm - 4,75 mm	0,797	0,684
4,75 mm - 12,5 mm	0,792	0,678

#### 4.1.3 Massa Específica

Para o ensaio de picnometria de gás hélio, como apresentado no item 3.4.2, a amostra de agregado reciclado ensaiada foi obtida a partir do quarteamento do material completo, sem haver separação em gráudo e miúdo. Como a picnometria de gás hélio permite a verificação do volume verdadeiro ocupado pelas partículas, assim, mesmo separando entre gráudo e miúdo não haveria modificação da massa específica, pois a composição é a mesma, se tratando da massa específica real dos agregados.

O Quadro 16 apresenta os resultados de massa específica real obtidas pela picnometria de gás hélio dos materiais finos (cimento e RBMG) e agregados reciclados (AGR), ambos em condição seca. Para todos os materiais, o desvio padrão das medições realizadas foram inferiores a 0,01 g/cm<sup>3</sup>. Observa-se que dentre os materiais analisados, os cimentos apresentam maior massa específica real, e o AGR e o RBMG apresentam valores menores.

**Quadro 16 - Massa específica real dos materiais secos.**

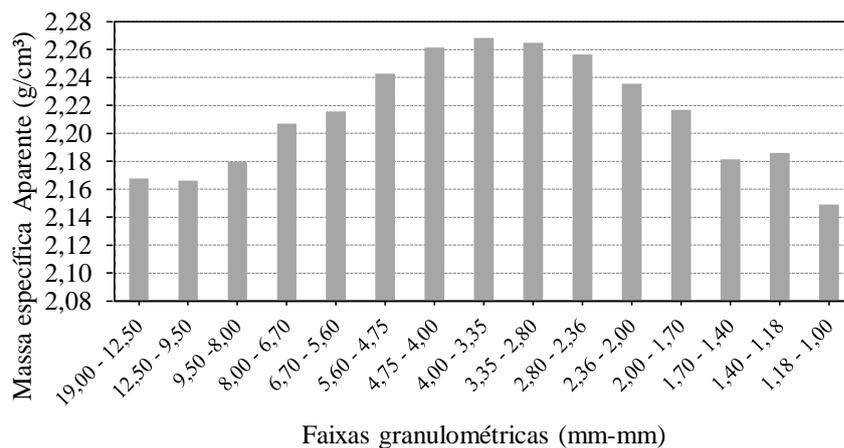
<b>Materiais</b>	<b>Massa Específica Real (g/cm<sup>3</sup>)</b>
RBMG	2,67
Cimento CP II-E-32	2,97
Cimento CP V-ARI	2,96
AGR	2,62

Os cimentos, como esperado, apresentaram maior massa específica, e próxima a 3 g/cm<sup>3</sup>, comumente verificado em trabalhos científicos. O RBMG, resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (mármore e granitos) apresentou valor próximo aos dos agregados naturais e de peso normal. O AGR apresentou valor inferior ao do RBMG, mesmo sendo composto em sua maior parte por agregados naturais, devido à presença de pasta cimento.

Já no ensaio de picnômetro de pó, considerando o volume ocupado pelo envelope (camada mais externa do agregado, contendo poros permeáveis e impermeáveis internamente), os AGRs foram separados em várias frações, para verificar o efeito da granulometria na massa específica aparente. Mas devido à restrição do equipamento, mostrada na metodologia, a medição foi realizada em partículas de diâmetros superiores a 1 mm.

Na Figura 50 estão apresentados os valores massa específica aparente, que foram obtidos através de três medições consecutivas, havendo medidas com variações inferiores a 1%.

**Figura 50 - Gráfico da variação da massa específica aparente das partículas.**



Pode-se verificar que as faixas dos AGRs apresentam massas específicas aparentes diferentes. Assim, pode-se constatar que existem faixas que apresentam partículas mais porosas e outras menos porosas, devido a não uniformidade do AGR em relação ao agregado natural, já verificada por outros autores (CARRIJO, 2005; ANGULO, 2001). A presença de pasta de cimento (porosa), morfologia e processo de cominuição podem influenciar nos valores obtidos.

Pode-se observar pelas densidades medidas, que as partículas mais porosas dos AGRG e ARGM se encontram nas faixas granulométricas das partículas mais grossas e nas mais finas, respectivamente, caracterizando as partes mais leves dos AGR. O valor médio (média ponderada) da massa específica aparente entre as faixas granulométricas das partículas do AGRG, foi de 2,19 g/cm<sup>3</sup> e as do AGRM, até 1 mm, foi de 2,23 g/cm<sup>3</sup>. Esses valores são considerados inferiores aos obtidos geralmente para agregados naturais, no entanto, são classificados como agregados de densidade normal, segundo a NBR 9935 (ABNT, 2011).

Os resultados obtidos pelos ensaios prescritos pela ABNT estão apresentados no Quadro 17, sendo valores médios entre duas medições, como apresentado no Item 3. O desvio entre as repetições ficaram de acordo com o estabelecido nas normas.

**Quadro 17 - Massa Específica pela ABNT.**

<b>PROPRIEDADES</b>	<b>AGRGR</b>	<b>AGRM</b>
Massa Específica Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,11	2,27
Massa Específica Real (g/cm <sup>3</sup> )	2,47	2,50

A massa específica real do AGRGR e do AGRM apresenta valores próximos, no entanto, o AGRGR apresenta massa específica aparente inferior. A alta porosidade do AGRGR pode justificar este valor. A realização do ensaio com água pode apresentar algumas limitações, visto que alguns agregados podem demorar mais de 24h para que os seus poros possam ser preenchidos com água.

#### 4.1.4 Absorção de Água dos Agregados

Através dos ensaios normativos, NBR NM 30 (ABNT,) E NBR NM 53 (ABNT,) foi verificado que a absorção, respectivamente, do AGRM foi de 7,3% ( $\pm 0,2\%$ ) e do AGRGR 6,9% ( $\pm 0,1\%$ ).

Estes valores estão de acordo com a absorção encontrada por outros autores (CARRIJO, 2005; ANGULO, 2001). Como não há a presença de agregado graúdo natural neste resíduo, os valores de absorção encontrados são comparáveis aos encontrados pelos autores para agregado reciclado miúdo reciclado, de agregados cinzas.

#### 4.1.5 Conclusões

Quanto à distribuição granulométrica, verificou-se que tanto o AGRM quanto o AGRGR, não se enquadraram aos parâmetros de distribuição requeridos NBR 7211 (ABNT, 2009), para o processo de beneficiamento adotado. O AGRM ficou fora da zona de utilização e o AGRGR no das zonas de classificação. Assim, pode-se chegar às seguintes observações:

- O processo de cominuição resultou em AGRGR de dimensão máxima de 19 mm, com distribuição contínua, melhor verificada no gráfico de porcentagem retida, Figura 43;
- O AGRM pode ser caracterizado como um agregado miúdo grosso, com maior concentração de partículas acima 1,18 mm, cerca de 60% do todo, de distribuição contínua;

- Devido ao processo de beneficiamento adotado, o AGRM apresentou baixo teor de materiais finos, o que poderá causar falta de pasta, o que é crucial para obtenção do CAA. Desta forma, um estudo de composição será necessário para melhorar a distribuição do AGRM. Os materiais finos utilizados para suprir a necessidade serão os materiais finos do próprio AGRM (partículas abaixo de 0,15 mm) e o RBMG;
- Foram verificados que ambos os finos apresentam distribuição contínua, onde o RBMG apresenta partículas nas dimensões das do cimento, e os finos do AGRM partículas maiores, em maior frequência em 0,10 mm.

As análises realizadas através dos métodos ADI e GL se mostraram mais comparáveis que as aplicadas pela NBR 7211 (ABNT,2009). Além da praticidade e rapidez com que os ensaios são executados, a possibilidade de verificar quantidade maior de faixas granulométricas melhora a percepção que se tem do material.

Quanto aos parâmetros de formas do AGR, pode-se verificar que o valor de esfericidade de 0,80 classifica o AGR como um agregado de superfície com poucas reentrâncias. E, quanto à relação de aspecto, de valor próximo a 0,70 classifica as suas partículas como pouco alongadas.

Ainda se verificou que a faixa com a menor dimensão de partículas apresentou maior valor de esfericidade média. Provavelmente, foi a fração que sofreu maior o atrito mecânico durante o processo de cominuição, causando maior desgaste superficial, reduzindo as reentrâncias da superfície de maneira mais eficiente.

Já a massa específica, quando comparados os valores encontrados nas metodologias, as seguintes considerações podem ser observadas:

- As comparações entre os resultados realizados com gás, água e pó, são difíceis de serem realizadas, pois analisam fases distintas dos agregados. Além disso, a utilização de água com agregados de elevada porosidade, com a presença de pasta cimento, podem resultar em resultados errados, água leva mais tempo para preencher os poros em comparação com o gás sob pressão;
- Quanto à massa específica aparente, verificou-se que a depender da dimensão das partículas, ela modifica. Provavelmente, a composição química e mineralógica dos agregados pode variar, havendo maior presença de pasta em determinadas faixas granulométrica.

## 4.2 FORMULAÇÃO E OBTENÇÃO DO CAA

Obtido, nos itens anteriores, os dados de caracterização dos agregados reciclados e dos demais materiais utilizados como componentes do CAALR, e seguindo o que foi apresentado na metodologia para formulação do CAALR. Este item apresentará as dosagens das argamassas e as composições dos agregados reciclados que juntos vão compor a dosagem do CAALR.

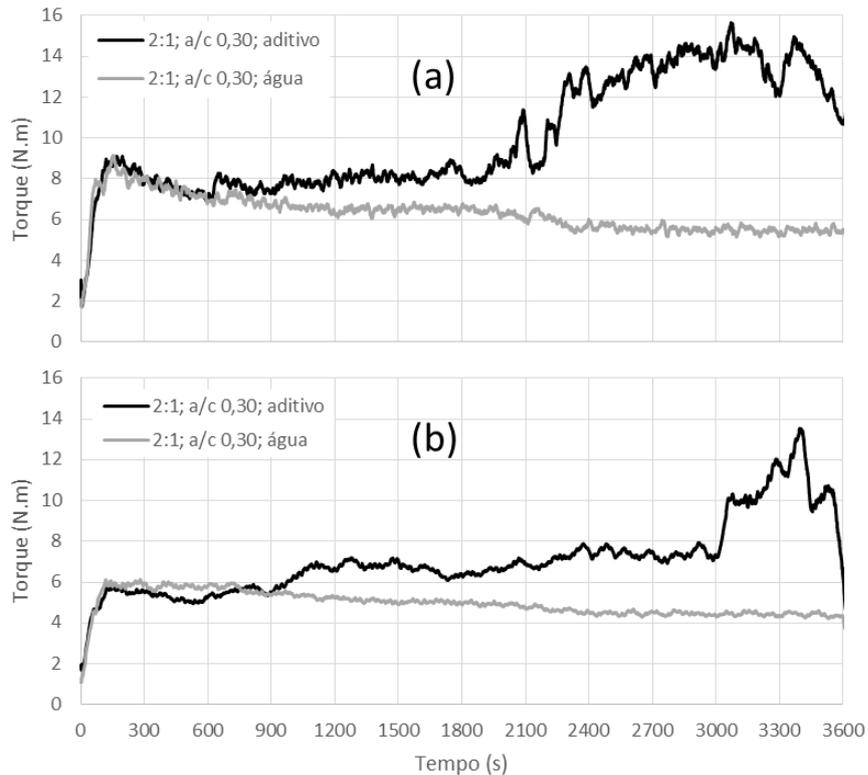
### 4.2.1 Argamassa

Seguindo o exposto na metodologia, inicialmente, em uma 1ª Etapa, foram selecionadas as relações a/c 0,30 e 0,47, em função das propriedades fluidas e reológicas, avaliando o comportamento do AGRM dividido em duas faixas de granulometria. Em seguida, na 2ª etapa, foram determinadas, em argamassas com diferentes composições granulométricas do AGRM, a composição do AGRM, dosagem de superplastificante e a dosagem do resíduo RBMG.

#### 1ª Etapa – Seleção da relação a/c

Conforme explicado na metodologia, as argamassas foram produzidas para duas faixas de AGRM, separadamente, 1,18 mm – 4,75 mm e 0,15 mm – 1,18 mm. Para cada faixa, foram produzidas argamassas com relação a/c 0,30 e 0,47. Para cada argamassa foi avaliado o torque em função do tempo, considerando os acréscimos de água e de aditivo. A Figura 51 apresenta as curvas de torque para as argamassas com relação a/c 0,30.

**Figura 51 – Curvas reológicas das argamassas produzidas com fator a/c 0,30: (a) AGRM 1,18 mm – 4,75 mm; (b) AGRM 0,15 mm – 1,18 mm.**



Observa-se, que as argamassas de mesma faixa granulométrica apresentam o mesmo comportamento inicialmente, seja ela com acréscimo de água ou aditivo. Na Figura 51(a), pode-se verificar este evento, onde próximo aos 150 s as argamassas atingem torque próximo a 9 N.m e suas curvas permanecem sobrepostas até os 600 s. O mesmo pode ser visto na Figura 51(b), no entanto, as curvas permanecem sobrepostas até próximo aos 300 s.

A partir dos 600 s é verificada uma alteração do comportamento das argamassas, onde elas recebem a primeira incorporação de aditivo/água. Nas Figuras 51(a) e 51(b), observa-se que as argamassas com inserção temporal de aditivo aumentam de torque consideravelmente. Da mesma forma, pode-se verificar, nas mesmas Figuras, que as argamassas com inserção temporal de água, começam a reduzir o torque gerado a partir dos 900 s.

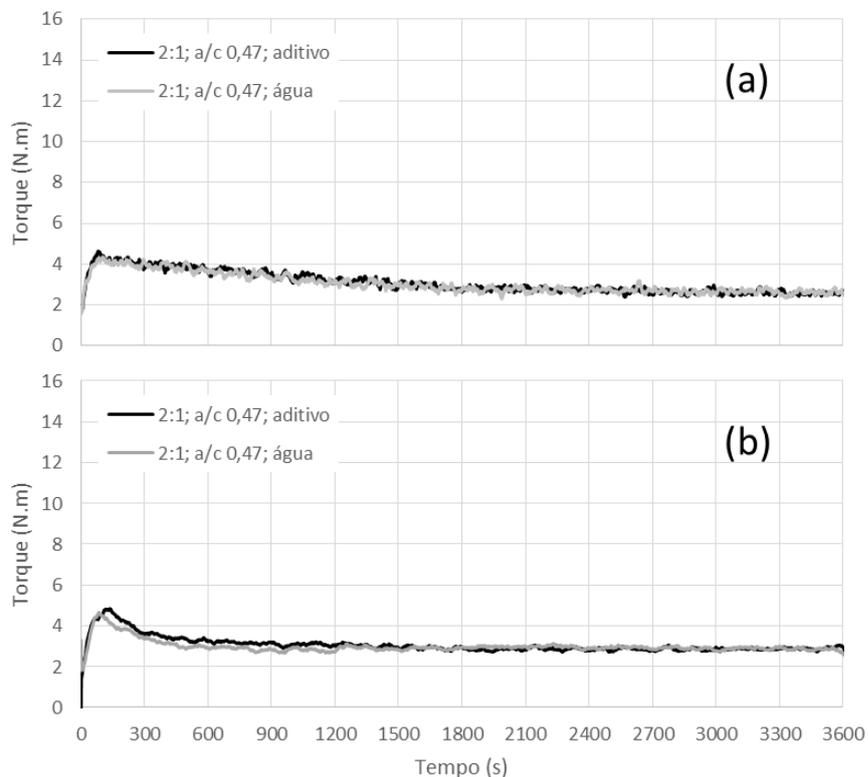
Desta forma, pode-se concluir:

- As argamassas com inserção de aditivo apresentaram aumento de torque com o tempo. Este fato pode ser devido ao efeito da absorção de água de amassamento, a pequena quantidade de água e o atrito entre as partículas;

- O aumento de torque foi mais intenso para o AGRM 1,18 mm – 4,75 mm. O tamanho das partículas provavelmente apresenta a maior influência neste fenômeno. Partículas maiores provocam maior choque mecânico no processo de mistura, aumentando torque necessário para realização da mistura, e quando há perda de água de amassamento por conta do teor de absorção de água do agregado, reduz-se a quantidade de pasta necessária para lubrificação entre as partículas, aumentando o torque mais uma vez.

As argamassas com relação a/c 0,47 seguiu o mesmo procedimento descrito das argamassas anteriores. As curvas de torque dessas argamassas estão apresentadas na Figura 52.

**Figura 52 - Argamassas produzidas com fator a/c 0,47: (a) Argamassa com AGRM 1,18 mm – 4,75 mm; (b) Argamassa com AGRM 0,15 mm – 1,18 mm.**



Nas Figuras 52(a) e 52(b) pode-se verificar que não houve modificações significativas entre as curvas com inserção de aditivo e água, para cada faixa de AGRM. Na Figura 52(a) as curvas das argamassas começam a reduzir de torque logo após a homogeneização do agregado com a pasta de cimento, ao passo que são incrementados água e aditivo o torque continua baixando, até se estabilizar próximo a 3 N.m aos 1800s, onde as argamassas já apresentavam segregação. Na Figura 52(b) verifica-se efeito semelhante ao vistos na Figura 52(a), no entanto, aqui o torque se estabilizou em 3 N.m já aos 900s.

Assim, pode-se concluir que:

- A relação a/c 0,47 aumentou a quantidade de pasta da argamassa, reduzindo o atrito entre as partículas e reduzindo o efeito da absorção de água do agregado, sendo assim interessante o seu uso para o início dos trabalhos em argamassa, tomando-se cuidado com a quantidade de aditivo a ser incorporado para evitar segregação;
- As argamassas com AGRM 1,18 mm – 4,75 mm necessitaram de mais tempo para estabilizar o torque, apresentando maior resistência ao fluxo em relação ao AGRM 0,15 mm – 1,18 mm, devido as suas características já citadas.

Assim, com os resultados obtidos aqui, foi verificado que AGRM 1,18 mm – 4,75 mm apresentar características que podem dificultar os parâmetros de fluidez exigidos para chegar-se ao CAALR, havendo a necessidade de se estudar a composição granulométrica do AGRM, tentando reduzir esta parcela da composição.

A relação a/c 0,47 é o suficiente para garantir a fluidez e estabilidade da argamassa. Por se tratar de um valor não usual, será adotada relação a/c 0,50, muito utilizada nas argamassas e concretos autoadensáveis (MELO, 2005; GOMES; BARROS, 2009). Há a necessidade de se realizar o estudo do teor de aditivo, para garantir o melhor desempenho da argamassa sem que haja segregação.

## 2ª Etapa – determinação da Composição da argamassa

Nesta etapa, as composições dos AGRM e a dosagem de aditivo e do RBMG foram determinadas. As composições dos AGRM, para as faixas indicadas, foram alteradas de acordo com a metodologia apresentada. A porcentagem de cada faixa retida-passante, considerando que o material fica retido na menor dimensão e passante na maior dimensão, como mostrada no Quadro 17.

A composição ARSM, como apresentado na metodologia, foi a composição utilizada para a produção da argamassa de base, a partir dela foram desenvolvidas as demais composições. Como visto na 1ª Etapa, os agregados de dimensão entre 1,18 mm e 4,75 mm apresentaram comportamento que prejudica a obtenção dos parâmetros de fluidez, desta forma, as composições tiveram como objetivo reduzir a quantidade desta faixa de agregados e aumentar a quantidade de finos, com e sem a utilização do RBMG.

Pode-se verificar que a composição ARSM apresenta maior quantidade de agregados acima de 1,18 mm, cerca de 60%. A composição ARF apresenta a menor quantidade desta faixa, devido a retirada dos agregados acima da dimensão 2,36 mm. Já a composição ARR, não houve a modificação do agregado, mas 15% dele foi substituído por RBMG, que por se tratar de um material fino teve como objetivo aumentar o volume de pasta da argamassa.

A modificação do AGRM para chegar-se a composição ARM necessita de grande trabalho de separação com peneiras, o que demanda muito tempo e energia. Assim, decidiu-se utilizar o RBMG em substituição de 6,31% do AGRM original (sem modificação de sua composição), para se equiparar na quantidade de finos abaixo de 0,15 mm de 12,50%, chegando-se a composição ARMR. Mesmo não realizando nenhuma alteração do AGRM na composição ARMR, pode-se observar no Quadro 11, que as proporções das faixas ficaram muito próximas e menor porção de AGRM 1,18 mm – 4,75 mm, em comparação com ARSM.

#### Composição da Argamassa

Como foi apresentada, a relação a/c e as composições do AGRM foram obtidas buscando uma melhor adequação das faixas granulométricas, reduzindo a porção mais grossa, que foi verificada como a parcela que mais dificulta as propriedades de fluidez, e aumentando a mais fina do AGRM. As argamassas com relações c/AGRM e a/c de 0,50, foram avaliadas com relação aos parâmetros de fluidez, Quadro 18, e reológicas, Figuras 53, 54 e 55. Para essas argamassas as dosagens de superplastificante, no ponto de saturação, em função também destes parâmetros, foram determinadas e são apresentadas no Quadro 18.

**Quadro 18 – Propriedades de Fluidez e dosagem de aditivo das argamassas.**

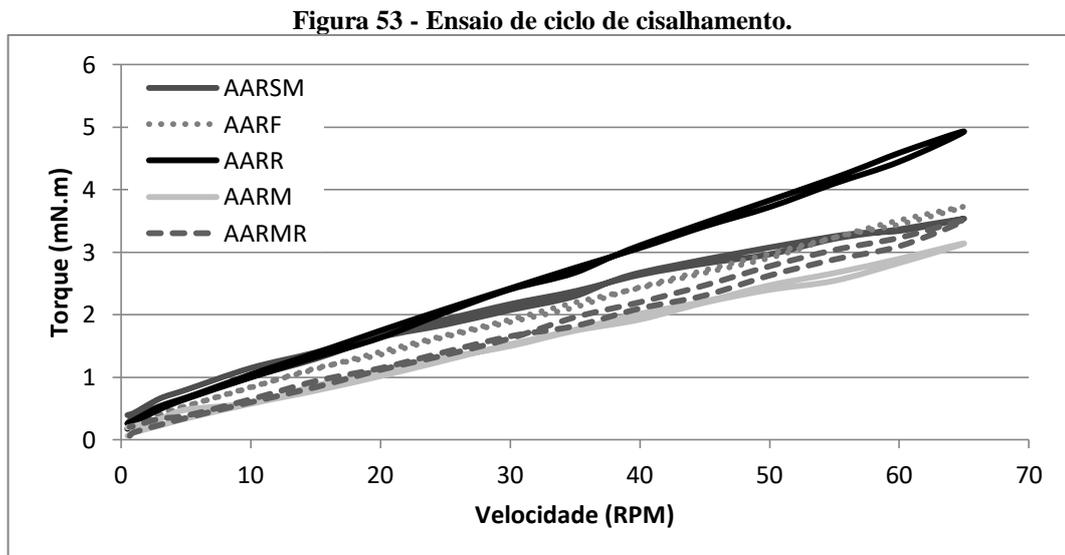
<b>Argamassas</b>	<b>Teor de Aditivo</b>	<b>Funil V (s)</b>	<b>Espalhamento Médio (cm)</b>
AARSM	0,20%	3,50	29,33
AARF	0,29%	3,45	29,33
AARR	0,26%	7,76	37,17
AARM	0,26%	5,25	39,25
AARMR	0,26%	4,24	37,73

As argamassas produzidas apresentaram consistência fluída. As argamassas com maior quantidade de finos necessitaram de maior quantidade de aditivo para chegar-se ao ponto de saturação, o que já era esperado, tendo em vista que os finos tem a função de aumento de coesão e viscosidade das misturas.

Observa-se que a argamassa AARF apresentou o maior consumo de aditivo, mas não necessariamente o melhor desempenho. As argamassas AARR, AARM e AARMR apresentaram o melhor desempenho, com abertura de espalhamento muito próxima. No entanto, a alta viscosidade da AARR pode se tornar um problema na produção do concreto, verificada pelo maior tempo necessário para escoar pelo funil V de argamassa. O desempenho muito próximo entre a AARM e AARMR, mostra que o processo de separação do AGRM pode ser substituído pela introdução do RBMG.

Nos ensaios de reologia, os parâmetros de viscosidade e a tensão de escoamento são comumente utilizados para avaliar o comportamento da mistura. No entanto, a depender do equipamento, os parâmetros de torque dão o indicativo do estado de tensão e a viscosidade da mistura, através da relação entre o torque e a velocidade da geometria ou *spindle* de execução do ensaio.

Na Figura 53 estão apresentadas as curvas do ensaio de ciclo de cisalhamento das argamassas, sendo a média entre três ensaios. Observa-se que os comportamentos de todas as argamassas se assemelham ao modelo de Bingham e Pseudoplástico com tensão de escoamento. Devido à grande proximidade entre as curvas ascendente e descendente, observa-se boa dispersão das partículas devido à área de histerese muito pequena.



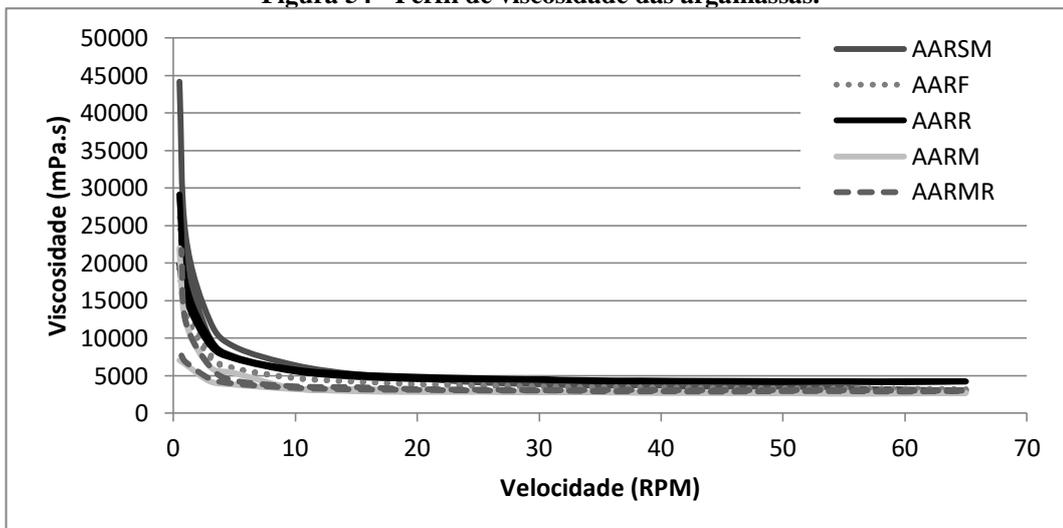
Todas as argamassas apresentaram torque de escoamento inferior a 5 mN.m, sendo verificada que a argamassa AARR apresenta maior inclinação da curva, revelando maior viscosidade em relação as demais. A argamassa AARM apresentou o menor torque de escoamento e menor

inclinação da curva, seguida da AARMR, indicando menor viscosidade e menor tensão de escoamento.

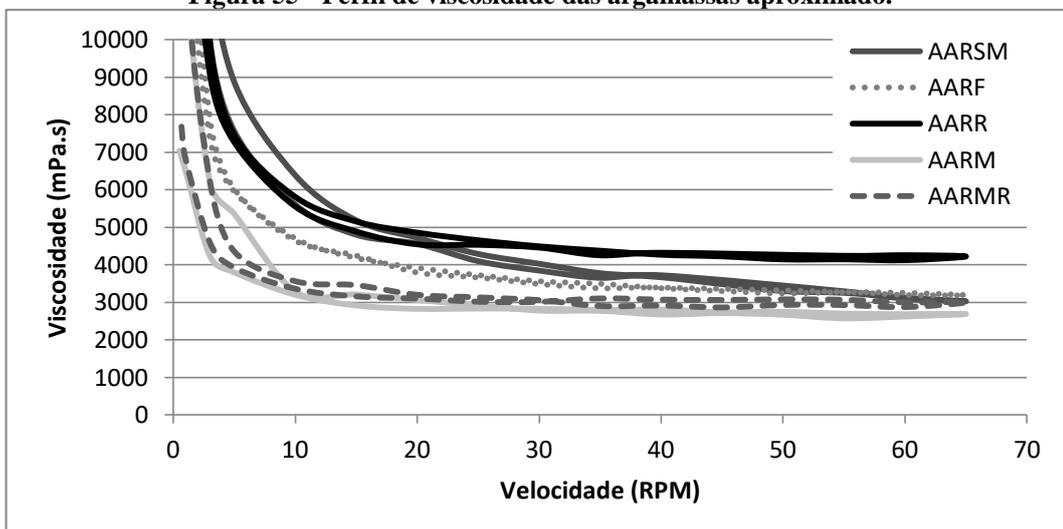
Analisando os perfis de viscosidade, apresentados na Figura 54, observa-se que após a velocidade de 30 RPM as viscosidades permanecem constantes, sendo inferiores a 5000 mPa.s em todas as argamassas.

Aproximando melhor as curvas, como visto na Figura 55, pode-se observar que as argamassas AARM e AARMR apresentaram menor viscosidade, assim como visto no perfil de torque na Figura 54. Todas as curvas apresentaram comportamento semelhante aos modelos Pseudoplástico com tensão de escoamento, reforçando o que foi visto no perfil de torque.

**Figura 54 - Perfil de viscosidade das argamassas.**



**Figura 55 - Perfil de viscosidade das argamassas aproximado.**



Os Quadros 19 e 20 apresentam comparativos entre propriedades relacionadas nos ensaios convencionais e nos ensaios de reologia. Verifica-se no Quadro 19, que o menor torque de escoamento não está diretamente relacionado com o maior espalhamento das argamassas, e no Quadro 20, também se verifica que a menor viscosidade não está relacionada com o maior tempo no funil V, apesar dos valores de tempo serem muito próximos.

Isto se deve a informação perdida durante os ensaios convencionais. Quando são realizados os ensaios convencionais, é aplicado apenas um estado de tensão dentro do material, sendo difícil analisar o seu comportamento real. Em um ensaio de reologia pode-se variar o estado de tensão aumentando ou diminuindo a velocidade do ensaio, descrevendo um comportamento mais real da mistura.

**Quadro 19 - Comparativo entre o torque de escoamento e o espalhamento das argamassas.**

Argamassas	Torque de Escoamento (mN.m)		Espalhamento Médio (cm)
	Curva Ascendente	Curva Descendente	
AARSM	0,262	0,395	29,33
AARF	0,174	0,240	29,33
AARR	0,180	0,260	37,17
AARM	0,063	0,196	39,25
AARMR	0,063	0,205	37,73

**Quadro 20 - Comparativo entre a viscosidade e o tempo de fluidez das argamassas.**

Argamassas	Viscosidade (mPa.s)	Funil V (s)
AARSM	3028	3,50
AARF	3190	3,45
AARR	4222	4,70
AARM	2688	5,25
AARMR	2998	4,24

Assim, verifica-se, no Quadro 19, que as argamassas AARM e AARMR apresentaram o menor torque de escoamento, visto nas curvas ascendente e descendente, sendo que na curva descendente o torque ficou muito próximo das argamassas AARF e AARR. A argamassa AARSM apresentou o maior torque entre todas e menor espalhamento, que pode ser justificado pelo fato de haver menor quantidade de finos e sua composição, aumentando o choque entre as partículas maiores.

No Quadro 20, verifica-se que os valores de tempo do funil V foram muito próximos e que os valores de viscosidade a velocidade (65 RPM), apresentaram diferenças significativas. A

argamassa AARR apresentou maior viscosidade, que pode ser justificada pela utilização do RBMG, que aumentou a coesão da mistura.

A argamassa AARM apresentou o menor valor de viscosidade. Quando comparada com a AARMR, que possui o mesmo teor de finos (12,50%) e mesmo teor de aditivo (0,26%), a AARM apresentou menor viscosidade. Assim, pode-se deduzir que o RBMG pode ser responsável pelo aumento da viscosidade.

Diante dos resultados apresentados, a argamassa AARM apresentou o melhor comportamento, menor viscosidade, baixa tensão de escoamento e maior espalhamento. Assim, os estudos de concretos serão realizados utilizando a AARM nas composições.

#### 4.2.2 Estudo de quebra

Como foi exposta na metodologia, a composição do CAALR é obtida pela composição da argamassa e da proporção AGRM/AGRGR. Quanto à argamassa, essa foi determinada no item anterior. Essa relação é modificada pela quebra dos agregados que ocorre durante o processo de mistura alterando a composição. Neste sentido, antes de se determinar a proporção AGRM/AGRGR, os efeitos provocados pelo misturador na composição do AGR foram avaliados e medidas para minimizar esses efeitos foram tomadas, os resultados são apresentados a seguir.

##### 4.2.2.1 Avaliação do efeito do misturador

Como apresentado no Item 3.5.2.1, foram produzidos dois concretos de mesma composição nos misturadores já apresentados. Na Figura 56, observa-se que a mistura produzida na argamassadeira (A) teve alto espalhamento (720 mm), enquanto que a produzida na betoneira (B) não obteve coesão e plasticidade suficiente avaliar o ensaio de índice de consistência corretamente. Provavelmente, a maior velocidade de mistura aumentou a dispersão do material, no entanto, maior quebra dos agregados, gerando maior quantidade de argamassa, o que deve ter melhorado consideravelmente o aspecto do concreto.

**Figura 56 - Aspectos dos concretos produzidos na argamassadeira (A) e na betoneira (B).**



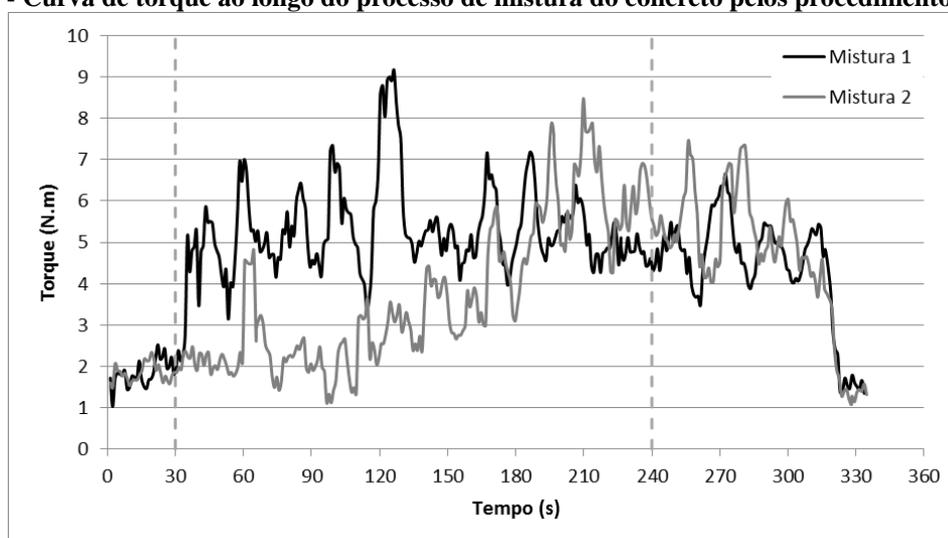
Fonte: Próprio Autor.

A quebra do AGRG foi observada em ambos os misturadores. Como esperado, a argamassadeira apresentou a maior porcentagem de quebra, com de redução da massa do AGRG em 18,81%, enquanto a betoneira apresentou redução de massa do AGRG de 6,51%, um terço menor. A quebra ocorre com maior intensidade nas partículas maiores, a maior concentração de tensões devido ao atrito gerado entre elas.

#### 4.2.2.2 Avaliação do efeito Procedimento de mistura

Desta forma, procedeu-se a verificação da integridade alterando-se o procedimento de mistura. Na Figura 57, pode-se se observar o perfil de torque gerado ao longo do processo de mistura.

**Figura 57 - Curva de torque ao longo do processo de mistura do concreto pelos procedimentos avaliados.**



Na mistura 1, onde foram colocados todos os agregados juntos logo no início da mistura, observa-se que após a colocação da água (30s) o torque aumenta drasticamente, evidenciando

maior atrito entre as partículas dos agregados. Já na mistura 2, pode-se observar que após a colocação da água o torque aumenta com menor intensidade, chegando a valores mais elevados aos 180s, com o aumento de coesão da argamassa. Aos 240s, com a colocação do agregado graúdo não há uma mudança tão drástica no torque, pois a argamassa já estava pronta e conseguiu envolver os agregados maiores, reduzindo o atrito.

Observa-se que o procedimento 2 (mistura 2) impacta em menos perda de fração graúda, com redução da massa de AGRG em 65%, em comparação do procedimento 1 (mistura 1) que apresentou 80% de redução de massa do AGRG. Os valores de quebras foram elevados devido à alta velocidade de mistura do reômetro (500 RPM) e da geometria da pá de mistura, onde o sentido de rotação carregava os agregados para o fundo do recipiente de mistura, acentuando ainda mais a quebra do agregado.

Devido à verificação de que a entrada do agregado graúdo no início da mistura gera 15% a mais de quebra, optou-se por um procedimento de mistura do concreto com a produção inicial da argamassa e por fim a colocação dos agregados graúdos.

#### 4.2.3 Composição dos Agregados

Como apresentado no item de composição das argamassas, a argamassa selecionada para compor o estudo de determinação da dosagem do CAALR foi a argamassa com a composição de AGRM modificado, AARM. No Quadro 21, estão apresentados os concretos que foram produzidos durante o estudo de determinação da composição do CAALR.

Quadro 21 - Resumo dos concretos produzidos.

CARACTERÍSTICAS ANALISADAS	COMPOSIÇÕES			
	CARM5050	CARM6550	CARM5060	CARMR5060
<b>CONSUMOS DOS MATERIAIS</b>				
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	405,50	364,95	439,72	440,55
Agregado Reciclado Miúdo(kg/m <sup>3</sup> )	811,00	729,90	879,44	825,59
Agregado Reciclado Graúdo (kg/m <sup>3</sup> )	811,00	729,90	586,29	587,40
RBMG (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	-	55,51
Água (kg/m <sup>3</sup> )	202,75	237,55	219,86	220,27
<b>TRAÇO UNITÁRIO EM MASSA</b>				
Cimento	1,00	1,00	1,00	1,00
Agregado Reciclado Miúdo	2,00	2,00	2,00	1,87
Agregado Reciclado Graúdo	2,00	2,00	1,33	1,33
RBMG	0,00	0,00	0,00	0,13
Água	0,50	0,65	0,50	0,50
<b>PARÂMETROS DOS CONCRETOS</b>				
Esqueleto Granular, massa (%) (AGRM/AGRG)	50/50	50/50	60/40	60/40
Teor de Pasta, em volume (%)	36,1	39,23	40,68	40,56
Teor de Argamassa, em volume (%)	66,73	61,41	72,21	72,16
Teor de Argamassa Seca, em volume (%)	46,49	41,69	50,23	50,13
Teor de Miúdo, em volume (%)	32,83	29,91	36,04	35,92
Teor de Graúdo, em volume (%)	33,24	34,59	27,79	27,57
Teor de Aditivo (%) sobre a massa de cimento	1,5	0,53	0,50	0,50
<b>PARÂMETROS DE AUTOADENSABILIDADE (ABNT NBR 15823:2010)</b>				
Slumpflow (mm)	-	650	720	750
Caixa L (mm/mm)	BLOQUEIO	BLOQUEIO	0,90	1,00
Funil V (s)	BLOQUEIO	60	12,56	9,55
<b>PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO</b>				
Resistência à Compressão (MPa)	-	30,25	31,16	28,24
Resistência à Tração (MPa)	-	-	3,45	3,47
Módulo de Elasticidade (GPa)	-	-	25,72	26,09
Massa Específica Aparente (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	2050,00	2080,00
Teor de Absorção de Água (%)	-	-	8,82	7,63

Como apresentado na metodologia, a composição de agregados selecionada para iniciar os estudos em concretos foi de 50% de AGRM e 50% AGRG em massa. Já a relação a/c foi a mesma utilizada na produção das argamassas, igual a 0,50. Fazendo uso destes parâmetros e da argamassa de composição AARM, selecionada para este estudo, o concreto de composição CARM foi o primeiro estudado.

A Figura 58 apresenta o ensaio de *slumpflow* do concreto CARM5050, observa-se a falta de coesão. A exsudação da pasta pode ser explicada pela alta taxa de superplastificante utilizada, com o intuito de fazer o concreto fluir. Verificando os parâmetros do concreto pode-se verificar o baixo teor de pasta, 36,10%, que primeiramente, não foi capaz de envolver os agregados. O incremento de aditivo fez com que a pasta ficasse cada vez mais fluida e com baixa viscosidade para estabilizar os agregados, havendo a segregação e falta de coesão.

**Figura 58 - Ensaio de Slumpflow para o concreto CARM**



Fonte: Próprio Autor.

Devido aos problemas verificados na produção deste concreto, optou-se por realizar modificações de sua composição. Optou-se por manter a composição de agregados, mas aumentando a quantidade de água de amassamento para 0,65, desta forma, aumentando a quantidade pasta da composição. Assim, a composição CARM6550 apresenta 39,23% de pasta, valor próximo aos 40%, geralmente utilizado na produção de CAA.

Durante a produção foi observado que ainda havia grande quantidade de graúdo na mistura, algumas porções sem envolvimento completo da argamassa. No entanto, após alguns incrementos de aditivo, chegou-se a um diâmetro médio de espalhamento de 650 mm. O teor final de aditivo foi de 0,53%. Na Figura 59, espalhamento homogêneo, sem segregação ou exsudação. A abertura total do espalhamento demorado, devido a alta viscosidade. No ensaio de *slumpflow*, ainda foi observada a quebra da estrutura do concreto após a retirada do tronco cônico.

**Figura 59 - Slumpflow do Concreto CARM6550.**



Fonte: Próprio Autor.

A elevada viscosidade também foi verificada no Funil-V, onde foi necessário 60 s para passar completamente. Também pode ser verificada no espalhamento, havendo a necessidade de grande tempo para abrir totalmente. Além disso, o concreto apresentou bloqueio na Caixa-L, devido ao grande acúmulo de agregado graúdo nas barras, havendo apenas a passagem da argamassa.

O volume de agregado graúdo utilizado parece afetar as propriedades de fluxo e coesão dos concretos até aqui produzidos. Mesmo com aumento de água e finos, parece não haver redução significativa da viscosidade e manter a coesão em todas as fases de produção, dificultando assim a obtenção do concreto autoadensável. O concreto apresentou resistência média de 30 MPa, verificando-se o atendimento NBR 6118 (ABNT, 2014) para resistência mínima (20 MPa) de concreto estrutural.

Devido aos problemas com os parâmetros de fluidez, optou-se por reduzir a quantidade de AGRG, mudando a composição para 60% AGRM e 40% AGRG. Com a redução da quantidade de agregados da composição, também se optou por retornar a relação *a/c* de 0,50. A nova composição CARM5060 apresentou aumento do volume de pasta para 40,68%.

O concreto CARM5060 apresentou espalhamento médio de 720 mm, com um teor de aditivo de 0,50%, o maior entre os concretos até aqui observados, observado na Figura 60. Além deste fato, também foi observada a redução da viscosidade em comparação aos demais concretos, constatada no Funil V, com o tempo de 12,56 s. A habilidade passante também pode ser verificada onde  $H1/H2$  igual a 0,90.

**Figura 60 - Slumpflow final do Concreto CARM5060.**



Fonte: Próprio Autor.

O concreto produzido com o esqueleto granular 60%-40% apresentou desempenho melhor que os demais concretos produzidos, assim, optou-se por manter o esqueleto granular e a relação a/c 0,50.

Devido ao fato de que a produção do agregado miúdo com modificação é muito onerosa, demanda muito tempo de trabalho, tornando-se inviável para uma produção em grande escala, do ponto de vista técnico. Assim, para eliminar este processo, será utilizado o RBMG para suprir a necessidade de finos que o agregado miúdo sem modificação, fazendo uso de uma porcentagem de 6,31% em substituição da massa de agregado miúdo, para se chegar à mesma quantidade de finos (<0,15 mm) existente no agregado com modificação (12,5%), chegando-se a dosagem do CARMR.

Assim como na composição CARM5060, o teor de aditivo foi mantido em 0,50%. A Figura 61 apresenta o *slumpflow*, o valor medido apresentou diâmetro médio de espalhamento de 750 mm.

**Figura 61 - Slumpflow final do Concreto CARMR5060.**



Fonte: Próprio Autor.

Este concreto apresentou diâmetro de espalhamento superior ao verificado em todas as misturas vistas, chegando a sair da base em determinado instante. Em termos de viscosidade, o Funil V apresentou tempo de escoamento de 9,55 s. A habilidade passante (H1/H2), o valor foi 1, sem haver bloqueio ou segregação.

No Quadro 15 estão apresentados dos dados da evolução das produções dos concretos. Pode-se observar que todos os concretos apresentaram abertura acima dos 550 mm, valor mínimo estabelecido em norma para caracterização de um CAA pela capacidade de se espalhar pelo peso próprio. Assim, pode-se concluir que, mesmo não atingindo todos os parâmetros de fluidez exigidos pela norma, todos os concretos apresentam a possibilidade de aplicação tomando certos cuidados.

No item 4.3, a seguir, os resultados dos concretos que ficaram com as propriedades de autoadensabilidade de acordo a ABNT NBR 15823:2010 serão discutidos.

#### 4.2.4 Conclusões

Com relação aos parâmetros de fluidez, todas as argamassas ensaiadas se mantiveram dentro dos parâmetros estabelecidos por outros autores, como apresentado no Quadro 22. No entanto, estes autores desenvolveram trabalhos utilizando agregados naturais, assim, os parâmetros encontrados se apresentam muito promissores para produção do CAA, com qualquer uma das argamassas estudadas.

**Quadro 22 - Parâmetros de fluidez das argamassas.**

Autores	Propriedades de Fluidez	
	Espalhamento (mm)	Funil V (s)
Próprio Autor	290-390	3-8
Domone e Jim (1999)	$\geq 300$	2-10
Edamatsu <i>et al.</i> (1999)	200-280	5-10
Mendes e Melo (2015b)	280-340	3-4

Quanto aos parâmetros de reológicos, como foi citado anteriormente, a realização de comparações de resultados encontrados com os de outros autores são muito complicadas. No entanto, pode-se verificar um comportamento predominantemente pseudoplástico com tensão de escoamento, e devido a característica das curvas apresentadas, verifica-se um comportamento linear.

Nas curvas de torque, verifica-se inclinação de curva praticamente constante, que pode ser verificado como fluido de viscosidade constante. Na curva de viscosidade, verifica-se que a viscosidade torna-se constante após 20 RPM. Assim, o comportamento das argamassas se assemelha ao modelo de Bingham acima dos 20 RPM.

Os resultados reológicos obtidos apresentaram valores muito próximos para as argamassas AARM e AARMR. A argamassa AARM foi escolhida para conduzir os ensaios em concretos por apresentaram o maior espalhamento e viscosidade, além disso, por não ter necessitado da introdução de RBMG para chegar a estes resultados, mantendo o teor de aditivo SP.

Quanto à definição do esqueleto granular, pode-se observar que:

- Avaliação dos misturadores: O tipo de misturador influencia no comportamento da mistura, o maior poder de dispersão da argamassadeira resultou em um concreto mais fluido e coeso, com menor consumo de aditivo superplastificante, por este motivo ela foi utilizada na produção dos concretos deste trabalho. No entanto, o efeito de quebra necessita ser levado em consideração, quanto maior a energia do misturador, maior a porcentagem de quebra dos agregados, que gera maior a quantidade de agregado miúdo, e por fim, maior a quantidade de argamassa;
- Avaliação do procedimento de mistura: Os procedimentos de mistura, também apresentam papel fundamental. Agregados com baixa resistência sofrem com

imbricamento mecânico das partículas durante o processo, assim, quanto maior o tempo de mistura, maior a porcentagem de quebra dos agregados. Desta forma, para reduzir a quebra o procedimento mais adequado foi, neste trabalho, a produção inicial da argamassa, seguida da colocação do AGRG, deixando-o menos tempo durante o processo de mistura, reduzindo assim a quantidade de AGRM gerado;

- **Composições dos agregados:** Basicamente, o processo de determinação da composição foi à análise da quantidade máxima de AGRG que possibilitasse ao concreto adquirir as propriedades de autoadensabilidade. A mistura de concreto composta da argamassa AARM e esqueleto granular com 60% AGRM, CARM5060, conseguiu adequar-se aos parâmetros de fluidez exigidos pela NBR 15823 (ABNT, 2010), no entanto, o processo de obtenção da distribuição granulométrica adequada do AGRM é muito oneroso. Assim, mudança da argamassa, para AARMR, apresentava-se como alternativa, visto que as propriedades de fluidez e reológicas era muito próximas. Assim, o CARMR produzido, também se adequou aos parâmetros de fluidez exigidos pela NBR 15823 (ABNT, 2010), com a vantagem de não haver a necessidade de modificação do AGRM.

### 4.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO

Os concretos CARM5060 e CARMR5060 apresentaram comportamentos semelhantes ao esperado de um CAA.

#### 4.3.1 Propriedades no estado fresco

No Quadro 23 estão apresentados os resultados dos ensaios para verificação das propriedades do concreto auto-adensável. Verifica-se a proximidade entre os resultados obtidos para os concretos produzidos. A proximidade entre os resultados também culminaram na mesma classificação.

**Quadro 23 – Parâmetros de fluidez dos concretos.**

Propriedades	CAMCM60/40B		CAMRB60/40	
	Resultado	Classificação	Resultado	Classificação
<i>Slumpflow</i> (mm)	720	SF2	750	SF2
Caixa L (H2/H1)	0,90	PL2	1,00	PL2
Funil V (s)	12,56	VF2	9,55	VF2

Os concretos foram classificados como sendo concretos adequados para a maioria das aplicações correntes, como: lajes, paredes, vigas, pilares e etc. A sua aplicação é limitada a elementos estruturais com espaçamento entre as barras de 60 mm. Quanto ao comportamento reológico, ele pode apresentar efeito tixotrópico, reduzindo à pressão nas fôrmas, e melhor resistência à segregação.

#### 4.3.2 Propriedades no estado endurecido

Os resultados das propriedades mecânicas dos concretos estão apresentados no Quadro 24. Pode-se observar a proximidade entre os resultados, sem a maior diferença na resistência à compressão, em 2 MPa.

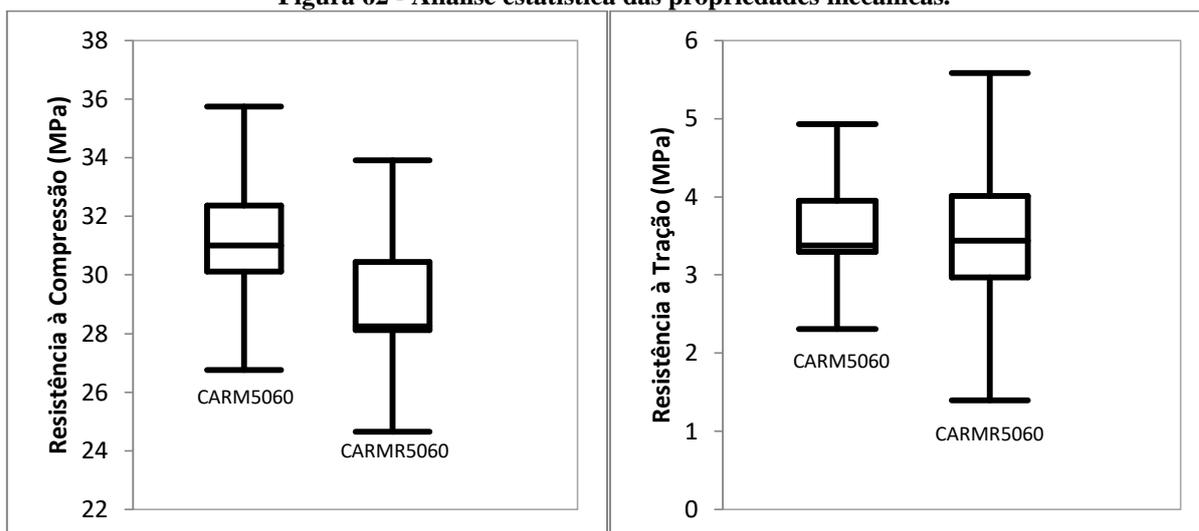
**Quadro 24 - Propriedades mecânicas dos concretos.**

Concreto	Resistência à Compressão (MPa)		Módulo de Elasticidade (GPa)		Resistência à Tração (MPa)	
	Fc28	Desvio	Ec28	Desvio	Ftc56	Desvio
CARM5060	31,16	1,13	25,72	0,00	3,45	0,37
CARMR5060	28,94	1,30	26,09	1,94	3,47	0,44

A colocação do RBMG, em substituição ao procedimento de separação do agregado miúdo em faixas granulométrica para melhorar a composição granulométrica, resultou em uma redução da resistência mecânica e uma ligeira melhora do módulo de elasticidade.

Na Figura 62 está uma análise das resistências à compressão e tração através de *boxplot*. Em termos de resistência à compressão, observa-se que a variabilidade entre os valores de resistência encontrada nos concretos foram próximas e que existe aproximação entre as resistências encontradas, visto que as regiões entre os quartis apresentam pontos em conexão.

**Figura 62 - Análise estatística das propriedades mecânicas.**



Com relação à resistência à tração, observa-se que o concreto com RBMG apresentou maior variabilidade entre os resultados encontrados. Contudo, pode-se afirmar que a resistência dos concretos foi igual, visto que a região entre os quartis estão praticamente alinhadas.

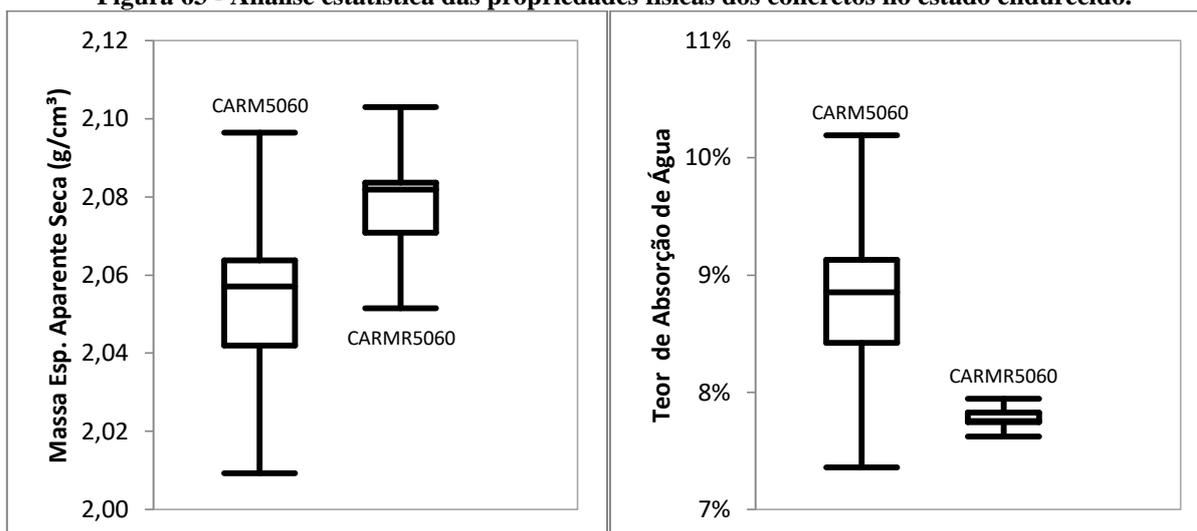
O Quadro 25 apresenta os resultados das propriedades físicas dos concretos. Observa-se que, mais uma vez, os resultados foram muito próximos. Sendo o CARM o concreto com maior teor de absorção de água e índice de vazios, devido a maior quantidade de agregado reciclado, Também pode ser observado que os desvios encontrados nos ensaios foram muito baixos. A utilização do RBMG em substituição do AGRM contribui para redução dos vazios em 2% e da absorção de água em 1%. Isto indica que o concreto com RBMG é menos poroso.

**Quadro 25 - Propriedades dos concretos segundo a ABNT NBR 9778:2014.**

Propriedades	CARM5060		CARMR5060	
	Valor médio	Desvio	Valor médio	Desvio
Índice de Vazios	18,11%	0,56%	15,89%	0,55%
Massa Específica Aparente Seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,05	0,01	2,08	0,01
Massa Específica Saturado de Superfície Seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,24	0,01	2,24	0,01
Massa Específica Real (g/cm <sup>3</sup> )	2,51	0,01	2,48	0,01
Absorção de Água	8,82%	0,30%	7,63%	0,30%

A Figura 63 apresenta a análise estatística das propriedades físicas dos concretos mais importantes. Observa-se que a variabilidade do concreto com RBMG foi menor, comparada com o concreto sem RBMG. Isso pode ser justificado pelo fato de que o RBMG tem porosidade inferior a do agregado. Os valores encontrados não iguais, como podem ser verificados pelo afastamento das regiões entre os quartis.

**Figura 63 - Análise estatística das propriedades físicas dos concretos no estado endurecido.**



Com relação a Massa Específica Aparente Seca observa-se que os concretos apresentaram valores próximos a  $2 \text{ g/cm}^3$ , sendo assim concretos de densidade normal ( $2 - 2,8 \text{ g/cm}^3$ ), mas que para os concretos produzidos usualmente apresentam valor inferior, próximos a concretos leves ( $<2 \text{ g/cm}^3$ ).

#### 4.3.3 Conclusões

Ambos os concretos, CARM e CARMR, apresentaram parâmetros de autoadensabilidade dentro das mesmas classes, nos ensaios realizados. O CARMR apresentou maior abertura do slumpflow e melhor habilidade passante, provavelmente devido à utilização do RBMG, que se trata de um material mais fino que os finos do AGRM e, por não apresentar pasta de cimento em sua composição, não deve apresentar teor de absorção de água superior ao AGRM.

De maneira geral, os concretos CARM5060 e CARMR5060 apresentaram comportamento mecânico semelhante. Ambos apresentaram resistências acima dos 20 MPa, sendo considerados concretos com aplicação estrutural, segundo NBR 6118 (ABNT, 2014).

A resistência à compressão do concreto CARMR5060 apresentou valor médio inferior, mesmo com consumo de cimento um pouco maior que CARM5060, este fato provavelmente foi influenciado pela utilização do RBMG. As demais propriedades mecânicas não apresentaram diferenças significativas.

O CARMR5060 apresentou índice de vazios menor que o CARM5060, com isso, maior massa específica aparente seca e menor absorção de água.

O teor de absorção de água dos concretos apresentou valores próximos aos encontrados nos AGR (AGRM 7,3% e AGRG 6,9%), sendo o CARMR5060 menor devido à substituição do AGRM por RBMG, que promoveu a redução do índice de vazios. Este efeito também foi verificado na massa específica aparente seca do CARMR5060, apresentando valor maior devido à redução de vazios.

A massa específica aparente seca de ambos os concretos situaram-se muito próximas aos valores limites para concreto leve ( $2000 \text{ kg/m}^3$ ). Geralmente, a maior utilização de finos no CAA faz com a massa específica seja mais elevada, devido ao efeito de preenchimento dos vazios, promovidos pelos materiais finos. Levando em consideração que se trata de um concreto especial, onde os parâmetros convencionais de comportamento raramente se aplicam a ele, pode-se tratar de um concreto autoadensável leve (CAAL), devido à comparação com os demais. Outros estudos em CAAL têm sido desenvolvidos, fazendo uso de agregados leves () ou aditivos incorporadores de ar (PAPANICOLAU; KAFFETZAKIS, 2011; MENDES *et al*, 2015b). No entanto, no presente trabalho a aplicação de AGR de bloco de concreto foi suficiente para obtenção de concreto autoadensável leve reciclado (CAALR).

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pode-se concluir que o trabalho conseguiu atingir os objetivos delineados. A seguir serão apresentadas as considerações verificadas ao longo do desenvolvimento do trabalho, em função das observações dos resultados obtidos.

O processo de beneficiamento adotado neste trabalho resultou em agregados reciclados que não conseguiram se enquadrar nos parâmetros de distribuição granulométrica da NBR 7211 (ABNT, 2009). No entanto, através do estudo de composição desenvolvido no AGRM, pode-se obter argamassa de elevada fluidez.

A análise da distribuição granulométrica das partículas de agregados através dos métodos ADI e GL se mostraram rápidos, comparadas as aplicadas pela NBR 7211 (ABNT, 2009), e possibilitam a obtenção de maior quantidade de informações. Estas tecnologias ainda são pouco difundidas devido ao alto custo dos equipamentos. Assim, como verificado, na falta do equipamento, a utilização de maior quantidade de peneiras pode facilitar a interpretação do material, mas o processo de peneiramento será mais oneroso.

Quanto aos parâmetros de morfologia, não foi detectado partículas muito lamelares e alongadas. Entre as faixas analisadas não foi verificada formas diferentes de partículas.

Quanto à massa específica, verifica-se que realizar comparações entre os resultados obtidos com gás, água e pó, são difíceis, pois analisam fases distintas dos agregados. Além disso, a utilização de água com agregados de elevada porosidade, com a presença de pasta de cimento, podem resultar em erros, pois a água leva certo tempo para preencher os poros.

Nos ensaios realizados no picnômetro de pó, para determinação da massa específica aparente, verificou-se a dependência dos valores obtidos com a dimensão das partículas. Provavelmente, a composição química e mineralógica dos agregados pode variar, podendo haver maior presença de pasta de cimento em determinadas faixas granulométricas.

Semelhante ao observado nas técnicas de determinação da distribuição granulométrica, as técnicas empregadas para determinação da massa específica, picnometria de gás e pó, apresentam maior praticidade e rapidez, além de melhor repetibilidade.

A falta de materiais finos do AGRM, verificada na distribuição granulométrica, pode ser corrigida com o aumento de finos do próprio AGR e com RBMG. Verificou-se que ambos os materiais melhoraram significativamente a fluidez das argamassas, resultando em grandes aberturas do espalhamento.

Todas as argamassas ensaiadas se mantiveram dentro dos parâmetros estabelecidos por outros autores, como visto. No entanto, a argamassa AARM apresentou melhor desempenho, tanto nos parâmetros de fluidez, quanto reológicos, sendo ela a escolhida para o desenvolvimento dos estudos em concreto. Assim, como as demais, a AARM apresentou comportamento pseudoplástico com tensão de escoamento, assemelhando ao comportamento descrito no modelo de Bingham.

Na produção dos concretos, constatou-se que o tipo de misturador e o procedimento influenciam no comportamento da mistura e na quebra dos agregados. O primeiro, gerando um concreto mais fluido e coeso, mas, com maior a porcentagem de quebra dos agregados, aumento maior a quantidade de argamassa. O segundo, a entrada do AGRG no fim do processo de mistura não prejudica a homogeneidade e gera menos quebras.

A definição da composição dos agregados (AGR/AGRM) foi basicamente a verificação da quantidade máxima de AGR que possibilitasse ao concreto adquirir as propriedades de autoadensabilidade. Assim, foi utilizada a argamassa AARM, e foi verificado que na utilização de 60% AGR e 40% de AGRG o concreto (CARM5060) conseguiu adequar-se aos parâmetros de fluidez exigidos pela NBR 15823 (ABNT, 2010). Mas, devido ao processo de obtenção da distribuição granulométrica adequada do AGRM ser muito oneroso, verificou-se que a argamassa AARMR, que apresentou parâmetros de fluidez e reológicos muito próximos aos a argamassa AARM, pôde ser utilizada como alternativa. Assim, o CARMR5060 produzido, também se adequou aos parâmetros de fluidez exigidos pela NBR 15823 (ABNT, 2010), com a vantagem de não haver a necessidade de modificação do AGRM.

Ambos os concretos, CARM5060 e CARMR5060, apresentaram comportamento mecânico semelhante, com resistência à compressão em torno de 30 MPa, sendo considerados concretos com aplicação estrutural, segundo NBR 6118 (ABNT, 2014).

O CARMR5060 apresentou índice de vazios menor que o CARM5060, com isso, maior massa específica aparente seca e menor absorção de água. O teor de absorção de água dos

concretos apresentou valores próximos aos encontrados nos AGR (AGRM 7,3% e AGRG 6,9%), sendo o CARMR5060 menor devido à substituição do AGRM por RBMG, que promoveu a redução do índice de vazios.

A massa específica aparente seca de ambos os concretos situaram-se muito próximas aos valores limites para concreto leve ( $2000 \text{ kg/m}^3$ ). Levando em consideração que se trata de um concreto especial, onde os parâmetros convencionais de comportamento raramente se aplicam a ele, pode-se concluir que tanto o CARM5060 quanto CARMR5060 podem ser denominados como Concreto Autoadensável Leve Reciclado (CAALR).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGULO, S. C. **Caraterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico de concretos.** São Paulo/SP: Tese de doutorado - USP, 2005.

ANGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados.** São Paulo/SP: Dissertação de mestrado - USP, 2000.

ANGULO, S. C.; DA SILVA, R. B.; DE OLIVEIRA; V. L.; ULSEN, C. **Caracterização das Propriedades Físicas dos Agregados Graúdos de RCD Reciclados por Picnometria de Pó e Gás.** Anais do 54º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739:** Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_ **ABNT NBR 7211:** Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_ **ABNT NBR 15116:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_ **ABNT NBR 15823-1:** Concreto auto-adensável. Parte 1 - Classificação, controle e aceitação no estado fresco. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_ **ABNT NBR 15823-2:** Concreto auto-adensável. Parte 2 - Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento - Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_ **ABNT NBR 15823-3:** Concreto auto-adensável. Parte 3 - Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento - Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_ **ABNT NBR 15823-5:** Concreto auto-adensável. Parte 5 - Determinação da viscosidade - Método do funil V. Rio de Janeiro, 2010.

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

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

\_\_\_\_ **ABNT NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_ **ABNT NBR NM 53:** Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

BANFILL, P. F. G. **The Rheology of Fresh Cement and Concrete - A Review.** 11<sup>th</sup> International Cement Chemistry Congress. Durban, 2003.

BUTTLE, A. M. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto - Influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados.** São Carlos/SP: Dissertação de mestrado - USP, 2003.

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: Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.

CARNEIRO, A. P.; CASSA, J. C.; BRUM, I. A. S. **Características do entulho e do agregado reciclado.** In: CASSA, J. C. S.; CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S. *Reciclagem de entulho para produção de materiais construção - Projeto Entulho Bom.* Salvador: Edufba, 2001.

CARRIJO, P. M. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto.** São Paulo/ SP: Dissertação de Mestrado, USP, 2005.

CARRO-LOPEZ, D.; GONZÁLEZ-FONTEBOA, B.; DE BRITO, J.; MARTÍNEZ-ABELLA, F.; GONZÁLEZ-TABOADA, I.; SILVA, P. **Study of the rheology of self-compacting concrete with fine recycled concrete aggregates.** *Construction And Building Materials* 96. ELSEVIER, 2015.

CASTRO. A. L.; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. **Reologia de concretos de alto desempenho aplicados na construção civil - Revisão.** *Cerâmica* 57, 2011.

DE JUAN, M.S., GUTIÉRREZ, P.A. **Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate.** *Construction and Building Materials* 23, 872e877. 2009.

DOMONE, P. L.; JIN, J. **Properties of mortar for self-compacting concrete.** In: *FIRST INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE*, p, 109-120, 1999, Estocolmo: E & FN Spon, A. SKARENDAHL, A.; PETERSSON, Ö. (eds.),1999.

EDAMATSU, H.; NISHI DA, N.; OÜCHI, M. **A Rational mix-design method for self-compacting concrete considering interaction between coarse aggregate and mortar particles.** In: *FIRST INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE*. p. 309-320, 1999, Estocolmo: E & FN Spon, SKARENDAHL, A.; PETERSSON, Ö. (ed.),1999.

**EFNARC. Spectficacian and Guidelines for Self-Compacting Concrete.** EFNARC, 2002.

FAKITSAS, C. G.; PAPAKONSTANTINOU, P. E. A.; KIOUSI, P. D.; SAVVA, A. **Effects of Recycled Concrete Aggregates on the Compressive and Shear Strength of High-Strength Self-Consolidating Concrete.** *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 24, No. 4, 2012.

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. D. **Método de Dosagem de Concreto Autoadensável.** 1 edição. ed. [S.l.]: Pini, 2009.

GOMES, P. C. C.; ALENCAR, T. F. F. de; SILVA, N. V. da; MORAES, K. A. de M.; ANGULO, S. C. **Obtenção de concreto leve utilizando agregados reciclados**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 15, n. 3, p. 31-46, jul./set. 2015.

GRDIC, Z.J. et al. **Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate**. Construction and Building Materials, v. 24, n. 7, p. 1129–1133, jul 2010.

HANSEN, T. C. **Recycled Concrete and Mansory**. In: ENVIROMETAL COUNCIL OF CONCRETE ORGANIZATIONS - INFORMATION. Illinois: 1999.

HAWLITSCHKE, G. **Caracterização das Propriedades de Agregados Reciclados e a Influência no Comportamento Reológico de Argamassas**. São Paulo/SP: Dissertação de Mestrado - USP/SP, 2014.

HORIBA. **Dynamic Image Analysis Technology**.

Em: <http://www.horiba.com/scientific/products/particle-characterization/technology/dynamic-image-analysis/>. Acesso em: 10 novembro 2016.

LATTERZA, L. M. **Concreto com agregado graúdo proveniente da reciclagem de resíduos de construção e demolição: um novo material para fabricação de painéis leve de vedação**. São Carlos/SP: Dissertação de mestrado - USP, 1998.

LEITE, M. B. **Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos produzidos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição**. Porto Alegre/RS: Tese de Doutorado - UFRGS, 2001.

LEVY, S. M.; HELENE, P. **Mitos e verdades sobre o efeito pozolânico dos resíduos cerâmicos e argamassas de cimento, produzidas em São Paulo**. In: Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2004, São Paulo. **Anais**. São Paulo: Antac. 1 CDROM.

LIMBACHIYA, M. C.; LEELAWAT, T.; DHIR, R. K. **RCA concrete: A study of properties in the fresh state, strength development and durability**. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate. London: Thomas Telford Pub., 1998b. p. 227-237.

LISBÔA, E. M. **Obtenção do Concreto Auto-adensável com Resíduo do Beneficiamento do Mármore e Granito e Estudo das Propriedades Mecânicas**. Maceió/AL: Dissertação de Mestrado - UFAL, 2004.

MACHADO Jr., E. F.; AGNESINI, M. V. C. **Estudo comparativo das propriedades físicas e mecânicas de microconcretos leves produzidos com argila expandida e com agregados reciclados de rejeitos de construção e demolição**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 41., 1999, Salvador. **Anais** [CD-ROM]. São Paulo: IBRACON, 1999. Arquivo: 2-1-13, 19p.

MALVERN. **Malvern Instruments**.

Em: <http://www.malvern.com/en/products/measurement-type/particle-size/>. Acesso em: 12 abril 2016.

MARIE, I.; QUIASRAWI, H. **Closed-loop recycling of recycled concrete aggregates.** Journal of Cleaner 37, 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties and Materials.** 2006.

MENDES, E. L. S.; PILEGGI, R. G.; GOMES, P. C. C.; ROMANO, R.C.O.; ÂNGULO, S. C. **Avaliação reológica de argamassa com agregado reciclado para obtenção de concreto autoadensável.** In: IV CONGRESSO IBERO-AMERICANO SOBRE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL - BAC2015. Portugal, 2015a.

MENDES, E. L. S.; AMORIM, T.; DOS SANTOS, I. T. G.; DA SILVA, N.; MORAES, K.; GOMES, P. C. C. **Estudo da Obtenção de Concreto Autoadensável Leve com Agregado Reciclado.** 57° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - IBRACON, 2015b.

MENDES, E. L. S.; MELO, K. A. **Estudo de parâmetros reológicos de pastas e argamassas para dosagem de Concretos Autoadensáveis.** 57° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - IBRACON, 2015c.

MELO, K. A. **Contribuição à Dosagem de Concreto Auto-adensável com Adição de Fíler Calcário.** Florianópolis/SC: Dissertação de mestrado - UFSC, 2005.

MICROMERITICS. **Gas Displacement Pycnometry System.**

Em: <http://www.micromeritics.com/product-showcase/AccuPyc-II-1340.aspx>. Acesso em :7 Julho 2017.

MODANI, P. O.; MOHITKAR, V. M. **Self-compacting concrete with recycled aggregate: A solution for sustainabel development.** International Journal of Civil and Structural Engineering, Volume 4, No 3, 2014.

MONTEIRO, R. S. **Estudo da influência de diferentes composições de agregados na produção de concreto autoadensável.** Maceió/AL: Dissertação de mestrado - UFAL, 2014.

MOREIRA, K. M. V. **Concreto Autoadesável com Agregados Graúdos Reciclados de Concreto.** Fortaleza/CE: Dissertação de mestrado: UFC, 2012.

NAKANO, A. Y.; TORRES, D. dos R.; GRANDES, F. A.; MAIA, F. T. V.; FUJITAKI, G. J. **Estudo de viabilidade do uso de resíduos da construção e demolição na fabricação de peças intertravadas de concreto.** São Paulo/SP: Trabalho de Conclusão de Curso - USP, 2014.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 2ª edição. Ed. Pini. São Paulo. 1997.

NUNES, S. C. B. **Betão Auto-Compactável: Tecnologia e Propriedades.** 2001. 198 p. Pós-graduação em Estruturas de Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto. 2001.

OKAMURA, H.; MAEKAWA, K.; OZAWA, K. **High Performance Concrete,** Gihoudou Pub., Tokyo, 1993.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. **Self-Compacting Concrete**. *Journal of Advanced Concrete Technology* Vol. 1, No 1, p. 5-15, April 2003.

PAPANICOLAU, C. G.; KAFFETZAKIS, M. I. **Lightweight Aggregate Self-Compacting Concrete: State-of-the-Art & Pumice Application**. *Journal of Advanced Concrete Technology* Vol. 9, No. 1, 2011.

PANDA, K. C.; BAL, P. K. **Properties of self compacting concrete using recycled coarse aggregate**. *Procedia Engineering* 51, ELSEVIER, 2013.

PINTO, T. P. **Utilização de resíduos de construção. Estudo do uso em argamassas**. São Carlos/SP: Dissertação de mestrado - USP, 1986.

REPETTE, W. L. **Concretos de última geração: presente e futuro**. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org.). **Concreto - Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, v. 2, p. 1509-1550, 2005.

SILVA, W. G. **Avaliação de concreto auto-adensável com agregado reciclado de telha cerâmica**. Uberlândia/MG: Dissertação de mestrado - UFU, 2012.

SYMPATEC. **Images Analysis**.

Em: <http://www.sympatec.com/EN/ImageAnalysis/ImageAnalysis.html>. Acesso em: 15 outubro 2016.

TENÓRIO, J. J. L. **Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais**. Maceió/AL: Dissertação de mestrado - UFAL, 2007.

TUTIKIAN, B. F.; MOLIN, D. C. D. **Concreto Auto-Adensável**. 1 edição. ed. : Pini, 2008. 7-33p.

ZHIHUI, Z.; SHOUDE, W.; LINGCHAO, L.; CHENCHEN, G. **Evaluation of pre-coated recycled aggregate for concrete and mortar**. *Construction and Building Materials*, v. 43, 2013.