

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
CIVIL

ESTUDO DE CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL COM A UTILIZAÇÃO DE  
MATERIAIS DA REGIÃO DE MANAUS E RESÍDUO DE VIDRO COMO  
MODIFICADOR DE VISCOSIDADE

MARCIO BENTO BARTHOLOMEI

MANAUS 2013

ESTUDO DE CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL COM A UTILIZAÇÃO DE  
MATERIAIS DA REGIÃO DE MANAUS E RESÍDUO DE VIDRO COMO  
MODIFICADOR DE VISCOSIDADE

MÁRCIO BENTO BARTHOLOMEI

Dissertação de Mestrado apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Civil da Universidade Federal do Amazonas,  
como requisito parcial para a obtenção do  
título de Mestre em Engenharia Civil, área de  
concentração de Materiais.

Orientador: Raimundo Pereira de Vasconcelos

MANAUS 2013

ESTUDO DE CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL COM A UTILIZAÇÃO DE  
MATERIAIS DA REGIÃO DE MANAUS E RESÍDUO DE VIDRO COMO  
MODIFICADOR DE VISCOSIDADE

Marcio Bento Bartholomei

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE  
PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL (PPGEC) DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM  
ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

---

Prof. Raimundo Pereira de Vasconcelos, D.Sc.  
Universidade Federal do Amazonas.

---

Prof. Reila Vargas Velasco, D.Sc.  
Universidade Federal do Rio de Janeiro.

---

Prof. Raimundo Kennedy Vieira, D.Sc.  
Universidade Federal do Amazonas.

Ficha Catalográfica  
(Catalogação realizada pela Biblioteca Central da UFAM)

Bartholomei, Márcio Bento

*B287e* Estudo de concreto auto-adensável com a utilização de materiais da região de Manaus e resíduo de vidro como modificador de viscosidade / Márcio Bento Bartholomei. - Manaus: UFAM, 2012.  
109 f.; il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Amazonas, 2012.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos

1. Concreto - Aditivos 2. Concreto auto-adensável 3. Resíduos de vidro 4. Construção civil I. Vasconcelos, Raimundo Pereira de (Orient.) II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

CDU 691.328(811.3)(043.3)

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiramente à minha família, principalmente a minha mãe, Maria Lucia Bento Bartholomei e meu pai, Marcos Bartholomei, pelos anos de dedicação como pais e amigos, por ter sido a grande fundação de sustentação de minha vida, central de minhas conquistas e me incentivaram a todo tempo a não desistir desta conquista, além de se sacrificarem batalhando sempre para o crescimento e melhoria de minha vida;

Ao meu orientador Raimundo Pereira de Vasconcelos, pela confiança em meu trabalho, por sua paciência e pelo fato de ter acreditado em mim e na minha capacidade de concluir esta grande conquista;

Também ao meu co-orientador Francisco dos Santos Rocha, pelo estímulo e impulso dados, para começar essa grande conquista deste curso de Stricto Sensu.

Aos meus amigos que sempre estiveram me incentivando e acreditando em mim, falando palavras de conforto e apoio;

A todos os colegas e amigos da Instituição, pelas horas de descontração carinho e alegria, e aos que me auxiliaram nas discussões das temática dos trabalhos e contribuíram positivamente para o meu engrandecimento pessoal e intelectual;

E principalmente a Deus, por ter dado as possibilidades de adquirir tudo que tenho hoje, pois sem ele nada seria possível de acontecer.

Dedico este meu trabalho a Deus a minha família ao meu pai Marcos Bartholomei e minha mãe Maria Lucia Bento Bartholomei e ao meus orientadores que tanto acreditaram em minha pessoa, mesmo em tantos dificuldades, que auxiliaram em muito ao meu engrandecimento pessoal e intelectual.

Resumo da Dissertação apresentada à PPGEC/UFAM como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Civil (M.Sc.)

ESTUDO DE CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL COM A UTILIZAÇÃO DE  
MATERIAIS DA REGIÃO DE MANAUS E RESÍDUO DE VIDRO COMO  
MODIFICADOR DE VISCOSIDADE

Marcio Bento Bartholomei

Janeiro/2013

Orientador: Raimundo Pereira de Vasconcelos

Programa: Engenharia Civil

Atualmente o concreto desempenha um papel muito importante no desenvolvimento de uma sociedade moderna. Seus benefícios para a sociedade vêm de sua ampla faixa de aplicações, sendo este usado em diversos tipos de construção. Dentre os diversos tipos de concretos existentes, destaca-se o concreto auto-adensável, que é uma tecnologia superior ao concreto convencional, pois o mesmo não necessita de nenhum equipamento para ser compactado, tendo uma capacidade de auto-compactação através da força da gravidade. O objetivo deste trabalho foi estudar a utilização de materiais comercializados na região de Manaus para a produção de concreto auto-adensável com adição de resíduo moído de vidro. Neste processo de estudo foram caracterizados os agregados miúdos, agregados graúdos, cimento, modificador de viscosidade de efeito físico (resíduo moído de vidro) e aditivo superplastificante conforme as Normas Brasileiras (NBR). Também foi analisado o melhor método de dosagem para a produção do concreto convencional, o qual

também se adaptava a produção do concreto auto-adensável. Após a escolha do melhor método para a produção do concreto convencional, foi desenvolvido neste trabalho um método para a produção do concreto auto-adensável utilizando resíduo de vidro moído e materiais regionais da cidade de Manaus. Os resultados mostraram que é possível obter um concreto auto-adensável empregando materiais comercializados na região de Manaus, além disso, que o resíduo moído de vidro é um material que mantém as propriedades do concreto auto-adensável no estado endurecido com ganhos de resistência e no estado fresco com o aumento de viscosidade, a qual diminui a sua segregação estática e dinâmica.

**Palavra chave:** *Concreto auto-adensável, resíduo de vidro, matriz cimentícia.*

Abstract of Dissertation presented to PPGEC/UFAM as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science of Civil Engineering (M.Sc.)

SELF-COMPACTING CONCRETE STUDY WITH THE USE OF MATERIALS FROM  
MANAUS AND NEARBY LOCATIONS AND GLASS WASTE AS A VISCOSITY  
MODIFIER

Marcio Bento Bartholomei

January/2013

Advisor: Raimundo Pereira de Vasconcelos

Program: Civil Engineering

Currently concrete performs a very important role in contemporary society's development. Their benefits to society come from its variety of applications, being used in diverse types of constructions. Among the many kinds of existing concretes, the self-compacting one is highlighted once it is of a superior technology if compared to the ordinary one, once it doesn't need a specific equipment to be compacted, having a self-compacting ability due to gravity. The aim of this work was studying the use of materials commercialized in Manaus and nearby locations for the production of self-compacting concrete with addition of ground glass' waste. In this process great and tiny aggregates, cement, viscosity modifier of physical effect (ground glass' waste) and superplasticizer additive were characterized according to Brazilian Standards (NBR). It was also analyzed the best dosage method for the ordinary concrete's production, which also was adapted to the self-compacting production.

After choosing the best method for the ordinary concrete, this work developed a method so that self-compacting concrete could be produced using ground glass´ waste and local materials from Manaus city. The results showed that it is possible to obtain a self-compacting concrete from materials commercialized in Manaus and nearby locations, moreover, that the ground glass´ waste is a material which holds the self-compacting concrete properties in the cured stage having gains in resistance, and in the fresh state with viscosity increase, in which shortens its static and dynamic segregation.

**Keyword:** *Self-compacting concrete, glass´ waste, cement matrix.*

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>21</b>
1.1 OBJETIVO GERAL.....	22
1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	22
1.3 JUSTIFICATIVA.....	22
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>24</b>
2.1 DEFINIÇÃO.....	24
2.2 HISTÓRICO E DESENVOLVIMENTO.....	25
2.3 VANTAGENS.....	26
2.4 MATERIAIS CONSTITUINTES.....	27
<b>2.4.1 Cimento.....</b>	<b>28</b>
<b>2.4.2 Agregado miúdo.....</b>	<b>29</b>
<b>2.4.3 Agregado graúdo.....</b>	<b>30</b>
<b>2.4.4 Adição de minerais.....</b>	<b>31</b>
<b>2.4.5 Aditivo modificadores de viscosidade (VMA).....</b>	<b>33</b>
<b>2.4.6 Aditivo superplastificante.....</b>	<b>34</b>
<b>2.4.7 Resíduo de vidro cinescópico.....</b>	<b>36</b>
2.5 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CAA NO ESTADO FRESCO, SEGUNDO A ABNT NBR 15823.....	38
<b>2.5.1 Ensaio de slump - flow (SF).....</b>	<b>38</b>
<b>2.5.2 Ensaio t500 (VS).....</b>	<b>41</b>
<b>2.5.3 Ensaio do funil V (VF) - V-funnel test.....</b>	<b>42</b>
<b>2.5.4 Ensaio da caixa L (PL) - L-Box test.....</b>	<b>44</b>
<b>2.5.5 Ensaio do anel J (PJ) - J-Ring test.....</b>	<b>45</b>
<b>2.5.6 Ensaio da coluna de segregação (SR).....</b>	<b>47</b>
<b>2.5.7 Ensaio do tubo U.....</b>	<b>49</b>
<b>2.5.8 Ensaio do Orimet.....</b>	<b>50</b>

<b>2.5.9 Ensaio da Caixa U - U-Box test.....</b>	<b>51</b>
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>53</b>
3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	53
3.2 MATERIAIS.....	53
3.2.1 Cimento.....	53
3.2.2 Agregado miúdo.....	54
3.2.3 Agregado Graúdo.....	54
3.2.4 Aditivo Superplastificante.....	55
3.2.5 Água.....	55
3.2.6 Resíduo de vidro.....	55
3.3 MÉTODOS DE ENSAIO PARA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	55
3.3.1 Determinação da massa unitária do agregado miúdo no estado solto.....	57
3.3.2 Determinação da composição granulométrica do agregado miúdo.....	59
3.3.3 Determinação da composição granulométrica do agregado graúdo.....	60
3.3.4 Determinação do teor de argila em torrões nos agregados.....	62
3.3.5 Avaliação das impurezas orgânicas das areias destinadas ao preparo do concreto.....	63
3.3.6 Determinação do teor de materiais pulverulentos no agregado miúdo.....	64
3.3.7 Determinação da massa específica do agregado miúdo por meio do frasco de Chapman.....	66
3.3.8 Determinação da massa específica do agregado graúdo por meio do frasco de Chapman.....	67
3.3.9 Determinação da finura do cimento.....	68
3.4 DOSAGEM EXPERIMENTAL DO CONCRETO CONVENCIONAL.....	70
3.4.1 Método de dosagem da Associação Brasileira de Cimento Portland-ABCP.....	70
3.4.2 Execução de dosagem experimental de concreto convencional....	76
3.4.3 Determinação da resistência à compressão.....	81

3.5 DOSAGEM EXPERIMENTAL DO CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL.....	81
3.5.1 Verificação da fluidez e escoamento do concreto auto-adensável.....	82
3.5.2 Verificação da viscosidade plástica aparente através do t500 do concreto auto-adensável.....	83
3.5.3 Verificação da viscosidade plástica aparente através do V-funil test do concreto auto-adensável.....	83
3.5.4 Verificação da habilidade de passante através do L-Box test do concreto auto-adensável.....	84
3.5.5 Verificação da resistência a segregação através da coluna de segregação do concreto auto-adensável.....	85
3.5.6 Desenvolvimento para produção do primeiro traço de CAA.....	86
3.5.7 Desenvolvimento para produção do segundo traço de CAA.....	87
3.5.8 Desenvolvimento do traço de CAA com resíduo de vidro.....	88
3.6 VERIFICAÇÃO DE TRINCAS E FISSURAS NA SUPERFÍCIE DE UMA PLACA MOLDADA COM CAA .....	88
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>89</b>
4.1 AGREGADOS.....	90
4.1.1 Agregado miúdo.....	90
4.1.2 Agregado graúdo.....	93
4.2 CIMENTO.....	96
4.3 ANÁLISES DO RESÍDUO DE VIDRO MOÍDO UTILIZADO.....	96
4.4 DOSAGEM EXPERIMENTAL DO CONCRETO CONVENCIONAL.....	99
4.5 DOSAGEM EXPERIMENTAL DO CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL.....	100
4.5.1 Desenvolvimento do primeiro traço de CAA.....	100
4.5.2 Desenvolvimento do segundo traço de CAA.....	102
4.6 DOSAGEM EXPERIMENTAL DO CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL COM RESÍDUO DE VIDRO.....	104
4.7 VERIFICAÇÃO DE TRINCAS E FISSURAS NA SUPERFÍCIE DA PLACA OBTIDA.....	106

**5 CONCLUSÃO.....107**

**7 REFERENCIAS.....109**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Componentes do tubo de CRT (Silva,2011).....	37
Figura 2 – Cone de Abrams (BARROS, 2009).....	39
Figura 3 – Funil V (BARROS, 2009).....	43
Figura 4 – Caixa L (BARROS, 2009).....	44
Figura 5 – Anel J (BARROS, 2009).....	46
Figura 6 – Ensaio da coluna de segregação (ALENCAR et al., 2010).....	48
Figura 7 – Tubo U (BARROS, 2009).....	50
Figura 8 – Orimet sem e com anel J (BARROS, 2009).....	51
Figura 9 – Caixa U (BARROS, 2009).....	52
Figura 10- Determinação da massa unitária da areia pela NBR 7251–1982.....	58
Figura 11- Determinação da massa unitária do seixo pela NBR 7251–1982.....	59
Figura 12 - Ensaio de granulometria pela NBR 7217-1987.....	59
Figura 13 - Ensaio de granulometria pela NBR 7217-1987.....	61
Figura 14 - Determinação do teor de material pulverulento pela NBR 7219.....	65
Figura 15 - Determinação da massa específica real da areia pela NBR 9776-1987.....	66
Figura 16 - Determinação da massa específica real do seixo pela NBR 9937 - 1987.....	68
Figura 17 – Exemplo de utilização das Curvas de Abrams.....	72
Figura 18 – Pesagem dos materiais para a dosagem do concreto convencional.....	77
Figura 19 – Pesagem dos materiais para a dosagem do concreto convencional.....	77
Figura 20 – Colocação dos materiais na betoneira.....	78

Figura 21 - Betoneira de eixo inclinado com capacidade de 120 litros (Laboratório da UFAM).....	78
Figura 22 – Concreto convencional após 5 minutos de mistura.....	78
Figura 23 - Slump Test ( Laboratório da UFAM).....	79
Figura 24 - Moldagem dos corpos de prova.....	80
Figura 25 – Corpo de prova moldados após ensaio do concreto.....	80
Figura 26 – Medição de um dos diâmetros no Ensaio de Fluidez do Slump test.....	82
Figura 27 – Ensaio de viscosidade plástica aparente do V-funil test.....	84
Figura 28 - Ensaio de habilidade de passante do L-Box test.....	85
Figura 29 – Preparo da placa de concreto de 39 x 65 x 5cm.....	89
Figura 30 - Gráfico granulométrico do agregado miúdo.....	91
Figura 31 - Gráfico granulométrico do agregado graúdo.....	94
Figura 32 – Gráfico granulométrico a raio laser do resíduo de vidro.....	97
Figura 33 – Gráfico de difração a raio-x do resíduo de vidro.....	99
Figura 34 – Ensaio do Slump test com abatimento de 62 mm.....	100
Figura 35 – Superfície da placa de concreto, com imagem normal (esquerda) e ampliada em 30 vezes (direita). Em ambos os casos sem trincas ou fissuras visíveis.....	106

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Aceitação do CAA quanto ao espalhamento: slump-flow (mm).....	40
Tabela 2 - Aceitação do CAA quanto à viscosidade plástica aparente: $t_{500}$ (s) e funil V (s).....	42
Tabela 3 - Aceitação do CAA quanto à habilidade passante: anel J (mm) e caixa L (H2/H1).....	47
Tabela 4 - Aceitação do CAA quanto à resistência à segregação: coluna de segregação (%).....	49
Tabela 5 - Faixas dos parâmetros que asseguram o auto adensamento do concreto.....	52
Tabela 6 - Ensaio físicos e químicos do cimento CP-II-Z.....	53
Tabela 7 - Consumo de água para abatimento do concreto (L/m <sup>3</sup> ).....	72
Tabela 8 - Consumo de agregado graúdo.....	73
Tabela 9 - Composição granulométrica do agregado miúdo.....	91
Tabela 10 - Faixas de trabalho do módulo de finura.....	92
Tabela 11 - Composição granulométrica do agregado graúdo.....	94
Tabela 12 - Ensaio de picnometria a gás hélio do resíduo de vidro.....	96
Tabela 13 - Ensaio de Eflorescência de raio-x do resíduo de vidro.....	98
Tabela 14 - Resistencia do concreto convencional.....	100
Tabela 15 - Ensaio e características do CAA para o primeiro traço.....	101
Tabela 16 - Resistência do CAA obtido para o primeiro traço.....	102
Tabela 17 - Ensaio e características do CAA para o segundo traço.....	103
Tabela 18 - Resistência do CAA obtido para o segundo traço.....	103
Tabela 19 - Ensaio e características do CAA com resíduo de vidro.....	104
Tabela 20 - Resistência do CAA com resíduo de vidro.....	105

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

%	Porcentagem
$\gamma$	Massa específica real do agregado miúdo em g/cm <sup>3</sup> .
$\gamma_{\text{água}}$	Massa específica da água
$\gamma_{\text{brita}}$	Massa específica do agregado graúdo
$\gamma_{\text{cim}}$	Massa específica do cimento.
$\gamma_m$	Massa específica do agregado miúdo
$\rho_s$	Densidade da areia em kg/ dm <sup>3</sup> .
$a/c$	Relação água/cimento.
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland ABCP
ACI	Método do American Concrete Institute
$\rho_{\text{água}}$	Consumo de água em quilograma por m <sup>3</sup>
$\rho_{\text{brita}}$	Consumo de agregado graúdo em quilograma por m <sup>3</sup>
C <sub>3</sub> A	Alumínio Tricálcico
Ca	Consumo de água.
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de Cálcio
CAA	Concreto auto-adensável
CAD	Concreto de Alto Desempenho
C <sub>b</sub>	Consumo de agregado graúdo.
C <sub>c</sub>	Consumo de cimento.
CC	Concreto convencional
cim	Consumo de cimento em quilogramas por m <sup>3</sup>
cm <sup>3</sup>	Centímetros cúbicos
CP-II Z	Cimento Portland tipo II com adição de Pozzolana

C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
EFNARC	European Federation Specialist Construction Chemicals and Concrete
<i>F</i>	Índice de finura do cimento em %
Fcj 28	Resistencia a compressão aos 28 dias em MPa.
Fck	Resistencia a compressão estabelecida em MPa.
FT	Faculdade de Tecnologia
g	Gramma
H	Altura
Kg	Quilograma
<i>L</i>	Leitura do frasco após a colocação do agregado miúdo em ml.
L	Litro
LEM	Laboratório de Materiais
LS	Lignossulfonatos Modificadores
mB	Massa da Base
MF	Módulo de finura
<i>MI</i>	Massa inicial do material.
mm	Milímetro
<i>MP</i>	Material Pulverulento em %.
<i>MS</i>	Massa do material seco depois da lavagem.
MS	Sulfonatos ou Melaminas
mT	Massa do Topo
<i>Mu</i>	Massa unitária compactada do agregado graúdo.
NBR	Norma Brasileira
NS	Naftaleno Sulfonato ou Naftaleno
<i>P</i>	Massa inicial do cimento em g

P1	Pesagem 1
P2	Pesagem 2
PC	Policarboxilatos
<i>PF</i>	Peso final da amostra em Kg
<i>PI</i>	Peso inicial da amostra em kg
PJ	Ensaio do <i>J-Ring test</i> .
PL	Ensaio do L-Box test.
$P_m$	Peso do (recipiente + media das pesagens do material) em kg.
Pm	Média das pesagens
$P_o$	Peso do recipiente em kg.
PVC	Poli cloreto de vinil
<i>R</i>	Massa retida na peneira em g.
Sd	Desvio padrão.
SF	Ensaio do Slump - flow
SR	Ensaio da coluna de segregação SR
TA	Teor de argila em torrões em %.
UFAM	Universidade Federal do Amazonas
<i>V</i>	Volume do recipiente em $\text{dm}^3$
<i>Vb</i>	Volume do agregado graúdo seco por metro cúbico de concreto.
VF	Ensaio do V-funnel test.
<i>Vm</i>	Volume do agregado miúdo
VMA	Aditivo modificador de viscosidade
VS	Ensaio do T500

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto hoje desempenha um papel muito importante no desenvolvimento de uma sociedade moderna. Seus benefícios para a sociedade vêm de sua ampla faixa de aplicações, sendo este usado na construção de escolas, hospitais, prédios, pontes, túneis, barragens, sistemas de esgotos, calçadas, pistas, estradas e muitos outros produtos que melhoram a qualidade de vida das pessoas.

O concreto é de fato o material mais utilizado pelo homem no mundo, com quase três toneladas anuais por pessoa. Usa-se o dobro de concreto em todo o mundo em relação aos outros materiais de construção, incluindo madeira, plástico, aço e alumínio. Nenhum destes outros materiais podem substituir o concreto em termos de preço, eficácia e desempenho para a maioria dos propósitos em construção (CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE, 2007).

Através deste material, descoberto a alguns séculos, o ser humano pode desenvolver obras mais complexas, de diversos tamanhos e resistências variadas. Graças a sua aplicação houve um grande salto na melhoria do padrão de vida para todas as pessoas que o utilizaram e ainda o utilizam (CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE, 2007).

Dentre os diversos tipos de concretos existentes, destaca-se o concreto auto-adensável. Concreto auto-adensável (CAA) é uma tecnologia superior ao concreto convencional (CC), pois o mesmo não necessita de nenhum equipamento para ser compactado, tendo uma capacidade de auto-compactação através da força da gravidade. Esse tipo de concreto tem inúmeros benefícios sobre o CC, pois melhora a qualidade do produto final dando maior resistência as estruturas, sendo de fácil aplicação, e utilizando praticamente todos os materiais do concreto convencional.

Este trabalho tem por finalidade aplicar um método já existente do concreto auto-adensável para a região de Manaus utilizando o resíduo moído de vidro. Os

materiais da região de Manaus para a produção de concreto auto-adensável têm suas características particulares em relação ao restante do país onde já existem alguns estudos em relação a este material e sua aplicação.

### 1.1 OBJETIVO GERAL

Estudar as principais características físicas e mecânicas de um concreto auto-adensável produzido com materiais obtidos na cidade de Manaus e resíduo moído de vidro como modificador de viscosidade.

### 1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- ✓ Caracterizar os agregados e o resíduo moído de vidro que serão empregados na produção do concreto auto-adensável;
- ✓ Aplicar um método de dosagem já existente para obtenção de um traço para o concreto convencional que se adapte aos materiais da região e posteriormente possa ser empregado para o desenvolvimento do concreto auto-adensável;
- ✓ Produzir o concreto auto-adensável utilizando materiais obtidos na cidade de Manaus;
- ✓ Estudar a utilização do resíduo moído de vidro como modificador de viscosidade do concreto auto-adensável.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

As pesquisas mais recentes sobre esse assunto são voltadas para o estudo do concreto auto-adensável produzidos na região Sul e Sudeste do país, onde os materiais utilizados para a sua produção têm características diferentes dos utilizados na região Norte.

O estudo a ser realizado do concreto auto-adensável será utilizando o seixo rolado extraído na cidade de Manaus, que é um material abundante na região e tem

algumas características diferentes da pedra britada, este material extraído na região geralmente apresentando alto teor de finos, granulometria bem variada e superfície mais lisa, características estas que podem causar diferenças significativas no produto final obtido a partir da produção do concreto auto-adensável.

A escassez de pedra britada na cidade de Manaus torna o preço de aquisição deste produto muito elevado, assim, as empresas da área de construção civil optam pelo seixo rolado devido a sua abundância na região e custo mais baixo.

Já para a utilização do resíduo de vidro como modificador de viscosidade, em uma faixa granulométrica bem fina, poderá ter um efeito físico de mudar a consistência do concreto auto-adensável além da possibilidade de obter ganhos de resistência e de produzir uma economia na sua produção, pois para se obter o mesmo efeito é necessário a utilização de um aditivo modificador de viscosidade, que geralmente vem de outros estados com um preço elevado para a sua utilização. O resíduo de vidro poderá atender os critérios técnicos e dar uma destinação final a um resíduo que em geral é colocado em locais inadequados de armazenamento, como lixões.

A utilização do concreto auto-adensável em grande escala na região Norte resultará em inúmeros benefícios para as obras e empresas do ramo da construção civil, como facilidade em sua aplicação, redução do custo final e melhora na qualidade do produto eliminando os erros de adensamento evitando nichos e bicheiras além do benefício para o meio ambiente com a utilização do resíduo de vidro na forma de material de preenchimento.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 DEFINIÇÃO

Segundo a NBR 15823 (2010), para um concreto convencional se tornar um concreto auto-adensável ele deve adquirir quatro especificações principais que são fluidez e escoamento, viscosidade plástica aparente, habilidade de passante e resistência a segregação. Segundo esta norma tais especificações são definidas como:

Fluidez e escoamento é a habilidade que o concreto tem de fluir e preencher todos os espaços da forma em fluxo livre.

Viscosidade plástica aparente é uma propriedade relacionada à sua consistência no estado fresco que influencia a resistência ao escoamento.

Habilidade de passante é a característica que o concreto fresco tem de fluir através dos espaços confinados e aberturas estreitas da armadura sem perder sua uniformidade ou causar algum bloqueio.

Resistência a segregação é a propriedade que o concreto tem de se manter homogêneo e coeso durante o transporte, lançamento e acabamento.

A European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems define que para um concreto convencional se tornar auto-adensável, este deve alcançar as seguintes propriedades: fluidez, habilidade de passante e resistência à segregação (EFNARC, 2002).

Segundo Okamura (1997), o concreto auto-adensável é uma mistura que pode ser adensada em qualquer local na fôrma, apenas por meio de sua própria acomodação devido ao seu peso próprio e, sem necessidade de vibração.

Segundo Miao Liu (2009), o concreto auto-adensável é capaz de fluir sob o seu próprio peso e encher completamente a forma, enquanto se mantém coeso e homogêneo, mesmo com presença de altas densidades de armadura.

Segundo Gaywala & Raijiwala (2011) o concreto auto-adensável endurecido tem as mesmas propriedades de durabilidade e resistência do concreto vibrado tradicionalmente, além de ser capaz de preencher completamente locais onde exista uma alta quantidade de armadura, onde o concreto convencional não tem possibilidades de preenchimento.

## 2.2 HISTÓRICO E DESENVOLVIMENTO

Segundo GOMES & BARROS (2009), o concreto auto-adensável foi estudado no Japão para solucionar os problemas de baixa durabilidade do concreto armado na construção civil. Na década de 80, Hajime Okamura, da Universidade de Tóquio, começou a desenvolver e coordenar os primeiros estudos desta nova tecnologia aplicada a este novo tipo de concreto que foi desenvolvido para suprir uma necessidade de adquirir estruturas mais duráveis e com um menor tempo de execução, visando uma auto-adensabilidade do concreto sem a ajuda de equipamentos mecânicos para sua compactação.

Por vários anos o problema de durabilidade do concreto nas estruturas foi o principal foco de pesquisa no Japão. Para poder produzi-las com uma boa qualidade exigia-se uma compactação adequada por operários especializados, porém esta mão-de-obra estava ficando escassa na construção civil japonesa e conseqüentemente com a falta destes operários os serviços estavam diminuindo sua qualidade no produto final (OKAMURA & OUCHI apud GOMES & BARROS, 2003).

A falta desses operários especializados não foi o único problema enfrentado para a durabilidade das estruturas, a baixa trabalhabilidade dos concretos e elementos estruturais com formas complexas e altas taxas de armadura também eram grandes desafios a se vencerem (BILLBERG apud GOMES & BARROS, 1999).

O desenvolvimento se iniciou em 1986 na Universidade de Tóquio no Japão com seu primeiro protótipo obtido em 1988 por Okamura destinando-se a melhorar as propriedades de durabilidade de estruturas de concreto (MD NOR ATAN & HANIZAM AWANG, 2011).

Os estudos prévios de Okamura foram iniciados em ensaios que descreviam o fluxo do concreto e verificou-se que o fluxo ocorria pelo contato entre os agregados bloqueando a passagem do concreto (GOMES & BARROS apud BILLBERG, 1999).

### 2.3 VANTAGENS

A utilização do concreto auto-adensável em grande escala na região Norte e em regiões onde se utilizam o seixo rolado terão inúmeros benefícios para as obras e empresas do ramo da construção civil. A eliminação da necessidade de vibração ocasiona inúmeros benefícios econômicos e melhor técnica de aplicação.

Algumas dessas vantagens podem ser percebidas através dos seguintes benefícios:

- I) Fornece bom acabamento sem quaisquer poros de superfície e melhora a aparência estética do concreto (SAFIUDDIN, 2008);
- II) Eliminação do barulho de vibração, diminuindo a poluição sonora das obras, principalmente em centros urbanos onde existe a necessidade de maior silêncio (SAFIUDDIN, 2008);
- III) Diminuição da mão-de-obra para sua aplicação, pois não precisa de operários para se fazer o serviço de vibração (TUTIKIAN, 2004);
- IV) A facilidade de adensamento pode aumentar a durabilidade do concreto, evitando que ocorram falhas de concretagem como nichos, bicheiros e vazios dentro do concreto (TUTIKIAN, 2004);

- V) Capacidade de preenchimento de formas de grandes dimensões, formas curvas, esbeltas com grande quantidade de armadura (TUTIKIAN, 2004);
- VI) Maior segurança no trabalho, devido à redução do número de operários no canteiro (TUTIKIAN, 2004);
- VII) Obtenção de ganhos ecológicos, pois em sua composição poderá ser utilizado opcionalmente teores de resíduos industriais e de materiais reciclados como sílica da casca de arroz e o resíduo de vidro (TUTIKIAN, 2004);
- VIII) Poupa uma grande quantidade de cimento, devido ao diâmetro reduzido dos componentes estruturais (SAFIUDDIN, 2008);
- IX) Simplifica a construção das estruturas de concepção complicada (SAFIUDDIN, 2008).

Portanto, o concreto auto-adensável pode tornar-se uma excelente opção para o setor da construção civil. É mais eficiente que o concreto convencional, sem grandes alterações em sua estrutura e de fácil aquisição, podendo ser dosado no canteiro de obra ou em centrais de concreto. Pode também ser lançado com bombas, guias ou simplesmente espalhado manualmente.

## 2.4 MATERIAIS CONSTITUINTES

Os materiais que são utilizados para a preparação do concreto auto-adensável praticamente são os mesmos que o concreto convencional, mas para o CAA existe uma quantidade maior de adição de minerais quimicamente ativos, modificadores de viscosidade e superplastificantes.

Portanto, existe um consenso no meio profissional e técnico, de que alguns materiais utilizados para a preparação CAA tem algumas características que afetam a mistura, permitindo otimizar as propriedades reológicas, mecânicas e de durabilidade do concreto. Deve-se prestar atenção quando o concreto auto-

adensável se encontra no estado fresco, pois ele é muito mais sensível às variações de qualidade e uniformidade dos componentes que os constitui.

#### **2.4.1 Cimento**

O cimento que pode ser utilizado para produção de Concreto Auto-Adensável é o mesmo utilizado nos concretos convencionais, sendo as mesmas prescrições referentes a sua durabilidade e ao seu uso adequado. O cimento mais indicado é o mesmo usado para o concreto convencional, ou seja, aquele que tem melhor resistência à compressão e menor variabilidade de resistência mecânica (TUTIKIAN & DAL MOLIN, 2008).

O cimento deve possuir um cuidadoso controle de granulometria, e também produzir baixo ou moderado calor de hidratação para controlar as variações no volume do concreto (Struble e Hawkins, 1994).

O cimento deve melhorar a fluidez do concreto e evitar um endurecimento prematuro durante minutos após a mistura com água. Além disso, ele deve ser compatível com os aditivos químicos aplicados ao cimento da mistura utilizada (Safiuddin 2008).

Tutikian apud Gjorv (1992) completam que na medida em que a reologia de um cimento é determinada pela quantidade de Alumínio Tricálcico ( $C_3A$ ), quanto menor for a quantidade deste elemento mais fácil será seu controle reológico – bem como o endurecimento da mistura se dará com um tempo de maior duração. Cimentos com mais de 10% de Alumínio Tricálcico ( $C_3A$ ) podem ter perda da fluidez dificultando sua aplicação dentro do canteiro de obra.

Quando se tratar da granulometria do cimento, quanto maior for o grão do cimento ou maior superfície de contato com a água diminuirá a distância e aumentará a frequência de colisão entre elas, reduzindo a tensão de escoamento consequentemente aumentando a viscosidade da mistura. Assim, cimentos com maior superfície específica são mais apropriados para aplicação do concreto auto-

adensável, apesar de se tomar um cuidado maior com relação ao calor devido à hidratação e retração do concreto na sua aplicação (Safiuddin 2008).

#### **2.4.2 Agregado miúdo**

Para a produção do concreto auto-adensável pode-se utilizar os tipos de areias convencionais do mercado de construção civil, tanto areias naturais, quanto areias obtidas de processos industriais. As areias naturais (depósito eólico e beira de rio) são mais indicadas por possuírem textura mais lisa e uma forma mais arredondada. Já no caso das areias industriais deve-se tomar mais cuidado, pois apresentam formas granulométricas descontínua, mas, isso pode ser corrigido com a adição de outro tipo de areia como a areia média de rio (TUTIKIAN & DAL MOLIN, 2008).

As propriedades físicas do agregado fino influenciam no desempenho do concreto no estado fresco e endurecido. Por exemplo, a forma das partículas, a textura da superfície, área de superfície e teor de vazios afetam a necessidade da água de mistura e resistência à compressão do concreto (ACI 211.4R-93, 2004).

Além disso, as características físicas do agregado fino influenciam consideravelmente no fluxo de argamassa, e assim podem afetar a capacidade de fluir o concreto auto-adensável (Hu e Wang 2005). As diretrizes publicadas mostram que os agregados finos podem produzir um efeito mais significativo do que agregados graúdos nas propriedades frescas do concreto auto-adensável. (SCCEPG 2005).

Segundo Okamura e Ouchi (2003), quanto mais anguloso forem as partículas do agregado miúdo, maior será sua resistência ao cisalhamento das argamassas dificultando a deformabilidade do concreto. O agregado miúdo está condicionado à demanda de água, fator de influência sobre a coesão e fluidez do concreto auto-adensáveis. Areias com formas arredondadas e lisas são as mais indicadas, porque aumentam a fluidez da mistura para uma mesma quantidade de água para o concreto auto-adensável.

Quanto menor for o módulo de finura do agregado miúdo mais indicado será para a produção do concreto de elevada coesão. Bartos (2000) alerta que para areias com módulo de finura que as classifique como muita grossa é três vezes maior a possibilidade de segregação do concreto e assim devem ser evitadas em concretos auto-adensável. Seu módulo de finura não deve passar de mais ou menos 0,20 para garantir a estabilidade das características reológicas durante a sua produção (TUTIKIAN & DAL MOLIN apud GÓMES & MAESTRO, 2005).

O agregado que passa na peneira 0,125mm é como um suporte a mais do fíler para efeitos de dosagem, que juntos com as partículas de finos e dos aglomerantes, podem aumentar a viscosidade e coesão da mistura (EFNARC apud TUTIKIAN & DAL MOLIN, 2002).

Tutikian e Dal Molin apud Otaviano (2007) alertam para a realização de um controle rigoroso do agregado miúdo com relação a sua umidade, que consiste em uma das principais causas de variação da fluidez do concreto auto-adensável.

### **2.4.3 Agregado graúdo**

As exigências com relação aos agregados graúdos são mais restritas quanto a sua dimensão máxima, pois tendo um controle efetivo, evitará que ocorram tendências a segregação, e que o agregado possa passar por todos os obstáculos da armadura (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

Segundo Tutikian e Dal Molin apud Gomes e Maestro (2005), recomenda-se que a dimensão máxima do agregado graúdo seja inferior a  $2/3$  do espaçamento entre as barras e a  $3/4$  do recobrimento mínimo de concreto. Isso significa que na prática não será utilizado tamanhos maiores que 19 mm, sendo utilizados tamanhos entre 12,5 e 19mm.

A forma dos agregados graúdos também afetam consideravelmente as propriedades do concreto auto-adensável. Agregados redondos são melhores do que os agregados angulares para a capacidade de fluir, uma vez que induzem menos atrito a viscosidade plástica de mistura do concreto devido a fricção inter-

partícula (Geiker et al. 2002). Por outro lado, os agregados irregulares e angulares são conducentes a elevada resistência de ligação interfacial forte, devido à textura áspera da superfície e características de aderência (Taylor et al. 1996).

O coeficiente de atrito e a forma do agregado graúdo exercem um papel fundamental na integração do agregado pasta, porém se a forma do agregado for muito angulosa, pode haver um aumento no consumo de água ou redução da trabalhabilidade. Por isso é indicado um coeficiente mais próximo de um (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

#### **2.4.4 Adição de minerais**

As adições minerais são normalmente utilizadas para modificar a viscosidade do concreto auto-adensável aumentando sua coesão, evitando que ocorra a segregação do agregado graúdo.

O fíler para concreto auto-adensável são materiais com menos de 0,125 mm e são chamados de pó de enchimentos e incluem cinza volante, pó-de-pedra e etc. Os materiais de enchimento devem ter pelo menos 75% de material que passam através da peneira de 0,063 mm, para uma melhor estabilidade (SYED ALI RIZWAN et al, 2008).

A adição de minerais desempenha um papel importante para a resistência e durabilidade do concreto tanto física quanto quimicamente, além da responsabilidade pela resistência a segregação.

A reação química dos minerais ocorre com a reação do hidróxido de cálcio, composto solúvel que se forma na reação do cimento/água, dele se forma um composto resistente o Silicato Hidratado de Cálcio que preenche os maiores vazios existentes na pasta de cimento, melhorando o desempenho do concreto na durabilidade e propriedade mecânica. Dependendo da superfície específica e da composição química das partículas essas reações podem ser lentas ou rápidas (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

As adições minerais que são incorporadas ao concreto auto-adensável podem ser divididas em dois grandes grupos, as adições minerais quimicamente ativas e àquelas sem atividade química.

As adições minerais quimicamente ativas podem ser tanto material pozolânico quanto material cimentante. Segundo a NBR 12653/1992, a pozolana é definida como um material que reage quimicamente com o Hidróxido de Cálcio –  $\text{Ca}(\text{HO})_2$  – produzindo a hidratação do cimento que forma compostos resistentes na temperatura ambiente. Deste modo, tais materiais dependem do cimento para atuar.

Os materiais pozolânicos podem ser cinza volante com baixo teor de cálcio, sílica ativa, cinza de casca de arroz e pozolana natural. O material cimentante é formado durante a hidratação do cimento para gera o C-S-H, sendo a sua hidratação geralmente lenta e a quantidade de produtos cimentantes insuficiente para fins estruturais do concreto.

O concreto auto-adensável pode ser preparado tanto com adição de pozolânicas como de cimentantes, entretanto as adições pozolânicas ultra-finas mostram-se mais ativas no aumento da coesão do concreto auto-adensável bem como no aumento da durabilidade e resistência. Misturas de combinações dos dois minerais têm sido utilizadas com grande desempenho na construção civil (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

Segundo Alencar e Helene (2006), quanto mais finas forem as adições, menor será o teor a ser substituído devido ao aumento de frequência de contato entre elas em determinado volume, o que influencia no aumento da viscosidade e coesão da mistura.

Conforme Collepardi (2003) a Nanossílica ou sílica coloidal amorfa ultrafina composta por partículas de diâmetro 5-50nm de sílica ativa, disponível em solução 10-50% de sólidos são extremamente eficientes para reduzir a exsudação e aumentar a resistência à segregação, sendo sua dosagem mais usual e entre 3-5% da massa do aglomerante.

A adição de mineral sem atividade química acontece como os fíleres, onde sua ação tem um efeito físico de envolvimento dos grãos e sua ação como pontes de nucleação para hidratação do cimento. A adição do fíler deve ser feita substituindo o agregado miúdo, sendo que ao apresentar menor finura, este conseqüentemente melhora as propriedades de compacidade granular e coesão da mistura. Os fíleres podem ser naturais ou materiais inorgânicos processados. O calcário e a areia são atualmente os materiais mais utilizados para a produção do Concreto Auto-Adensável (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

Existem três principais efeitos físicos causados pela a adição de minerais no concreto auto-adensável:

- I) O fíler, que é o aumento da densidade da mistura através da ocupação dos vãos livres pelas minúsculas partículas das adições de minerais;
- II) A alteração da microestrutura da zona de transição, reduzindo ou eliminando a água livre que fica presa sob os agregados;
- III) Refinamento da estrutura de poros e dos produtos de hidratação do cimento ocasionados pelas partículas das adições que podem agir como pontos de nucleação para sua hidratação (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

#### **2.4.5 Aditivo modificadores de viscosidade (VMA)**

Os materiais utilizados para a produção do aditivo modificador de viscosidade são geralmente óxidos de polietileno, éteres de celulose, extratos naturais, e poliácridamidas ou álcool polivinílico. Modificadores de viscosidade são polímeros solúveis em água com elevado peso molecular, utilizados para elevar a viscosidade da água. Estes compostos aumentam a coesão do concreto fresco, reduzindo a sua tendência para segregar (CRISTIAN DRUTA, 2003).

Eles funcionam fixando suas moléculas longas as moléculas de água, processo que inibe o deslocamento livre da água. Essas misturas são úteis para melhorar as propriedades dos concretos com pouco cimento. No último caso, eles

reduzem as pressões do bombeamento através de propriedades que melhoram a lubrificação, bem como a redução de tendência a segregação (Cristian Druta 2003).

Os aditivos desta categoria são utilizados para melhorar a coesão do concreto a ser misturado com água, sendo recomendado que sejam adicionados em concretos aplicados em locais com grandes quantidades de armadura, com fôrmas com características geométrica incomum devido às propriedades de melhorar a lubrificação e coesão do concreto (Dodson, 1990).

#### **2.4.6 Aditivo superplastificante**

Aditivos superplastificantes são aditivos feitos a base de polímeros sintetizados que dão ao concreto a característica de alta fluidez na mistura, (HARTMANN, 2002). Os aditivos superplastificantes podem ser agrupados em quatro categorias de acordo com sua composição química. Os Lignossulfonatos Modificadores (LS), que incorporam o ar e retardam a pega do cimento. Sendo conhecidos com aditivos de primeira geração são utilizados como redutores de água, onde em alguns casos são utilizados como superplastificantes.

Naftaleno Sulfonato ou Naftaleno (NS), não incorporam ar e não interferem no tempo de pega de forma considerável no cimento. São conhecidos como aditivos de segunda geração, permitindo a redução de água em até  $\frac{1}{4}$  da quantidade necessária para a mistura.

Os Sulfonatos ou Melaminas (MS) apresentam uma tendência a retardar a pega e incorporar uma pequena quantidade de ar no concreto. Também são conhecidos como aditivos de segunda geração e têm as mesmas propriedades de uso do Naftaleno Sulfonato ou Naftaleno.

Os Policarboxilatos (PC), são os aditivos mais aconselháveis para a produção do concreto auto-adensável, por serem de alto desempenho e terem um caráter de dispersão e desfloculação nas partículas do cimento, ocasionando assim uma redução de água na mistura de até 40% mantendo a mesma trabalhabilidade.

Os aditivos mais utilizados para a produção de concreto auto-adensável são a base de Policarboxilatos, pois melhoram sensivelmente a dispersão das partículas de cimento, em comparação aos aditivos de segunda e primeira geração. O superplastificante de policarboxilatos constituído de polímeros de Éter Carboxílico com largas cadeias laterais realizam a dispersão das partículas do cimento com maior eficiência do que seus antecessores, isso ocorre porque sua cadeia é ramificada, aumentando conseqüentemente sua área de contato superficial. Além do que geram uma energia capaz de estabilizar a refração e dispersão das partículas do cimento de preparação do concreto auto-adensável.

Um dos grandes problemas no uso desses aditivos tem sido o tempo de aplicação, pois a consistência obtida por esses aditivos duram um curto período de tempo em relação aos concretos convencionais. Dependendo do local e das condições, o concreto se mantém sob ação do superplastificante por um período de 30 a 60 minutos. A trabalhabilidade do aditivo superplastificante atinge seu máximo geralmente nos 10 a 15 primeiros minutos após sua aplicação e em seguida vai perdendo o efeito gradativamente, por esse motivo a aplicação do aditivo superplastificante deve ser feita momentos antes do lançamento do concreto na obra.

Os fatores que podem afetar a ação dos aditivos superplastificantes são: a dosagem no momento de colocação de mistura fina, temperatura local, umidade, procedimento de mistura, tipo de cimento, consistência inicial do concreto e a presença de outros tipos de aditivo no concreto (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

Segundo Bucher (1989), todos os tipos de cimentos melhoram sua trabalhabilidade com a utilização do aditivo superplastificante, embora a eficiência seja diferente para cada tipo de cimento devido a finura dos grãos. Quanto menor for a finura menor será o rendimento devido a diminuição da concentração específica das moléculas absorvidas na superfície dos grãos de cimento.

Superplastificantes redutores de grande quantidade de água tem baixo peso molecular, sendo polímeros solúveis destinados a atingir valores elevados de

redução do volume aplicado de água em misturas de cimento, na faixa de 12-30%, a fim de alcançar uma queda desejada em seu uso (Gagne et al., 1996).

#### **2.4.7 Resíduo de vidro cinescópico**

O vidro cinescópico é geralmente utilizado em eletroeletrônicos como computadores e televisores, sendo essencialmente um tubo de vidro com gargalo estreito, que fica na parte de baixo do monitor e que se alarga até formar uma base mais ampla, cuja superfície externa é a tela. Os elementos que o constitui são um painel de vidro (tela), uma máscara de sombra, um cone de vidro, um canhão eletrônico, um cone metálico interno (Inercone) e uma bobina de deflexão conforme observado na Figura 1 (Silva, 2011).

O vidro cinescópico apresenta característica de massa específica maior do que a maioria dos agregados graúdo e miúdo, ficando sua massa específica com valor médio de aproximadamente  $2,86 \text{ g/cm}^3$  (Silva, 2011).

O funil do CRT (sigla inglês para Tubo de Raios Catódicos) é um vidro com alto índice de refração e grande resistência elétrica, constituído a partir da sílica, álcalis e óxido de chumbo. As principais substâncias refratárias presentes neste material são zircônia ( $\text{ZrO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), titânia ( $\text{TiO}_2$ ) e óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), e os principais fundentes presentes são os óxidos de antimônio ( $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ), óxidos de chumbo ( $\text{PbO}$ ) e minerais de bário (Silva apud Ferreira, 2003).

Segundo os ensaio de lixiviação com solução de chorume no resíduo de vidro cinescópico e concreto com vidro cinescópico realizado por Silva (2011), as amostras apresentaram um nível de concentração no resíduo de vidro cinescópico de 0,571 mg/litro de cromo e de 0,250 mg/litro de chumbo. Já o concreto com vidro de cinescópico apresentou um nível de concentração de 0,105 mg/litro de cromo, não sendo detectado nenhum traço de chumbo ou elemento poluidor. Tais resultados obtidos ficaram abaixo dos limites estabelecidos pelo anexo F da NBR 10004/04.

Ainda no ensaio de lixiviação com solução de água, o resíduo de vidro de cinescópio apresentou concentrações de 0,288 mg/litro de cromo e de 0,300 mg/litro de chumbo, valores abaixo do limite estabelecido pela norma NBR 10004/04.

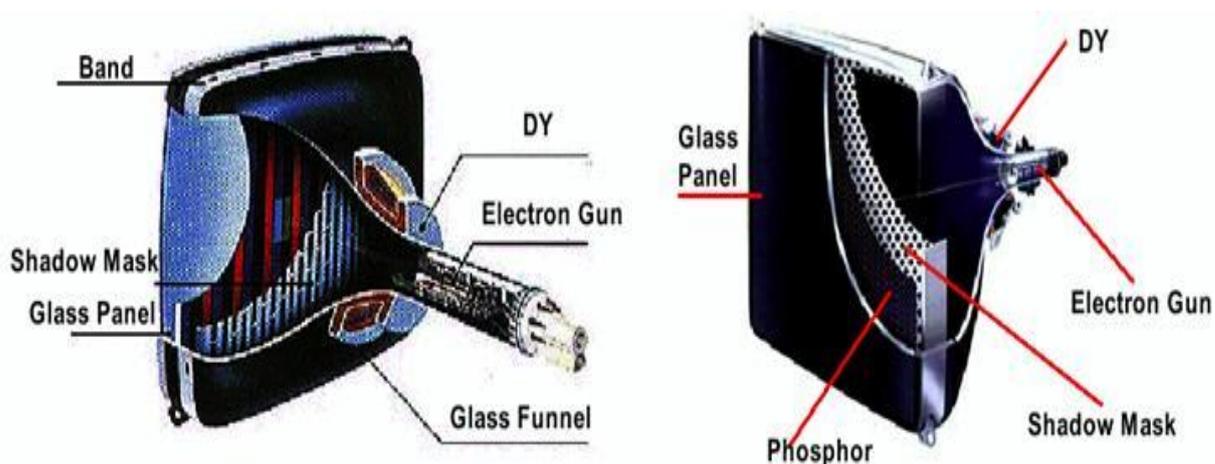


Figura 1 – Componentes do tubo de CRT (Silva, 2011).

Tendo em vista que, o vidro é um material feito com uma massa de sílica em fusão, pode-se verificar que, ao final de seu processo de produção, o vidro apresenta-se como um material composto de sílica amorfa. Sendo o resíduo de vidro classificado pela NBR 10004 (ABNT, 2004) como um resíduo de classe II B, tido como não perigoso e inerte, pode-se empregar este tipo de resíduo em matriz cimentícia, desde que esteja finamente moído, pois como agregado graúdo poderá desencadear reações álcalis-agregado (PAIVA, 2009).

Segundo Paiva, (2009), as adições minerais influenciam na resistência e porosidade da matriz cimentícia melhorando a resistência e as propriedades do concreto. O uso de adições minerais em concreto melhora o comportamento da matriz no estado fresco e endurecido, como densidade, resistência a compressão, exsudação, segregação e trabalhabilidade.

Através do ensaio da classificação e índice de atividade pozolânica baseados na NBR 5752/92, realizado por Paiva (2009), o resíduo de vidro em argamassa de

cimento Portland aos 28 dias de idade apresentou 104% de índice de atividade pozolânica ficando acima do mínimo estabelecido pela norma que é de 75%.

A presença desse tipo de sílica amorfa em sua composição faz do vidro um material com potencialidade para promoção de pozolanicidade, quando apresentar alto grau de finura (PAIVA, 2009).

## 2.5 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CAA NO ESTADO FRESCO, SEGUNDO A ABNT NBR 15823

As características do concreto auto-adensável no estado fresco dependem do tipo de aplicação, da geometria da estrutura, do equipamento de lançamento (bomba, caçamba, grua), da importância do acabamento, entre outros (ALENCAR et al., 2010). A classificação do CAA no estado fresco, segundo a ABNT NBR 15823, como anteriormente mencionada, depende de suas seguintes características:

- a) fluidez e escoamento;
- b) viscosidade plástica aparente;
- c) habilidade passante; e
- d) resistência à segregação.

### 2.5.1 Ensaio de *slump flow*

Segundo a NBR 15823, o valor do espalhamento, medido por meio do ensaio *slump flow*, avalia o grau de fluidez e escoamento da mistura de CAA fresco, por meio do diâmetro de espalhamento da amostra deformada sob o efeito do seu próprio peso. Esse ensaio fornece indicações da habilidade do CAA para preenchimento das fôrmas em fluxo livre.

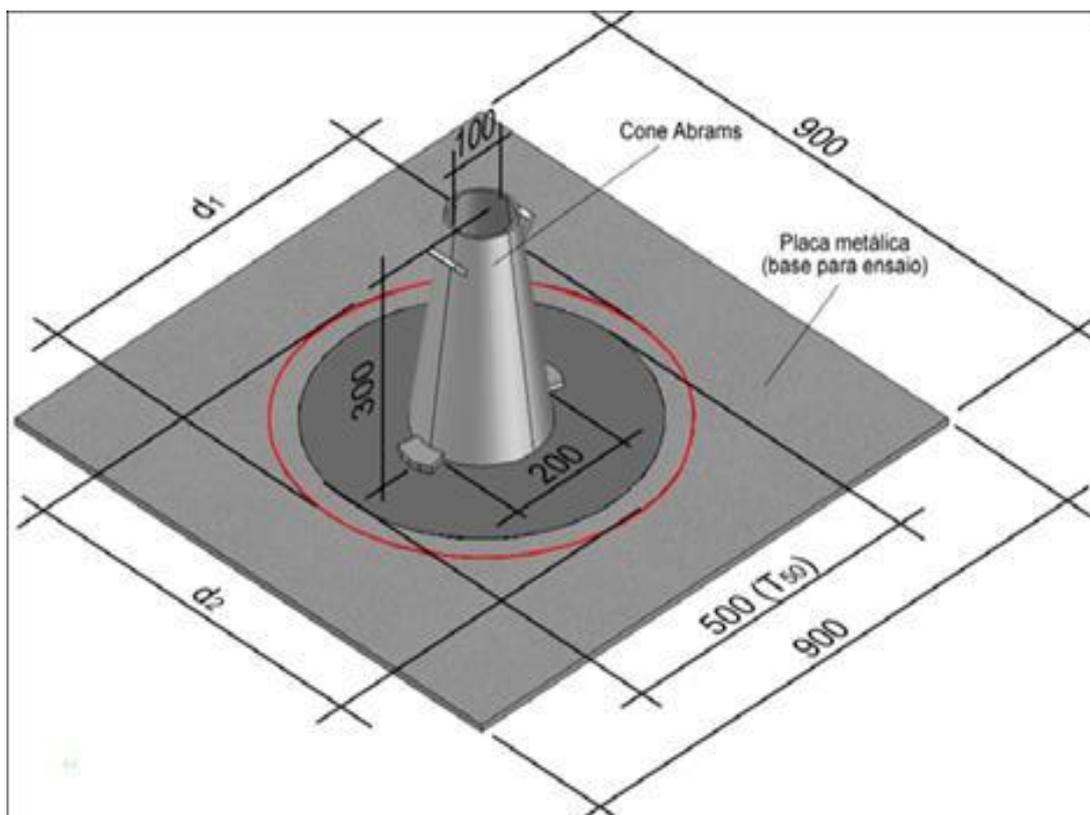


Figura 2 - Cone de Abrams (BARROS, 2009).

Os principais acessórios utilizados nesse ensaio são o cone de Abrams (Figura 2) e uma chapa de aço quadrada com um metro de lado e 2 mm de espessura. A chapa de aço deve possuir um círculo centralizado demarcado com 20 cm de diâmetro para centralização do cone, claramente visível para facilitar as medições.

A Tabela 1 apresenta os critérios de aceitação do CAA quanto ao espalhamento por meio do ensaio *slump flow*, segundo a NBR 15823.

Tabela 1. Aceitação do CAA quanto ao espalhamento: slump-flow (mm).

Propriedades Ensaio	Classes	Aplicação	Exemplo
Espalhamento: <i>slump flow</i> (mm)	SF 1: 550 a 650	Estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura e embutidos, cuja concretagem é realizada a partir do ponto mais alto com deslocamento livre.	Lajes.
		Concreto auto-adensável bombeado	Revestimento de túneis
		Estruturas que exigem um curto espalhamento horizontal do concreto autoadensável.	Paredes e certas fundações profundas.
	SF 2: 660 a 750	Adequada para a maioria das aplicações correntes.	Paredes, vigas, pilares e outras.
	SF 3: 760 a 850	Estruturas com alta densidade de armadura e/ou de forma arquitetônica complexa, com o uso de concreto com agregado graúdo de pequenas dimensões (menor que 12,5 mm).	Pilares-parede, paredes diafragma e pilares.

Fonte: ABNT, NBR-15823-1 / 2010.

### 2.5.2 Ensaio T500 (VS)

O T500 é o teste de velocidade que usa como parâmetro o ensaio do *slump flow test*, para tanto, são usadas as medidas de fluxo em termos do tempo necessário para o concreto auto-adensável alcançar 50 cm de diâmetro em fluxo livre após o início do ensaio (Frances Yang, 2004).

O valor da velocidade do espalhamento, que pode ser medido aproveitando o ensaio de slump-flow, avalia o grau de viscosidade plástica aparente da mistura de CAA fresco. A viscosidade do concreto é uma propriedade relacionada à sua consistência no estado fresco e influencia a resistência deste ao escoamento. Quanto maior a viscosidade do concreto, maior sua resistência ao escoamento. Na prática, o CAA com baixa viscosidade apresenta um rápido escoamento, já o CAA com alta viscosidade se movimenta de forma mais lenta (ALENCAR et al., 2010).

Os acessórios utilizados são os mesmos do ensaio de slump-flow (Figura 2). A chapa de aço deve possuir dois círculos centralizados demarcados, um de 20 cm de diâmetro para centralização do cone e outro de 50 cm de diâmetro para medição do tempo que o concreto leva para atingir esse diâmetro. Ambos os círculos devem estar claramente visíveis para facilitar as medições.

A Tabela 2 apresenta os critérios de aceitação do CAA, segundo a ABNT NBR 15823, quanto à viscosidade plástica aparente pelos ensaios t500 e do funil V (este último será abordado a seguir).

Tabela 2. Aceitação do CAA quanto à viscosidade plástica aparente:  $t_{500}$  (s) e funil V (s)

Propriedades Ensaio	Classes	Aplicação	Exemplo
Viscosidade plástica aparente: $t_{500}$ (s) e Funil V (s)	VS $1 \leq 2$ s	Adequado para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, mas exige controle de exsudação e da segregação.	Lajes, paredes diafragma, pilares-parede, indústria de pré-moldados e controle aparente
	VF $1 \leq 8$ s	Concretagens realizadas a partir do ponto mais alto com deslocamento livre.	
	VS $2 > 2$ s	Adequado para a maioria das aplicações correntes. Apresenta efeito tixotrópico que acarreta menor pressão sobre as fôrmas e melhor resistência à segregação.	Vigas, pilares e outras
	VF 2: 9 a 25 s	Efeitos negativos podem ser obtidos com relação à superfície de acabamento (ar aprisionado), no preenchimento de cantos e suscetibilidade a interrupções ou demora entre sucessivas camadas.	

Fonte: ABNT, NBR-15823-1 / 2010.

### 2.5.3 Ensaio do funil V (VF) - V- funnel test

O teste do funil V é feito para avaliar a fluidez e a resistência à segregação do concreto auto-adensável. Em forma de cone invertido o acessório com abertura quadrada 75 mm na parte inferior é utilizada para avaliar as propriedades da mistura, tais como viscosidade, volume indesejável de agregados graúdos e a estabilidade do concreto. O teste do funil V é um instrumento importante para avaliar a consistência da mistura e a uniformidade de suas propriedades de fluidez no estado fresco

durante a sua produção antes do lançamento em seu local de aplicação (Tande & Mohite, 2007). O ensaio do funil V foi também desenvolvido para avaliar o grau de viscosidade plástica aparente da mistura de CAA fresco. Consiste em medir o tempo para certo volume de concreto, aproximadamente 10 litros, fluir totalmente por um funil. Esse teste, além de fornecer boa indicação da viscosidade da mistura, pode também ser indicativo da segregação.

Um baixo tempo de esvaziamento do funil é favorável em relação à capacidade de fluxo, e um alto tempo significa alta viscosidade, com tendência a sofrer bloqueio e segregação (GOMES, 2002).

Esse teste é utilizado para avaliar a capacidade do concreto no estado fresco de preenchimento de fôrmas, quando a densidade de armadura for expressiva ou quando é requerido bom acabamento superficial. Ambas as propriedades são exigências típicas de peças em concreto pré-fabricado.

O funil V (Figura 3) possui orifício de descarga em seção retangular com dimensões de 7,5 cm por 7,5 cm e deverá ser equipado com uma tampa a prova de passagem de água. O funil V é composto de dois trechos de dimensões e formas diferentes.

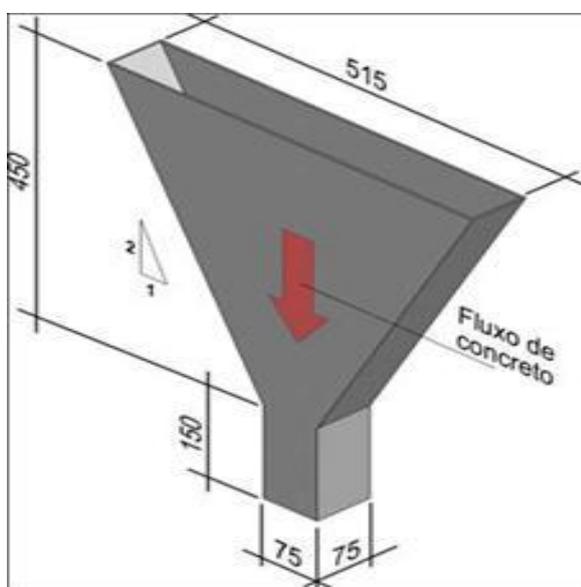


Figura 3 - Funil V (BARROS, 2009).

#### 2.5.4 Ensaio da caixa L (PL) – L - Box test

O ensaio da caixa em L é usado para a avaliação da habilidade passante do CAA no estado fresco que é sua capacidade de fluir sem perder sua uniformidade ou causar bloqueio, através de espaços confinados e aberturas estreitas, como áreas com alta densidade de armaduras e embutidos (ALENCAR et al., 2010).

O ensaio também pode ser utilizado para avaliar as propriedades de capacidade de preencher fôrmas e resistência à segregação do CAA. A caixa L (Figura 4) é confeccionada com uma parte vertical ligada com uma horizontal. Na base da parte vertical é feita uma abertura que é colocada uma porta e barras de aço, por onde o concreto deve passar. As barras de aço são de 10 mm e as aberturas entre as barras são 42 mm, podendo essas aberturas ser alteradas para diferentes valores.

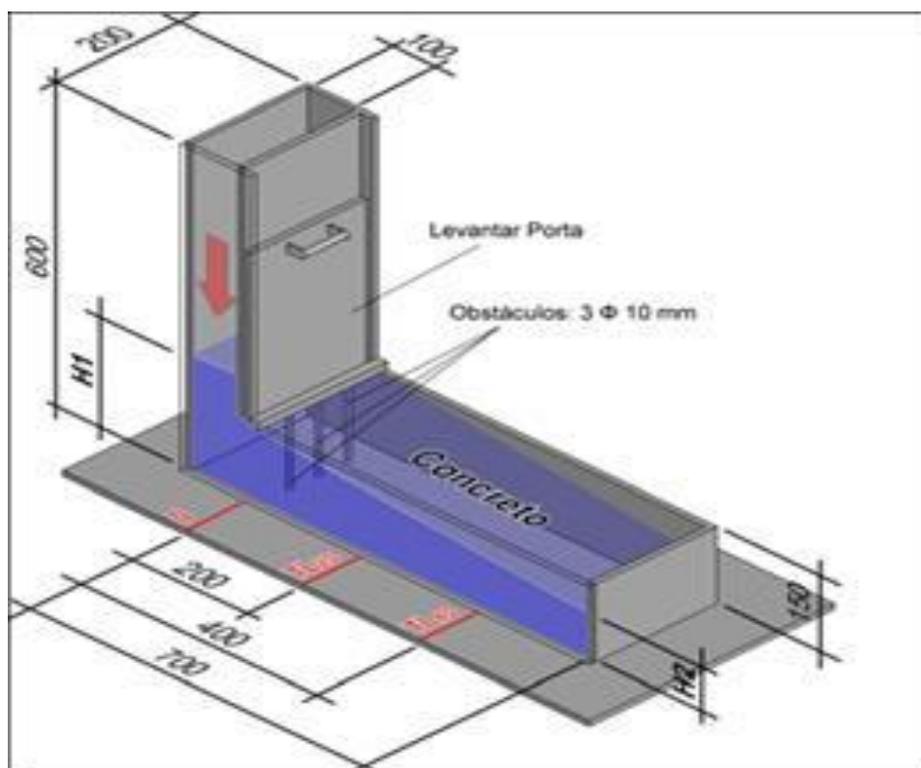


Figura 4 – Caixa L (BARROS, 2009).

O *L-Box test* avalia o fluxo de concreto em ambientes confinados e ajuda a verificar se o concreto não será impedido por quaisquer obstruções que podem bloquear o fluxo e de outra forma reduzir os fenômenos de segregação. São utilizados 12,7 litros de concreto vertido pela abertura na parte superior vertical da caixa L, que após preencher esta parte da caixa ficará em repouso sobre um período de 1 minuto. Após este período, abre-se a porta e o concreto flui ao longo da parte horizontal da caixa e através das barras de aço. No final do período de fluxo, a altura H1 e H2 são medidas e o resultado é expresso em termos da taxa de enchimento de H2/H1 (Bouhamou et al.,2011).

A parte vertical da caixa em L com dimensões de 0,60 m x 0,20 m x 0,10 m (altura x largura x profundidade) deverá ser preenchida com 12,7 litros de concreto. Os 12 litros do volume vertical da caixa com 0,7 litros extra atrás da porta de acesso somam um total de 12,7 litros. A parte horizontal da caixa L tem dimensões internas de 70 cm x 20 cm x 15 cm (comprimento x largura x profundidade).

Tanto o bloqueio como a estabilidade do concreto podem ser detectados visualmente. Se o concreto formar uma camada elevada atrás das armaduras significa que o mesmo sofreu bloqueio e segregação.

Usualmente, observa-se no bloqueio o agregado graúdo reunido entre as barras das armaduras. Se o agregado graúdo se apresentar bem distribuído ao longo da superfície do concreto até o final da parte horizontal da caixa significa que o mesmo pode ser considerado estável.

### **2.5.5 Ensaio do anel J (PJ) – J - Ring test**

A parte 3 da ABNT NBR 15823 aborda o ensaio do anel J (Figura 5), que também é empregado para a avaliação da habilidade passante do CAA no estado fresco. Consiste no mesmo ensaio do tronco cônico de Abrams, só que a base deve ser substituída pelo anel J, que possui 16 barras de aço igualmente distribuídas e soldadas de topo sobre uma chapa metálica. O tronco do tronco de cone deve ser posicionado no centro dessas barras e preenchido com concreto, utilizando o mesmo procedimento do ensaio de *slump-flow*. A medida da habilidade passante é

obtida pela diferença entre o espalhamento medido com o anel J e o espalhamento medido no ensaio de *slump-flow*.

A Tabela 3 apresenta os critérios de aceitação do CAA quanto à habilidade passante pelos ensaios do anel J e da caixa L, segundo a ABNT NBR 15823.

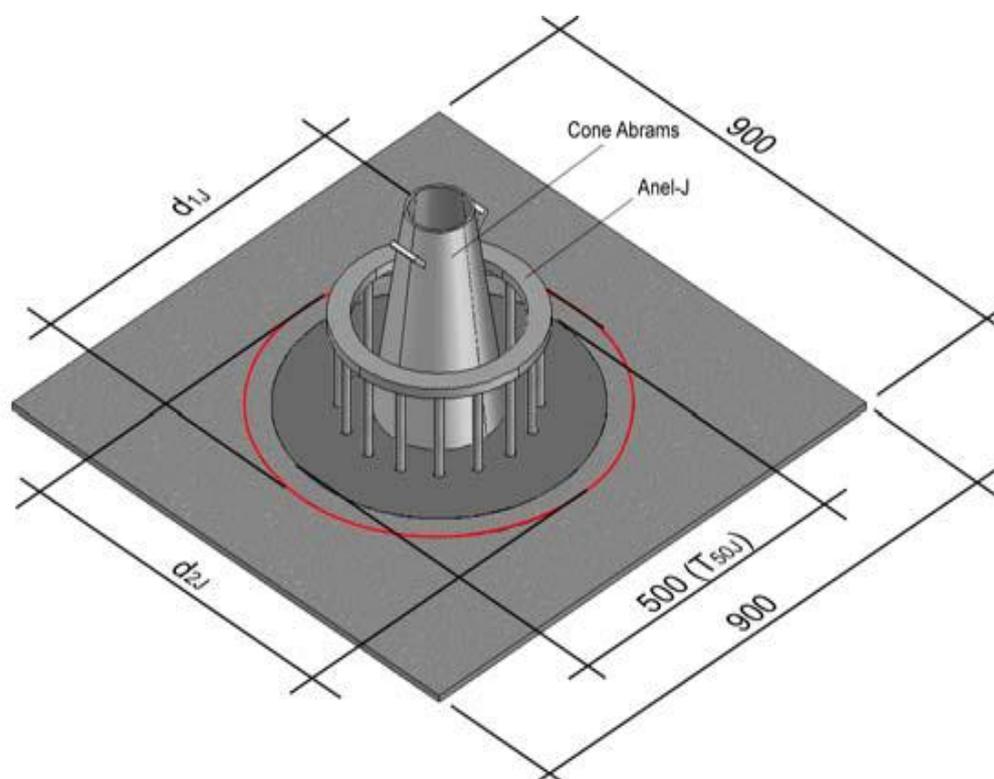


Figura 5 – Anel J (BARROS, 2009).

Tabela-3. Aceitação do CAA quanto à habilidade passante: anel J (mm) e caixa L (H2/H1).

Propriedades Ensaio	Classes	Aplicação	Exemplo
Habilidade Passante: Anel J (mm) E Caixa L (H2/H1)	PJ 1: 25 a 50 mm, com 16 barras de aço.	Adequada para elementos estruturais com espaçamento de armadura de 80 mm a 100 mm.	Lajes, painéis, elementos de fundação.
	PL 1 $\geq$ 0,80, com 2 barras de aço.		
	PJ 2: 0 a 25 mm com 16 barras de aço.	Adequada para a maioria das aplicações correntes. Elementos estruturais com espaçamento de armaduras de 60 mm a 80 mm.	Vigas, pilares, tirantes, indústria de pré-moldados.
	PL 2 $\geq$ 0,80, com 3 barras de aço.		

Fonte: ABNT, NBR-15823-1 / 2010.

### 2.5.6 Ensaio da coluna de segregação (SR)

O ensaio da coluna de segregação (Figura 6) é muito difundido pela sua facilidade de execução e avalia a resistência à segregação do CAA. Esse ensaio é previsto pela parte 6 da ABNT NBR 15823. A aparelhagem consta de um tubo de PVC seccionado em três partes de medidas padronizadas, que são devidamente fixadas e apoiadas sobre uma base rígida, onde o CAA é despejado. Após cerca de 20 minutos, é possível extrair as porções de concreto com auxílio de uma chapa metálica. As amostras são lavadas e peneiradas para remoção da argamassa e separação dos agregados graúdos, com determinação da massa daqueles que ficaram alojados no topo (mT) e na base (mB). Com isso, estabelece-se o índice de segregação em função da porcentagem de agregado graúdo em cada porção da amostra (ALENCAR et al., 2010).



Figura 6 – Ensaio da coluna de segregação (ALENCAR et al., 2010).

Como mencionado anteriormente, a resistência à segregação é a capacidade do concreto de permanecer com sua composição homogênea, durante as etapas de transporte, lançamento e acabamento.

A segregação pode ocorrer de duas maneiras:

a) estática: associada aos fenômenos de sedimentação, que ocorre quando o concreto está em repouso dentro das fôrmas; e

b) dinâmica: durante o lançamento, enquanto o CAA flui dentro da fôrma (ALENCAR et al., 2010).

O concreto sofre segregação dinâmica durante o lançamento e estática após sua conclusão.

A Tabela 4 apresenta os critérios de aceitação do CAA quanto à resistência à segregação pelo ensaio da coluna de segregação, segundo a ABNT NBR 15823.

Tabela 4. Aceitação do CAA quanto à resistência à segregação: coluna de segregação (%).

Propriedades Ensaio	Classes	Aplicação	Exemplo
Resistência à Segregação: Coluna de Segregação (%)	RS 1 $\leq$ 20	Distância a ser percorrida < 5 m. Espaçamento entre armaduras > 80 mm.	Lajes de pequena espessura, estruturas convencionais de pouca complexidade.
	RS 2 $\leq$ 15	Distância a ser percorrida > 5 m. Espaçamento entre armaduras > 80 mm.	Elementos de fundações profundas.
		Distância a ser percorrida < 5 m. Espaçamento entre armaduras < 80 mm.	Pilares, paredes, elementos estruturais complexos e elementos pré-moldados.

Fonte: ABNT, NBR-15823-1 / 2010.

Outros ensaios, além dos adotados pela ABNT NBR 15823, também estabelecem padrões para classificação, controle e aceitação do CAA no estado fresco, a seguir comentados.

### 2.5.7 Ensaio do tubo U

Para a avaliação dos CAA, quanto à propriedade de resistência à segregação, também pode ser utilizado o ensaio do tubo U.

O equipamento tubo U (Figura 7) consiste de três segmentos de tubo e dois joelhos de PVC de 150 mm, cortados em meia cana e mantidos juntos através de fixação longitudinal com fitas adesivas e com abraçadeiras transversais, de forma que, após o ensaio, as partes sejam separadas sem provocar destruição do concreto nele colocado.

A segregação é avaliada como o grau de não uniformidade na quantidade de agregado graúdo, nas diferentes partes do tubo. São utilizados, nesse ensaio, aproximadamente 32 litros de concreto.

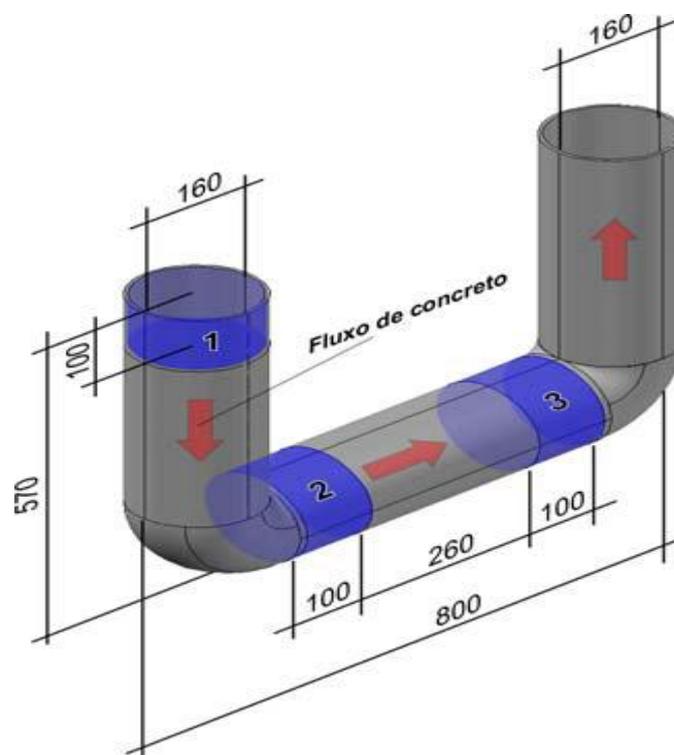
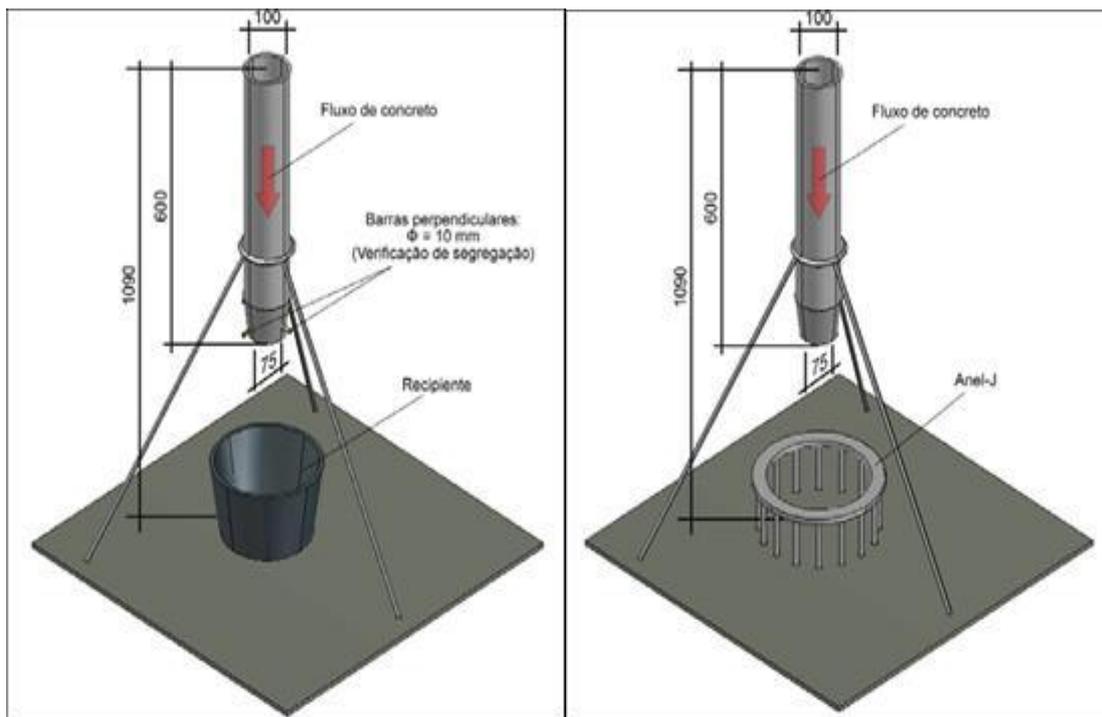


Figura 7 – Tubo U (BARROS, 2009).

### 2.5.8 Ensaio do Orimet

O ensaio Orimet foi desenvolvido por BARTOS em 1978 (BARTOS, 1992). Esse teste verifica a fluidez do material e pode verificar a sua habilidade de passar por obstáculos sem segregar, caso sejam colocadas duas barras perpendiculares de 10 mm, dispostas numa seção transversal do equipamento, próxima à passagem inferior (Figura 8).



Figuras 8 – Orimet sem e com anel J (BARROS, 2009)

Também é possível a realização do ensaio Orimet em conjunto com o anel J (Figura 8), desprezando-se a necessidade das barras perpendiculares na saída (BARROS, 2009).

### 2.5.9 Ensaio da Caixa U - U-Box test

Desenvolvido pela Technology Research Centre of the Taisei Corporation in Japan, o ensaio da caixa U consiste em preencher com CAA no estado fresco, estando a porta de passagem do compartimento da esquerda do aparato fechada. Então, a porta deslizante é aberta, fazendo com que o concreto escoe através das armaduras para o outro compartimento. Medem-se as alturas R1 e R2, respectivamente, a altura do material que ficou no compartimento da esquerda e a altura de material no compartimento da direita, como apresentado na Figura 9. A auto-adensabilidade do CAA é avaliada através da diferença entre as duas alturas, R1 e R2. A caixa U serve para medir a fluidez e a habilidade do CAA passar por obstáculos sem segregar (BARROS, 2009).

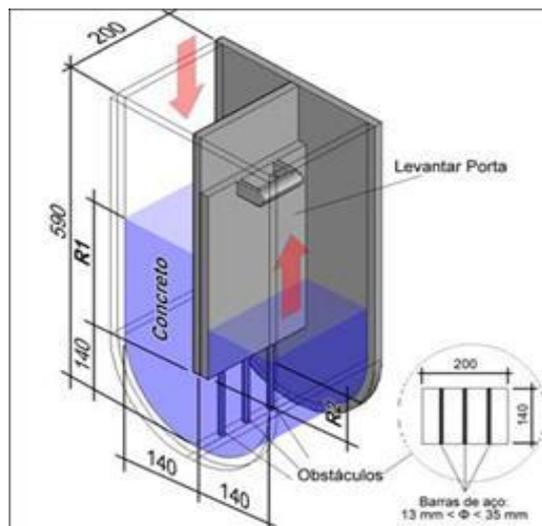


Figura 9 – Caixa U (BARROS, 2009).

Na Tabela 5 são apresentados os valores recomendados na literatura, englobando diversos estudos, que asseguram o atendimento das características de auto - adensabilidade do concreto, avaliadas através dos ensaios mais comumente utilizados (BARROS, 2009).

Tabela 5. Faixas dos parâmetros que asseguram o autoadensamento do concreto.

Propriedades	Ensaio	Parâmetros	Faixa ideal
Capacidade de preenchimento.	Teste de espalhamento	DF	60 a 75 cm
		T50	3 a 7 s
	Funil V	TV	6 a 13 s
	Orimet	TO	0 a 5 s
Capacidade de passage.	Caixa L	TL20	$\leq 2$ s
		TL40	$\leq 4$ s
		$RB = H2 / H1$	$\geq 0,80$
	Anel J	BSJ	0 a 10 mm
	Caixa U	R1 – R2	0 a 30 mm
Estabilidade à segregação.	Tubo U	$RS = M1/M2$	$\geq 0,90$
	Funil V após 5 minutos	TV, 5min	$> 3$ s

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Nesta etapa serão apresentados os materiais, os métodos de ensaio e os procedimentos utilizados no desenvolvimento da pesquisa.

Esta etapa experimental foi desenvolvida no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) da Faculdade de Tecnologia (FT) da Universidade Federal do Amazonas (UFAM).

#### 3.2 MATERIAIS

##### 3.2.1 Cimento

O cimento empregado neste trabalho é o Portland com adição de Pozolana, CP II-Z-32, de marca Nassau. Este é um cimento muito encontrado na região de Manaus. O CP II-Z-32 leva, em sua composição, de 6 a 14% de pozolana. Suas propriedades químicas e físicas são em geral àquelas apresentadas na Tabela 6, (<http://www.cimento.org>).

Tabela 6. Ensaios físicos e químicos do cimento CP-II-Z

Ensaio Físico		
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	≥2600	NBR NM 76
Tempo de início de pega (h:min)	≥1	NBR NM 65
Tempo de fim de pega (h:min)	≤10	NBR NM 65
Finura na peneira # 200 (%)	≤12,0	NBR 11579
Finura na peneira # 325 (%)	-	NBR 9202
Expansibilidade a quente (mm)	≤5,0	NBR 11582
Consistência normal (%)	-	NBR NM 43

Resistência à compressão 1 dia (MPa)	-	NBR 7215
Resistência à compressão 3 dias (MPa)	$\geq 10,0$	NBR 7215
Resistência à compressão 7 dias (MPa)	$\geq 20,0$	NBR 7215
Resistência à compressão 28 dias (MPa)	$\geq 32,0$	NBR 7215
<b>Ensaio químicos</b>		
Perda ao fogo (%)	$\leq 6,5$	NBR 5743
Resíduo insolúvel (%)	$\leq 16,0$	NBR 5744
Trióxido de enxofre - $\text{SO}_3$ (%)	$\leq 4,0$	NBR 5745
Óxido de cálcio livre - CaO Livre (%)	-	NBR 7227
Óxido de magnésio - MgO (%)	$\leq 6,5$	NBR 9203
Óxido de alumínio - $\text{Al}_2\text{O}_3$ (%)	-	NBR 9203
Óxido de silício - $\text{SiO}_2$ (%)	-	NBR 9203
Óxido de ferro - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	-	NBR 9203
Óxido de cálcio - CaO (%)	-	NBR 9203
Equivalente alcalino (%)	-	-

Fonte: [http://www.cimento.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=98&Itemid=151](http://www.cimento.org/index.php?option=com_content&view=article&id=98&Itemid=151).

### 3.2.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi uma areia natural proveniente de uma jazida localizada no KM da BR-174, rodovia que interliga o município de Manaus a Presidente Figueiredo, sendo atualmente este o local onde existe a maior extração de agregado miúdo para o mercado da construção civil em Manaus.

### 3.2.3 Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado foi o seixo (cascalho de rio) extraído do Rio Negro na região metropolitana de Manaus através de balsas com dragas acopladas. A utilização deste material é muito comum na região devido a falta de jazidas de

material pétreo para produção de brita nas proximidades da cidade de Manaus, encarecendo muito o valor deste material para a construção civil local.

#### **3.2.4 Aditivo Superplastificante**

O aditivo superplastificante (catálogo comercial Sika) usado nesta pesquisa foi o Sika ViscoCrete® 3535 CB, que é um aditivo líquido de pega normal de terceira geração a base de policarboxilatos com alta taxa de redução de água e excelente fluidez para indústria de pré-moldados, concretos de alta resistência inicial, concreto de alto desempenho (CAD) e concreto auto-adensável (CAA), atendendo aos requisitos da norma EB 1763 (Tipo SP).

#### **3.2.5 Água**

A água potável utilizada na produção do concreto auto-adensável com adição de sílica e resíduo de vidro é proveniente da Universidade Federal do Amazonas (UFAM) a mesma é abastecida por poços artesianos.

#### **3.2.6 Resíduo de vidro**

A escolha do vidro para a pesquisa foi influenciada pela quantidade de vidro utilizado na indústria de televisores, que são os vidros tipo cinescópios. A coleta dos resíduos foi realizada na indústria de eletroeletrônicos LG Display da Amazônia, uma das empresas que mais comercializa este tipo de vidro no Estado do Amazonas. Esta empresa gera resíduos de vidro devido às falhas durante o processo de fabricação dos televisores.

### **3.3 MÉTODOS DE ENSAIO PARA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.**

Nesse item estão compilados os processos experimentais dos ensaios de índices físicos dos agregados e dos ensaios de caracterização do cimento, utilizados na composição do concreto convencional que é a primeira etapa para o desenvolvimento do concreto auto-adensável. Esses ensaios dividem-se em grupos

distintos: ensaios de agregados, resíduo de vidro e ensaios de cimento, conforme o que segue:

Ensaio de agregados:

- Determinação da massa unitária do agregado miúdo em estado solto NBR 7251;
- Determinação da massa unitária do agregado graúdo NBR 7251;
- Determinação da composição granulométrica do agregado miúdo NBR 7217;
- Determinação da composição granulométrica do agregado graúdo NBR 7217;
- Determinação do teor de argila em torrões no agregado miúdo NBR 7218;
- Avaliação das impurezas orgânicas das areias NBR 7220;
- Determinação do teor de material pulverulento NBR 7219;
- Determinação da massa específica real do agregado miúdo e graúdo NBR 9776;

Ensaio de cimento:

- Determinação da granulometria do cimento NBR 7215;
- Resistência a compressão axial NBR 5739;

Ensaio do resíduo de vidro

- Picnometria a gás Helio;
- Granulometria a laser;
- Eflorescência de raio-x;
- Perda ao fogo;
- Difração de raio-x.

Além do supracitado, este trabalho descreve o processo experimental de dosagem de concreto, resultado dos conhecimentos preliminares de caracterização dos índices físicos.

A importância desses tópicos na atividade prática decorre da necessidade de se conhecer as especificidades dos materiais constituintes do concreto, a fim de se compor, ao final do processo, uma eficiente e necessária dosagem e assim garantir seu padrão técnico qualitativo.

Portanto, os processos experimentais apresentados objetivam demonstrar os resultados obtidos nos diversos ensaios e assim possibilitar suas análises.

### **3.3.1 Determinação da massa unitária dos agregados no estado solto**

Este ensaio tem o objetivo de determinar a massa unitária do agregados miúdo e graúdo no estado solto, fundamentado na NBR 7251.

Os acessórios utilizados foram balança, recipiente metálico em forma de paralelepípedo com dimensões conforme prescrito na NBR 7251, régua rasadora e pá metálica.

O material ensaiado foi retirado de uma amostra previamente coletada e devidamente acondicionada, de modo a garantir a manutenção das suas características.

Reunidos todos os materiais, procede-se a execução do ensaio, tomando-se, com o auxílio da pá metálica, amostras da areia e fazendo-se o seu lançamento no recipiente a uma altura em torno de 12 cm da borda superior deste. O lançamento foi realizado de forma a espalhar de maneira uniforme o material dentro do recipiente.

O processo repetiu-se até que todo o recipiente fosse preenchido. Com o auxílio de uma régua, procedeu-se o rasamento da superfície de forma a deixá-la nivelada em relação às bordas do recipiente. Finalmente, pesou-se o recipiente com o agregado miúdo contido (Figura 10). Todo esse processo foi repetido para condição da areia, no total de três amostras.



Figura 10- Determinação da massa unitária da areia pela NBR 7251/1982.

A massa unitária da areia no estado solto foi determinada conforme a fórmula:

$$\rho_s = \frac{(P_M - P_o)}{V} \quad (1)$$

Onde:

$\rho_s$  = Densidade da areia em kg/ dm<sup>3</sup>;

$P_m$  = Peso do (recipiente + media das pesagens do material) em kg;

$P_o$  = Peso do recipiente em kg;

$V$  = Volume do recipiente em dm<sup>3</sup>.

O mesmo procedimento foi realizado para o agregado graúdo, tanto o seixo (Figura 11) quanto o resíduo de vidro moído.



Figura 11 - Determinação da massa unitária do seixo pela NBR 7251/1982.

### 3.3.2 Determinação da composição granulométrica do agregado miúdo

Este ensaio tem por objetivo, determinar a composição granulométrica do agregado miúdo, bem como conhecer o módulo de finura e a dimensão máxima característica do agregado, fundamentado na NBR 7217.

Os acessórios utilizados foram: peneira da malha 4,8 mm até a malha 0,15 mm e fundo, balança e escova de aço (Figura 12).



Figura 12 - Ensaio de granulometria pela NBR 7217/1987.

A amostra de areia ensaiada foi coletada na quantidade de 1 kg (Figura 12), conforme prescreve a NBR 7217. Reunidos todos os materiais, procedeu-se à

execução do ensaio, montando-se a bateria de peneiras, conforme a seguinte sequência:

Peneiras (mm): 4,8; 2,4; 1,2; 0,6; 0,3; 0,15; fundo.

A amostra, previamente seca ao ar, foi então peneirada através da bateria de peneiras, de maneira enérgica e contínua, permitindo a separação dos diferentes tamanhos dos grãos do agregado. Em cada peneira o material retido foi, então, separado e pesado, anotando-se o valor na planilha de composição granulométrica. Os grãos de agregado miúdo que ficaram presos nas malhas das peneiras foram retirados através da passagem da escova de aço, de modo que nenhuma partícula fosse perdida.

Ao final do processo, com todos os valores dos pesos retidos em cada peneira, procedeu-se o cálculo da planilha de composição granulométrica, definindo-se os percentuais de material retido e retido acumulado.

O percentual retido acumulado em relação a cada peneira da série utilizada forneceu os dados para a definição da curva granulométrica do agregado miúdo em estudo. Também foram definidos o módulo de finura e o diâmetro máximo do agregado.

O módulo de finura foi obtido somando-se as percentagens retidas acumuladas e dividindo o somatório por 100. O diâmetro máximo do agregado miúdo foi definido como a malha da peneira na qual ficou retido o percentual acumulado igual o imediatamente inferior a 5%.

### **3.3.3 Determinação da composição granulométrica do agregado graúdo**

Este ensaio tem por objetivo, determinar a composição granulométrica do agregado graúdo, bem como conhecer o módulo de finura e a dimensão máxima característica do agregado graúdo, fundamentado na NBR 7217.

Os materiais utilizados foram: balança, peneiras da manha 25 até a malha 0,15 e fundo (Figura 13), balança e escova de aço.



Figura 13 - Ensaio de granulometria pela NBR 7217/1987.

A amostra ensaiada consistiu de seixo na quantidade de 5 kg, Figura 13, conforme prescreve a NBR 7217.

Reunidos todos os materiais, procedeu-se à execução do ensaio, montando-se a bateria de peneiras, conforme a seguir:

Peneiras (mm): 25; 19; 9,5; 4,8; 2,4; 1,2; 0,6; 0,3; 0,15 e fundo.

A amostra foi peneirada através da bateria de peneiras, de maneira enérgica e contínua, permitindo a separação dos diferentes tamanhos de grãos do agregado.

Em cada peneira o material retido foi separado e pesado, anotando-se o valor na planilha de composição granulométrica. Os grãos de agregado graúdo que porventura ficaram presos nas malhas das peneiras foram retirados com a passagem das cerdas de aço da escova. Ao final do processo, com todos os valores dos pesos retidos em cada peneira, procedeu-se o cálculo da planilha de composição granulométrica, definindo-se os percentuais de material retido e retido acumulado.

O percentual retido acumulado em relação a cada peneira da série utilizada forneceu os dados para a definição da curva granulométrica do agregado graúdo em estudo. Também foi definido o módulo de finura e o diâmetro máximo do agregado.

O diâmetro máximo do agregado miúdo foi definido como a malha da peneira na qual ficou retido o percentual acumulado igual o imediatamente inferior a 5%.

Os mesmos procedimentos foram empregados para o resíduo de vidro moído.

### **3.3.4 Determinação do teor de argila em torrões nos agregados**

Este ensaio tem por objetivo determinar o teor de argila em torrões presente nos agregados miúdo e graúdo, fundamentado na NBR 7218.

Os materiais utilizados foram balança, peneiras de malhas 4,8 mm, 1,2 mm e 0,6 mm e vasilhas metálicas.

O material a ensaiar consistiu de areia coletada e preparada de acordo com NBR 7216. Dessa amostra original é retirada uma amostra para ensaio do teor de argila em torrões.

Reunidos todos os materiais, montou-se à peneira de 4,8 mm sobre a de 1,2 mm e foi realizado o peneiramento do material. Do material retido na peneira 1,2 mm pesou-se 200g deste e em seguida espalhou-se o material sobre uma superfície fina e plana onde foram destorroado todos os torrões existentes no material

Realizado o processo de destorroamento, peneirou-se novamente o material na peneira de 0,6mm, onde o material retido foi pesado. O peso dos torrões de argila foi obtido pela diferença entre as duas pesagens e expresso em porcentagem, do peso inicial da amostra ensaiada.

O percentual de material retido não deverá ser superior a 1,5%, caso contrário deve-se observar o tipo de areia.

O teor da argila em torrões foi determinado pela expressão:

$$TA = \frac{(PI - PF)}{PI} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

*TA* = Teor de argila em torrões em %;

*PI* = peso inicial da amostra em kg;

*PF* = peso final da amostra em kg.

### **3.3.5 Avaliação das impurezas orgânicas das areias destinadas ao preparo do concreto**

Este ensaio tem por objetivo determinar o grau de matéria orgânica presente na areia utilizada no preparo do concreto, fundamentado na NBR 7220.

Os materiais utilizados foram: frasco de Erlenmeyer, copos de Becker, pipetas e balança.

**SOLUÇÕES UTILIZADAS.** Para a execução do ensaio devem ser preparadas com antecedência as seguintes soluções:

1. Solução de ácido tânico a 2%, onde são misturados 2g de ácido tânico, 10ml de álcool a 95% e 90ml de água destilada;
2. Solução de hidróxido de sódio a 3%, onde são misturados 30g de hidróxido de sódio e 970g de água destilada.

### **PROCEDIMENTOS**

O material ensaiado foi retirado de uma amostra previamente coletada de areia e devidamente acondicionada segundo a NBR 7216, de modo a garantir a manutenção de suas características.

Reunidos todos os materiais, pesou-se 200 g de areia seca a ser ensaiada, em seguida procedeu-se à colocação desta areia pesada em um frasco de Erlenmeyer, adicionando, com uma pipeta, 100 ml de solução de hidróxido de sódio. Agitando-se vigorosamente a mistura e esta foi deixada em repouso por 24h.

Para uma comparação, utilizando um frasco de Erlenmeyer, foi preparada simultaneamente a solução padrão, misturando-se 3 ml de solução de ácido tânico e 97ml de solução de hidróxido de sódio, seguida de uma vigorosa deixando-a em repouso por 24h.

Transcorrido o tempo de 24h procedeu-se então à comparação visual das intensidades de cor da solução em suspensão no frasco da areia e da solução de ácido tânico e hidróxido de sódio.

### **3.3.6 Determinação do teor de materiais pulverulentos no agregado miúdo**

Este ensaio tem por objetivo determinar o teor de materiais pulverulentos da areia destinada ao preparo do concreto, fundamentado na NBR 7219.

Os materiais utilizados foram: fogareiro, balança, peneiras de 4,8mm e 0,075mm de abertura da malha e vasilhas com tamanho para sustentar todo o agregado e robustas para permitir a agitação vigorosa do material com a água que o recobre.

O material ensaiado foi retirado de uma amostra de areia previamente coletada e devidamente acondicionada segundo a NBR 7216, de modo a garantir a manutenção das suas características.

Tendo em vista que a areia a ser ensaiada tem o diâmetro máximo inferior 4,8mm, coletou-se 1 kg desta amostra para o ensaio segundo a NBR 7219 (a amostra coletada neste ensaio também já estava seca como exige esta norma).

Após, a pesagem a amostra foi colocada na vasilha e recoberta com água em excesso. A amostra na vasilha foi então agitada vigorosamente com as mãos de forma a provocar a separação e suspensão das partículas finas (com o devido cuidado reservado a perda de material), parte da água foi então cuidadosamente vertida para outro recipiente (água descartável do restante do ensaio) através da peneira de malha 0,075mm (o material retido na peneira foi posteriormente recolocado na vasilha), vide figura 14.



Figura 14 - Determinação do teor de material pulverulento pela NBR 7219-1987.

Este processo de lavagem do agregado com água em excesso e passagem desta água pela peneira de malha 0,075mm foi repetido por mais três vezes até que a água não apresentasse mais nenhum material em suspensão (límpida).

O material retido na peneira de malha 0,075mm foi recolocado em uma vasilha, onde agregado lavado foi então levado ao fogareiro para a secagem, sendo mexido até que sua coloração denotasse a total ausência de água. Com a amostra seca foi feita sua pesagem.

O teor material pulverulento foi determinado pela fórmula:

$$MP = \frac{(MI - MS)}{1000} \times 100$$

(3)

Onde:

$MP$  = Material Pulverulento em %;

$MS$  = Massa do material seco depois da lavagem;

$MI$  = Massa inicial do material.

### 3.3.7 Determinação da massa específica do agregado miúdo por meio do frasco de Chapman

Este ensaio tem por objetivo determinar a massa específica real do agregado miúdo pelo método do frasco de Chapman, fundamentado na NBR 9776/87.

Os materiais utilizados foram: balança, frasco de Chapman graduado segundo a NBR 9776/87, funil e espátula.



Figura 15. Determinação da massa específica real da areia pela NBR 9776-1987.

O material coletado foi retirado de uma amostra de areia previamente coletada e devidamente acondicionada segundo a NBR 7216, de modo a garantir a manutenção de todas as suas características.

Pesou-se 500g da areia a ser ensaiada (esta areia já devidamente seca).

Colocou-se água no frasco de Chapman até a marca de 200 ml (ou 200 cm<sup>3</sup>), limpando com um papel filtro o bocal para não haver aderência de material no próprio bocal. Em seguida, com o auxílio do funil vértice cuidadosamente a areia seca pesada foi introduzida no frasco de Chapman, paulatinamente, intercalando movimentos giratórios, buscando-se a total retirada de ar que poderia existir devido ao lançamento do material no frasco (procedimento de vital importância no ensaio).

Findada esta operação procedeu-se a leitura final do frasco graduado de Chapman, ou seja, quanto a massa do agregado deslocou de volume de água (Figura 15).

A massa específica real do agregado miúdo será dada pela fórmula:

$$\gamma = \frac{500}{L - 100} \quad (4)$$

Onde:

$\gamma$  = massa específica real do agregado miúdo em g/cm<sup>3</sup>;

$L$  = leitura do frasco após a colocação do agregado miúdo em ml.

### **3.3.8 Determinação da massa específica do agregado graúdo por meio do frasco de Chapman**

Este ensaio tem por objetivo determinar a massa específica real do agregado graúdo (material reciclado) pelo método da proveta.

Os materiais utilizados foram: balança, proveta e Funil.



Figura 16 - Determinação da massa específica real do seixo pela NBR 9937-1987

O material coletado foi retirado de uma amostra de agregado graúdo (seixo e posteriormente resíduo de vidro moído) previamente coletada e devidamente acondicionada segundo a NBR 7216, de modo a garantir a manutenção de todas as suas características.

Coloca-se na proveta 500 ml de água, logo após, utilizando o funil, despejou-se cuidadosamente 500 g de agregado graúdo (seixo/resíduo de vidro moído), intercalando-se com intensos movimentos giratórios para que fosse retirado totalmente o ar que poderia existir devido ao lançamento do material na proveta.

Findada esta operação procedeu-se com a leitura na escala graduada da proveta, ou seja, quanto foi o volume de água deslocada (Figura 16).

A massa específica real do agregado graúdo foi obtida a partir da expressão (4), anteriormente definida.

### **3.3.9 Determinação da finura do cimento**

Este ensaio tem por objetivo determinar a finura do cimento, fundamentado na NBR 11579.

Os materiais utilizados foram: balança, peneira de malha 0,075 mm, pincel de cerdas macias.

Reunidos todos os materiais, inicialmente, pesou-se 50 g do cimento a ser analisado. Esse material foi colocado na peneira de malha 0,075 mm com seu respectivo fundo.

Iniciou-se o processo de peneiramento contínuo do cimento, permitindo que todo o material se espalhasse por igual na tela da peneira para facilitar o peneiramento. Esse processo foi realizado através de movimentos na direção horizontal, sendo a peneira constantemente girada de forma que todo o material fosse peneirado por igual.

Após isso, colocou-se a tampa no conjunto e imprimiu-lhe um peneiramento contínuo, estando a peneira ligeiramente inclinada, dando-se cerca de 25 golpes com a palma da mão na peneira e girando-a ao fim disso, até um total de 150 golpes.

Realizado esse processo, retirou-se o material retido na peneira, limpando-a com o pincel de forma não perder material pesando-se o cimento em seguida.

Todos os procedimentos descritos acima foram repetidos até que o peso do cimento que passou na peneira registrou um valor inferior a 0,05 g.

O índice de finura do cimento foi então obtido por meio da expressão:

$$F = \frac{R \times 100}{P} \quad (5)$$

Onde:

$F$  = Índice de finura do cimento em %;

$R$  = Massa retida na peneira em g;

$P$  = Massa inicial do cimento em g.

### 3.4 DOSAGEM EXPERIMENTAL DO CONCRETO CONVENCIONAL.

Foram avaliados dois métodos de dosagem para obtenção do traço de concreto convencional, o primeiro o método Ary Torres e o segundo o Método da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). O método escolhido foi o da ABCP porque estabelecia uma quantidade de cimento menor do que a estabelecida pelo outro método. Deste modo, será descrito na seqüência somente o método escolhido.

#### 3.4.1 Método de dosagem da Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP

Para a dosagem experimental do concreto convencional decidiu-se escolher um concreto com fck igual a 25 MPa por ser um concreto muito usual na região metropolitana de Manaus.

Além disso, para o concreto foi definida a relação água/cimento de 0,48 e o abatimento de  $40 \pm 10$  mm.

Fixados essas três características do concreto, o próximo passo foi determinar o traço.

Foram utilizados os seguintes dados para o dimensionamento do traço:

Características dos Materiais

a) Cimento:

- Tipo.
- Resistência do cimento aos 28 dias.

b) Agregados:

- Análise granulométrica
  - Módulo de finura do agregado miúdo.
  - Dimensão máxima do agregado graúdo.

- Massa específica real.
- Massa unitária compactada.

Após a identificação de todas as informações dos agregados e do cimento foi determinado a resistência aos 28 dias com o desvio padrão pré-determinado utilizando a expressão:

$$F_{cj\ 28} = F_{ck} + 1,65 \times S_d \quad (6)$$

Onde:

$S_d$  = desvio padrão;

$F_{cj\ 28}$  = Resistência à compressão aos 28 dias em MPa;

$F_{ck}$  = Resistência à compressão estabelecida em MPa.

Considerando-se um controle mais rigoroso, em geral, executado em laboratórios utilizou-se o  $S_d$  na condição A, foi possível determinar o valor para  $F_{cj28}$ .

$$F_{cj28} = 25 + (1,65 \times 4,0) = 31,6 \text{ MPa.} \quad (7)$$

Determinado o  $F_{cj\ 28}$  (resistência à compressão aos 28 dias) a próxima etapa foi encontrar a relação a/c (água-cimento) através do gráfico da Figura 17.

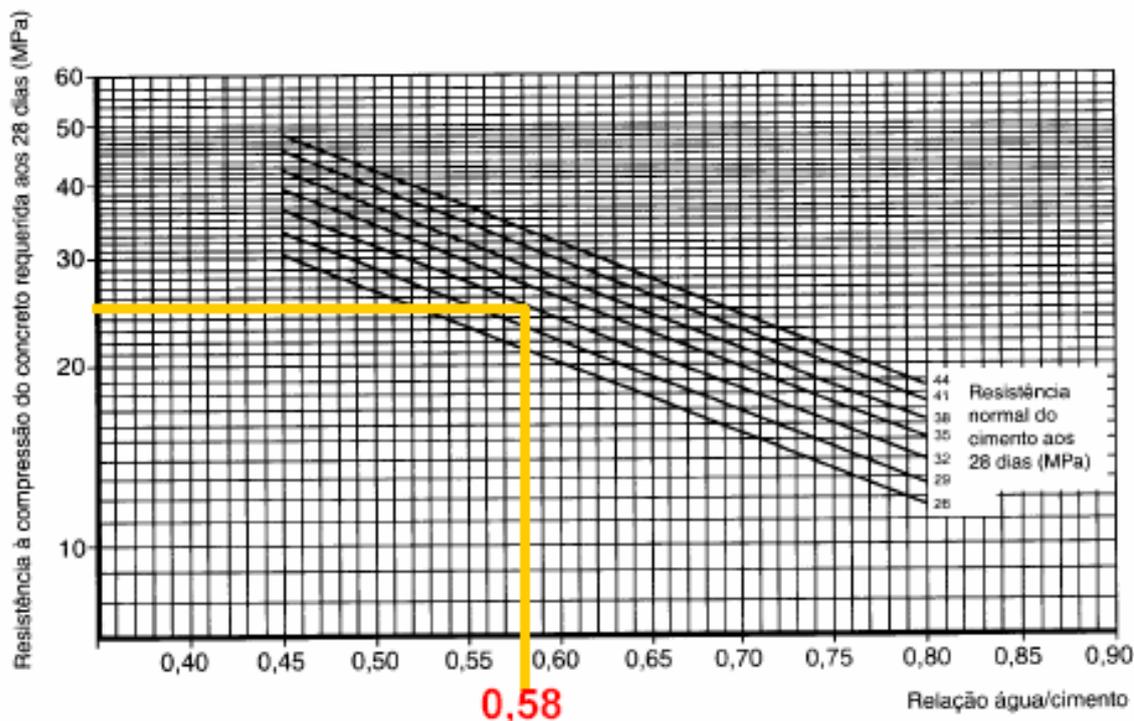


Figura 17 - Exemplo de utilização das Curvas de Abrams.

Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland

[www.abcp.org.br/comunidades/recife/download/.../Dosagem.pdf](http://www.abcp.org.br/comunidades/recife/download/.../Dosagem.pdf).

Após encontrar o fator  $a/c$ , determinou-se o consumo de água do concreto por meio da Tabela 7. Para tanto, foram necessários os valores do diâmetro máximo do agregado graúdo e o abatimento do tronco de cone.

Tabela 7. Consumo de água para abatimento do concreto (L/m<sup>3</sup>).

Consumo de água aproximado (L/m <sup>3</sup> )					
Abatimento (mm)	D <sub>máx</sub> agregado graúdo (mm)				
	9,5	19	25	32	38
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland

[www.abcp.org.br/comunidades/recife/download/.../Dosagem.pdf](http://www.abcp.org.br/comunidades/recife/download/.../Dosagem.pdf).

Assim, tem-se:

Consumo de água ( $C_a$ ) = 0,200m<sup>3</sup> (200kg/m<sup>3</sup>)

Com as informações de consumo de água por metro cúbico de concreto e a relação água-cimento, o próximo valor obtido foi o  $C_c$  (consumo de cimento) em quilograma por metro cúbico de concreto, que foi calculado por meio da expressão :

$$C_c = \frac{C_a}{a/c} \quad (8)$$

Onde:

$a/c$  = relação água/cimento;

$C_a$  = consumo de água;

$C_c$  = Consumo de cimento.

Para os valores anteriormente definidos e a equação (8) o consumo de cimento ( $C_c$ ) estabelecido pelo método da ABCP foi de 417 kg/m<sup>3</sup>.

Na seqüência, determinou-se o volume de agregado graúdo por meio da Tabela 8, onde foram necessários o MF modulo de finura da areia e a dimensão máxima do agregado graúdo.

Tabela 8. Consumo de agregado graúdo.

MF	Dimensão máxima (mm)				
	9,5	19	25	32	38
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,845
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765

2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland  
[www.abcp.org.br/comunidades/recife/download/.../Dosagem.pdf](http://www.abcp.org.br/comunidades/recife/download/.../Dosagem.pdf).

Após ter sido determinado o valor do volume do agregado graúdo, este foi transformado de volume para peso empregando a expressão:

$$Cb = Vb \times Mu \quad (9)$$

Onde:

$Vb$  = Volume do agregado graúdo seco por metro cúbico de concreto.

$Mu$  = Massa unitária compactada do agregado graúdo.

$Cb$  = Consumo de agregado graúdo.

Com a equação (9) e a Tabela 8, o consumo de agregado graúdo determinado foi de 0,750 m<sup>3</sup>, ou ainda, de 1267,5 kg/m<sup>3</sup>.

Por ultimo foi calculado o volume do agregado miúdo por metro cúbico de concreto, empregando-se a expressão:

$$V_{\text{areia}} = 1 - \frac{\text{cim}}{\gamma_{\text{cim}}} - \frac{\text{brita}}{\gamma_{\text{brita}}} - \frac{\text{água}}{\gamma_{\text{água}}} \quad (10)$$

Onde:

cim = consumo de cimento em quilograma por m<sup>3</sup>;

brita = consumo de agregado graúdo em quilograma por m<sup>3</sup>;

água = consumo de água em quilograma por m<sup>3</sup>;

$\gamma_{\text{cim}}$  = massa específica do cimento;

$\gamma_{\text{brita}}$  = massa específica do agregado graúdo;

$\gamma_{\text{água}}$  = massa específica da água.

Assim, por meio da equação (10), o valor calculado para o consumo de agregado graúdo foi de 0,184 m<sup>3</sup>, ou ainda, de 482 kg/m<sup>3</sup>.

Depois de determinado o volume do agregado miúdo, transformou-se o volume do mesmo em peso, para tanto, foi utilizada a equação (11).

$$Cm = \gamma m \times Vm \quad (11)$$

Onde:

$\gamma m$  = massa específica do agregado miúdo;

$Vm$  = volume do agregado miúdo.

Para finalizar, o consumo de agregado miúdo no traço foi definido utilizando a seguinte expressão:

$$Vm = 1 - \frac{Cc}{\gamma_c} - \frac{Cb}{\gamma_b} - \frac{Ca}{\gamma_a} \quad (12)$$

Onde:

$Cc$  = consumo de cimento;

$Ca$  = consumo de água;

$Cb$  = consumo de agregado graúdo;

$Vm$  = consumo do volume de agregado miúdo;

$\gamma_c$  = massa específica do cimento;

$\gamma_b$  = massa específica do agregado graúdo;

$\gamma_a$  = massa específica da água.

Deste modo o traço obtido pelo Método da ABCP para o concreto convencional foi 1 : 1,16 : 3,04 : 0,48 (cimento, agregado miúdo, agregado graúdo, água).

### 3.4.2 Execução de dosagem experimental de concreto convencional

Nesta etapa da pesquisa foi realizada uma dosagem experimental de concreto, com a finalidade de verificar as resistências nas idades normatizadas de 3, 7 e 28 dias, obtidas em corpos de provas, moldados a partir do concreto obtido, conforme o traço definido no método de dosagem empregado.

Os materiais utilizados foram: balança, recipientes metálicos para agregados, proveta graduada com capacidade para 1 litro, pá metálica, betoneira elétrica, moldes cilíndricos para corpos de prova e tronco de cone metálico para verificação do *slump*.

Reunidos todos os materiais, procedeu-se a realização da dosagem experimental que foi previamente calculada, levando-se em consideração as definições teóricas do método utilizado (Método da ABCP).

Inicialmente os agregados foram submetidas à secagem ao ar livre, a fim de se eliminar a umidade higroscópica.

Misturou-se o material em uma betoneira de 120 litros de eixo inclinado na seguinte ordem:

- a) 100% da brita mais 50% da água;
- b) 100% da areia;;
- c) Mistura por dois minuto;
- d) 100% do cimento;
- e) 50% da água;
- f) Mistura por mais cinco minutos.

Conforme as quantidades calculadas, pesou-se a areia e o seixo (Figuras 18 e 19), colocando-os na betoneira com o auxílio dos recipientes (Figura 20). O cimento foi, então, adicionado aos agregados que já estavam na betoneira e procedeu-se uma rápida homogeneização da mistura, conforme observado na Figura 21.

A água calculada para a dosagem foi medida na proveta, sendo lançada aos poucos na mistura, de forma a ir molhando toda a superfície dos agregados e do cimento. A betoneira continuou o processo de homogeneização do concreto até o ponto em que foi possível observar a completa mistura dos elementos (Figura 22).



Figura 18 - Pesagem dos materiais para a dosagem do concreto convencional.

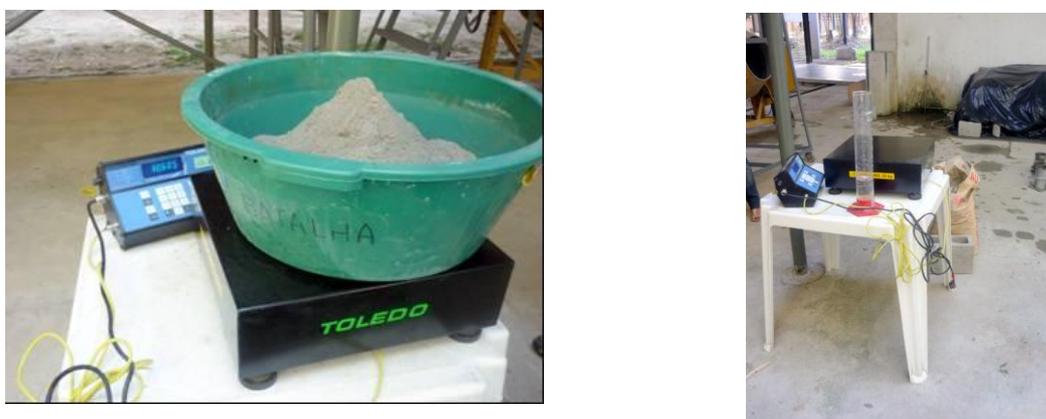


Figura 19 - Pesagem dos materiais para a dosagem do concreto convencional.



Figura 20 - Colocação dos materiais na betoneira.



Figura 21 - Betoneira de eixo inclinado com capacidade de 120 litros.



Figura 22 - Concreto convencional após 5 minutos de mistura.

Retirou-se o concreto da betoneira, colocando-o em um recipiente para verificar se o *slump* havia atingido o valor especificado no cálculo. Com o molde apropriado, em forma de tronco de cone, procedeu-se à verificação, através da moldagem do concreto em 3 camadas, aplicando-se 25 golpes com um soquete conforme a NBR 67/1998 (abatimento pelo tronco de cone) o *slump* do concreto (Figura 23).

Logo após a verificação do *Slump*, colocou-se o material de volta na betoneira para a correção do teor de argamassa acrescentando mais areia e cimento até atingir a consistência ideal.



Figura 23 - *Slump Test* ( Laboratório da UFAM).

Após todos os procedimentos verificando-se se o slump atingiu o especificado, procedeu-se a moldagem dos corpos de prova para o ensaio de resistência à compressão nas idades de 3, 7 e 28 dias, conforme a NBR5739/1994 (Resistência a compressão axial).

Inicialmente foi utilizado óleo vegetal na superfície interna da forma para facilitar o desmolde dos corpos de prova. Imediatamente após o adequamento das formas foram moldados 9 (nove) corpos de prova, sendo a colocação do concreto na forma feita com o auxílio de um pequena pá em duas camadas de alturas aproximadamente iguais, recebendo cada camada quinze golpes uniforme com soquete normal de forma que os golpes sejam uniformemente distribuídos sobre a superfície da camada (Figura 24).



Figura 24 - Moldagem dos corpos de prova.

Logo depois do adensamento das duas camadas foi feito o razoamento do topo dos corpos de prova com o auxílio de uma régua metálica. Após a moldagem os corpos de prova foram colocados em um lugar coberto, Figura 25, sendo depois levados para a câmara úmida, por aproximadamente 24h, onde depois foram desmoldados e identificados em séries de 3 (três) para cada idade estabelecida (3, 7 e 28 dias).



Figura 25 – Corpos de prova moldados após ensaio do concreto.

### 3.4.3 Determinação da resistência à compressão

Este ensaio tem por objetivo determinar a resistência à compressão do concreto de acordo com as determinações da NBR 5739.

Antes do ensaio de compressão, a base superior dos corpos de prova foram capeadas com enxofre quente, onde este foi colocado em um molde de superfície lisa e plana, sendo o corpo de prova colocado em seguida de forma que o seu eixo ficasse perpendicular ao plano da superfície do molde de capeamento. Logo que o enxofre resfriou o corpo de prova foi retirado e a operação foi repetida para a base inferior. Este capeamento foi feito horas antes de cada rompimento nas idades estabelecidas.

Depois disso, cada corpo de prova foi levado a uma máquina de ensaios universal, marca Emic, onde foram submetidos ao ensaio de compressão simples.

### 3.5 DOSAGEM EXPERIMENTAL DO CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL.

Para iniciar os ensaios de concreto auto-adensável foi utilizado o traço do concreto convencional produzido e corrigido anteriormente. Acrescentou-se quantidade de aditivo superplastificante de terceira geração a base de policarboxilatos em relação a massa de cimento na quantidade mínima recomendado pelo fabricante. Após a adição do aditivo observou-se o comportamento do concreto através do ensaio do *Slump flow* onde foi verificado sua fluidez e visualmente verificou-se a condição de segregação. Logo após a primeira verificação, foi-se adicionando cimento e o aditivo de forma empírica até o concreto apresentar condições satisfatórias no ensaios citados acima.

Logo a aprovação dos ensaios de fluidez e segregação visual pelo *Slump flow*, executou-se os outros ensaios recomendados pela norma NBR 15823 que estão descritos abaixo, até a aprovação das características do concreto em todos eles.

### 3.5.1 Verificação da fluidez e escoamento do concreto auto-adensável

Foi utilizado o seguinte procedimento para a execução deste ensaio de Slump Flow:

- a) Colocou-se a chapa numa superfície horizontal e nivelada;
- b) A chapa foi umedecida;
- c) Encheu-se rapidamente o cone de concreto sem compactação;
- d) Levantou-se verticalmente o cone, após 15 segundos do seu preenchimento;
- e) Após o concreto atingir o repouso, efetuou-se duas medidas perpendiculares do diâmetro final; e



Figura 26 – Medição de um dos diâmetros no Ensaio de Fluidez do Slump Flow.

- f) O valor final do espalhamento é o resultado da média entre os valores desses dois diâmetros.

### **3.5.2 Verificação da viscosidade plástica aparente através do t500 do concreto auto-adensável**

Foi utilizado o seguinte procedimento para a execução deste ensaio do t500:

- a) Colocou-se uma chapa metálica de 100 x 100mm, com um círculo desenhado no centro com 200mm e outro de 500mm de diâmetro numa superfície horizontal e nivelada;
- b) A chapa foi umedecida;
- c) Encheu-se rapidamente o cone de concreto sem compactação;
- d) Levantou-se o cone verticalmente, após 15 segundos do seu preenchimento;
- e) Simultaneamente o cronômetro foi acionado, registrando o tempo em segundos que o concreto levou para alcançar o diâmetro de 500 mm.

### **3.5.3 Verificação da viscosidade plástica aparente através do *V-funil test* do concreto auto-adensável**

Utilizou-se o seguinte procedimento para a execução do ensaio do *V-funil test*:

- a) Molhou-se o interior do funil em V, limpando-o com um pano molhado;
- b) Colocou-se o funil com seu fundo fechado apontando para o recipiente receptor da amostra;
- c) Nivelou-se a superfície de topo do funil;
- d) Introduziu-se a amostra de concreto no funil sem exercer sobre o mesmo nenhum tipo de compactação por socamento ou vibração mecânica, deixando a superfície do concreto nivelada, retirando o excedente; e

- e) Após 15 segundos, abriu-se rapidamente a tampa do orifício inferior do funil e simultaneamente o cronômetro foi acionado, registrando o tempo (em segundos) de esvaziamento total do funil (Figura 27).



Figura 27 - Ensaio de viscosidade plástica aparente do V-funil test.

#### **3.5.4 Verificação da habilidade de passante através do L-Box test do concreto auto-adensável**

Para o ensaio do *L-Box test* foi utilizado o seguinte procedimento para a sua execução:

- a) Colocou-se a caixa L sobre uma superfície nivelada;
- b) Limpou-se e foram umedecidas as superfícies internas da caixa;
- c) Preencheu-se com concreto a parte superior da caixa no máximo em 5 minutos, sem utilizar nenhum tipo de adensamento, deixando a superfície do concreto nivelado e retirando o excedente (Figura 28);

d) Após 30 a 60 segundos, levantou-se rapidamente a porta;



Figura 28 - Ensaio de habilidade de passante do *L-Box test*.

e) Logo após o concreto atingir seu estado de repouso, mediu-se com uma trena suas alturas H1 e H2, no início e final da parte horizontal da Caixa L, respectivamente.

### **3.5.5 Verificação da resistência a segregação através da coluna de segregação do concreto auto-adensável**

O seguinte procedimento foi utilizado para a execução do ensaio da coluna de segregação:

- a) Colocou-se o tubo sobre uma superfície nivelada;
- b) Preencheu-se o tubo com concreto;
- c) Aguardou-se 20 minutos para a retirada dos módulos;
- d) Lavou-se o agregado graúdo;
- e) Pesou-se o agregado graúdo do módulo superior e inferior;
- f) Comparou-se a pesagem dos módulos através da expressão 13.

$$SR = \frac{2(m_B - m_T)}{m_B + m_T} \quad (13)$$

Onde:

$m_B$  = massa de agregados do módulo inferior;

$m_T$  = massa de agregados do módulo superior.

### 3.5.6 Desenvolvimento para produção do primeiro traço de CAA

Para a produção do primeiro traço de concreto auto-adensável foi usado como ponto de partida o traço de referência do concreto convencional e a indicação do fabricante da quantidade de aditivo mínima inicial, que foi de 0,5% em massa do aditivo em relação a massa do cimento.

De forma empírica foram adicionados uma quantidade de cimento, modificando a relação água/cimento e a quantidade de aditivo em relação a massa do cimento, sendo acrescentados gradativamente até evitar sua segregação e alta fluidez no ensaio do *Slump Flow test*, usando o modo de verificação visual de segregação e ensaio de fluidez.

Após o concreto estar visivelmente em condições satisfatórias no ensaio de verificação visual de segregação e de espalhamento do *Slump Flow test*, este foi submetido aos outros ensaios da norma NBR 15823 de concreto auto-adensável para sua aprovação total. Para tanto, foram realizados os seguintes ensaios para verificar sua qualidade e caracterização dentre os concretos auto-adensáveis conforme prescreve a norma NBR 15823 para concreto auto-adensável:

- Fluidez (ensaio do *Slump flow test*);
- Viscosidade plástica aparente (ensaios do T500 e *V-Funil test*);
- Habilidade de passante (ensaio do *L-Box test*);

- Resistência a segregação (ensaio do Tubo de Segregação).

Traço do concreto auto-adensável obtido no primeiro ensaio de forma empírica foi 1 : 1,16 : 3,04 : 0,48 (cimento; areia; seixo; água) utilizando 0,43% de aditivo.

### **3.5.7 Desenvolvimento para produção do segundo traço de CAA**

Para a produção do segundo traço de concreto auto-adensável foi usado novamente como ponto de partida o traço de referencia do concreto convencional e a indicação do fabricante da quantidade de aditivo mínima de 0,5% em massa do aditivo em relação a massa do cimento.

De forma empírica foram adicionados neste novo traço, além do cimento, o agregado miúdo de forma a modificar a relação água/cimento e a relação agregado miúdo/grauído e a quantidade de aditivo em relação a massa do cimento, sendo acrescentados gradativamente até evitar sua segregação e aumentar sua fluidez neste caso de estudo do segundo traço de CAA.

Através do ensaio do *Slump Flow test* foi novamente usada uma verificação visual de segregação e de fluidez.

Após o concreto auto-adensável estar visivelmente em condições satisfatórias no ensaio de fluidez e verificação de segregação visual do *Slump flow test*, foram feitos os mesmos ensaios empregados no concreto do primeiro traço de CAA, de modo que foi possível verificar a qualidade e a classificação do concreto obtido para o segundo traço de CAA segundo a norma NBR 15823.

O traço do concreto auto-adensável obtido para o segundo CAA foi 1 : 1,27 : 3,00 : 0,44 (cimento; areia; seixo; água) utilizando 0,60% de aditivo.

### 3.5.8 Desenvolvimento do traço de CAA com resíduo de vidro

Para a produção do concreto auto-adensável com resíduo de vidro foi usado como referencia o primeiro traço de concreto auto-adensável com a substituição de 5% do agregado miúdo por resíduo de vidro moído.

Foi utilizado o mesmo método de verificação visual de segregação e ensaio de fluidez com o *Slump flow test*. Logo após estas verificações, o procedimento experimental foi complementado com o restante dos ensaios para sua aprovação e caracterização, conforme os mesmos ensaios empregados para os concretos obtidos para os traços 1 e 2.

Deve-se salientar que o resíduo de vidro moído utilizado foi aquele cuja granulometria é menor do que da peneira numero 200.

O traço do concreto auto-adensável com resíduo de vidro obtido no ensaio foi 1 : 1,16 : 3,04 : 0,48 (cimento; areia e resíduo de vidro; seixo; água) utilizando 1,50% de aditivo e cerca de 5% de resíduo de vidro moído mem substituição ao agregado miúdo .

### 3.6 VERIFICAÇÃO DE TRINCAS E FISSURAS NA SUPERFICIE DE UMA PLACA MOLDADA COM CAA.

Para que fossem observadas possíveis trincas no concreto endurecido uma placa foi moldada com o concreto obtido a partir do segundo traço de CAA. A execução da placa de concreto para a verificação de possíveis fissuras seguiu o procedimento apresentado a seguir:

- a) Escolheu-se o traço que obteve maior resistência no ensaio de compressão do CAA;

- b) Moldou-se a placa de concreto nas dimensões de 39 x 65 x 5cm (Figura 29);
- c) A placa de concreto foi colocada à sombra com cura em ambiente natural por um período de 48 horas;
- d) Verificou-se visualmente a superfície da placa de concreto após as 48 horas de cura natural;
- e) Também após as 48 horas, verificou-se a superfície do concreto, através de microscopia óptica, com ampliação de 30 vezes.



Figura 29 – Preparo da placa de concreto de 39 x 65 x 5cm.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios descritos no capítulo anterior, bem como a análise desses resultados com relação à aplicação desejada.

### 4.1 AGREGADOS

Neste primeiro item, os resultados da caracterização dos agregados empregados para a confecção do concreto utilizados na presente pesquisa são apresentados.

#### 4.1.1 Agregado miúdo

##### 1-Determinação da massa unitária do agregado miúdo

Após a realização do ensaio de determinação da massa unitária, foi obtido o seguinte valor para a areia analisada:

Massa unitária da areia seca no estado solto:  $\rho_s = 1,56 \text{ Kg/dm}^3$ .

Este valor apresenta-se dentro da média de referência indicada pela norma NBR 7251, portanto, isto nos permite avaliar que o material analisado está com o padrão aceitável.

##### 2-Determinação da composição granulométrica do agregado miúdo.

Realizados todos os procedimentos de execução de ensaio, conforme preconiza a NBR 7217 da ABNT, foram obtidos os resultados apresentados na tabela 9 e na Figura 30.

Tabela 9. Composição granulométrica do agregado miúdo.

Peneiras (mm)	Material retido(g)	Percentual retido (%)	Porcentual retido acumulado (%)
4,80	0,0	0,0	0,0
2,40	2,1	0,21	0,21
1,20	25,7	2,36	2,57
0,60	305,6	27,99	30,56
0,30	720,1	41,45	72,01
0,15	943,7	22,36	94,37
Fundo	1.000,0	5,63	100,0

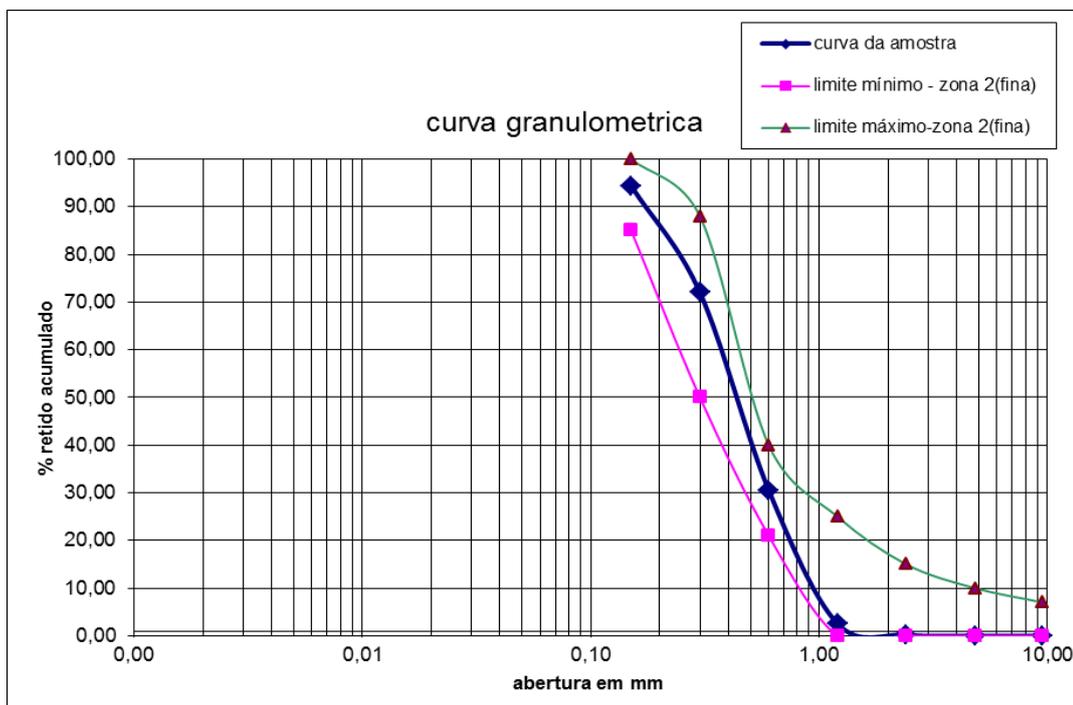


Figura 30 - Gráfico granulométrico do agregado miúdo.

Fonte: NBR 7217 da ABNT.

Tabela 10. Faixas de trabalho do módulo de finura

Módulo de finura da zona ótima	2,20 a 2,90
Módulo de finura da zona utilizável inferior	1,55 a 2,20
Módulo de finura da zona utilizável superior	2,90 a 3,50

Fonte: NBR 7211 da ABNT.

O módulo de finura foi obtido somando-se as percentagens retidas acumuladas e dividindo o somatório por 100, o qual resultou em um módulo de finura igual a 1,997, que conforme a norma, define a areia analisada como uma areia muito fina, pois apresentou módulo de finura menor do que 2,2. Este resultado é característico das areias com o módulo de finura da zona utilizável inferior, o que é comprovado pelos gráficos da Figura 30, que mostram que a areia analisada está dentro da zona inferior 2.

O diâmetro máximo do agregado miúdo definido como a abertura da peneira na qual ficou retido o percentual acumulado igual ou imediatamente inferior a 5%, o que resultou em um diâmetro máximo igual a 1,2 mm.

### 3-Determinação do teor de argila em torrões nos agregados miúdos.

O resultado obtido no ensaio de teor de argila em torrões relativo ao agregado miúdo analisado foi de 0,37%.

Este valor está dentro da faixa de aceitação que em conformidade com a norma NBR 7218 não pode ser superior a 1,5%.

### 4-Avaliação das impurezas orgânicas das areias destinadas ao preparo do concreto.

No ensaio realizado de impurezas orgânicas, a quantidade de impurezas da amostra, ficou com uma coloração pouco mais clara que a solução de comparação

de ácido tânico e hidróxido de sódio, ficando com os parâmetros aceitáveis para sua utilização.

#### 5-Determinação do teor de materiais pulverulentos no agregado miúdo.

É desejável que o teor de materiais pulverulento seja inferior a 3%, porém este teor pode chegar a 5% para concretos estruturais ou pisos de alta performance, porém, para o agregado miúdo analisado, o resultado mostrou a aceitação da areia amostrada, pois esta apresou um teor de 0,6% de materiais pulverulentos.

#### 6-Determinação da massa específica do agregado miúdo por meio do frasco de Chapman.

O resultado obtido neste ensaio obedece ao padrão da grande maioria das massas específicas reais das areias, ou seja,  $2,62 \text{ kg/dm}^3$ .

### Conclusão

Através dos ensaios realizados para o agregado miúdo neste trabalho, constatou-se que o material esta dentro das normas estabelecidas para a produção do concreto convencional e auto-adensável.

#### **4.1.2 Agregado graúdo**

##### 1-Determinação da composição granulométrica do agregado graúdo.

Realizados todos os procedimentos de execução de ensaio, conforme preconiza a NBR 7217 da ABNT, foram obtidos apresentados na tabela 11 e no gráfico da Figura 35.

Tabela-11. Composição granulométrica do agregado graúdo.

Peneiras (mm)	Material retido (g)	Percentual retido (%)	Porcentual retido acumulado (%)
25	-	-	-
19	150,9	3,02	3,02
9,5	3.122,1	59,42	62,44
4,80	4.233,7	22,23	84,67
2,40	4.681,4	8,95	93,63
1,20	4.814,0	2,65	96,28
0,60	4.872,8	1,18	97,46
0,30	4.930,0	1,14	98,60
0,15	4.974,3	0,89	99,49
Fundo	5.000,0	0,51	100,00

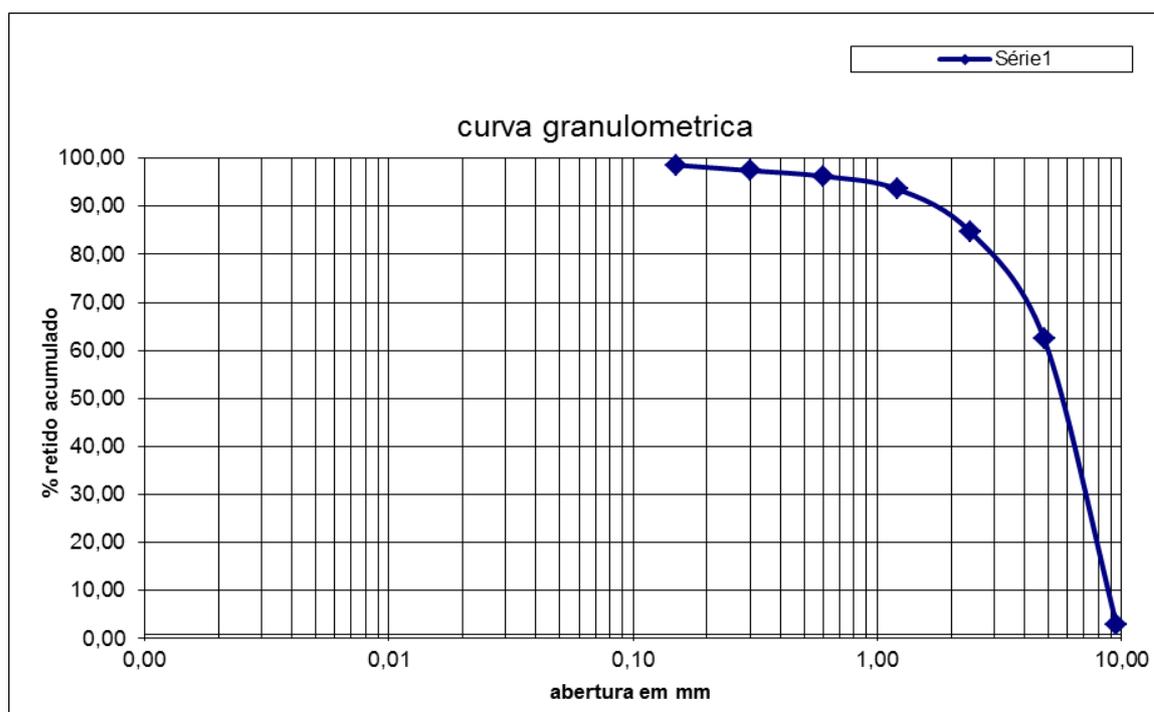


Figura 31 - Gráfico granulométrico do agregado graúdo.

Fonte: NBR 7217 da ABNT.

O diâmetro máximo do agregado graúdo definido como a abertura da peneira na qual ficou retido acumulado o percentual igual o imediatamente inferior a 5%, o que resultou em um diâmetro máximo igual a 19 mm e modulo de finura igual a 6,36.

## 2 - Determinação da massa unitária do agregado graúdo.

Realizados todos os procedimentos de execução do ensaio, conforme preconiza a NBR 7251 da ABNT, foram obtidos os seguintes resultados:

Dados do recipiente:  $V = 19,00 \text{ dm}^3$ ;  $P0 = 5,180 \text{ kg}$ .

Dados da pesagem:  $P1 = 34,865 \text{ kg}$ ;  $P2 = 34,920 \text{ kg}$ .

Média das pesagens:  $Pm = 34,893 \text{ kg}$ .

Observa-se que os valores obtidos nas pesagens ficaram dentro da margem de até 1%, obtendo um resultado de 0,2% de desvio da média.

A massa unitária do agregado graúdo foi então determinada, sendo de  $1,69 \text{ g/cm}^3$ .

O material ensaiado é o comumente utilizado na região e ficou dentro dos parâmetros esperados para este tipo de agregado graúdo.

## 3 - Determinação da massa específica do agregado graúdo por meio do frasco de Chapman.

O resultado obtido neste ensaio obedece ao padrão da grande maioria das massas específicas reais para os agregados graúdos normais, ou seja,  $\rho = 2,62 \text{ g/cm}^3$ .

## 4.2 CIMENTO

O cimento analisado apresentou a granulometria igual a 3,54 % ficando dentro dos padrões determinados pela norma.

## 4.3 ANALISES DO RESÍDUO DE VIDRO MOÍDO UTILIZADO

Foram realizados os seguintes ensaios para caracterizar o resíduo de vidro moído utilizado no concreto auto-adensável:

- Picnometria a gás Hélio;
- Granulometria a laser;
- Eflorescência de raio-x;
- Perda ao fogo;
- Difração de raio-x.

Do ensaio de Picnometria a gás Hélio foram obtidos os resultados mostrados na tabela 12, sendo a massa específica média de 2,92 g/cm<sup>3</sup>, sendo o desvio padrão de 0,0034 g/cm<sup>3</sup> mostrando a precisão desse ensaio. Observa-se ainda, que o resíduo de vidro apresenta uma massa específica cerca de 11% acima dos valores obtidos para os agregados graúdo e miúdo.

Tabela - 12. Ensaio de Picnometria a gás hélio do resíduo de vidro.

Leitura	g/cm <sup>3</sup>	DV (g/cm <sup>3</sup> )
1	2,9266	0,0055
2	2,9212	0,0001
3	2,9213	0,0000
4	2,9194	0,0019
5	2,9179	0,0034
Média	2,91995	

Através do ensaio de granulometria a laser foi obtida a curva granulométrica do resíduo de vidro apresentada na Figura 36, a qual foi comparada com a curva

granulométrica do cimento CP-II Z, também obtida pelo mesmo ensaio. Da qual observa-se que o resíduo possui granulometria maior do que a do cimento empregado na pesquisa.

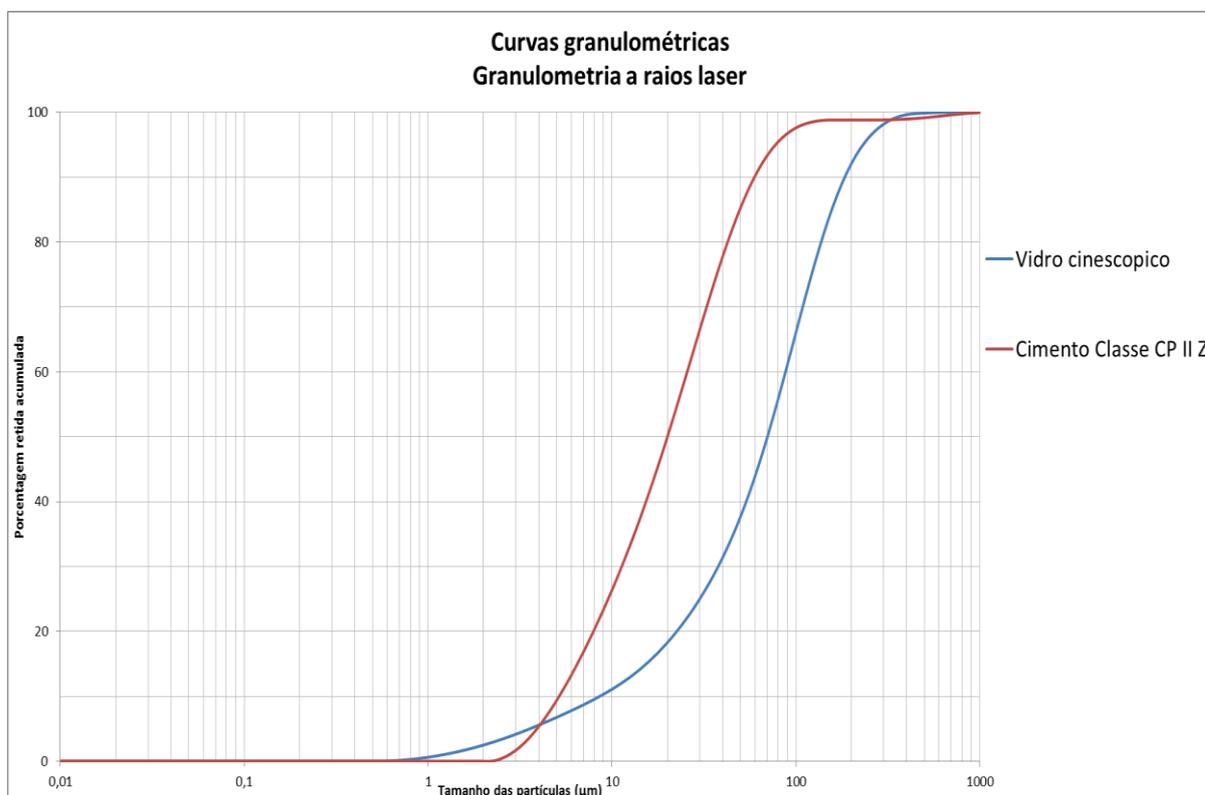


Figura 32 – Gráfico granulométrico a raio laser do resíduo de vidro.

Fonte: Laboratório de materiais COPPE/UFRJ

Através do ensaio de efluorescência de raio-x foram detectados as substâncias e suas quantidades que o resíduo de vidro é constituído, sendo descritos na tabela 13, exceto a quantidade de carbono que para este tipo de ensaio não tem capacidade de verificação deste elemento químico.

Para a verificação da quantidade de carbono foi realizado o ensaio de perda ao fogo que detectou uma quantidade de 0,38% de carbono no resíduo de vidro analisado.

Tabela 13. Ensaio de Eflorescência de raio-x do resíduo de vidro.

EFLORESCÊNCIA RAIIO-X	
Substancias encontradas	Quantidade
SiO <sub>2</sub>	51,74 %
SrO	13,30 %
BaO	11,72 %
PbO	7,15 %
K <sub>2</sub> O	7,00 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,64 %
CaO	1,45 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,35 %
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,26 %
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,51 %
ZrO <sub>2</sub>	0,51 %
ZnO	0,39 %
<b>Total</b>	<b>100,00 %</b>

Na tabela 13, observa-se a predominância de óxido de silício, o que é esperado para um material desse tipo, porém, observa-se uma pequena quantidade de óxido chumbo, provavelmente proveniente do processo de produção dos cinescópios, matéria prima do resíduo de vidro empregado nesta pesquisa.

O gráfico da Figura 37 obtido por meio do ensaio de difração de raio-x mostra um caráter de material amorfo, o que caracteriza um material que possivelmente não deverá reagir quimicamente com o cimento, ou seja, da forma com será empregado na pesquisa, o resíduo de vidro possivelmente não deverá apresentar problemas quanto a sua utilização no concreto, principalmente com relação as reações álcalis agregado.

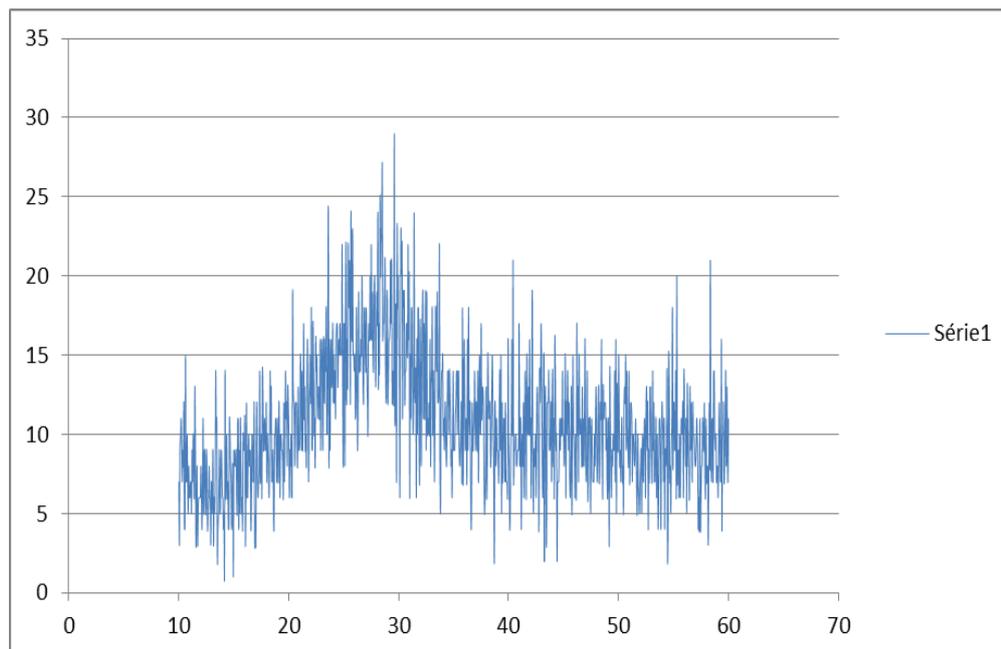


Figura 33 – Gráfico de difração a raio-x do resíduo de vidro.

Fonte: Laboratório de materiais COPPE/UFRJ.

#### 4.4 DOSAGEM EXPERIMENTAL DO CONCRETO CONVENCIONAL

Com os resultados da caracterização dos agregados e cimento foi possível obter o seguinte traço em massa através do método da ABCP:

- cimento = 416,67 kg/m<sup>3</sup>;
- agregado miúdo = 482,00 kg/m<sup>3</sup>;
- agregado graúdo = 1267,50 kg/m<sup>3</sup>;
- água = 200 kg/m<sup>3</sup>.

Cujo traço do concreto convencional obtido foi: 1 : 1,16 : 3,04 : 0,48; o qual após ter sido executado, este concreto foi moldado em corpos de prova cilíndricos, que foram colocados em cura úmida, sendo rompidos aos 3, 7 e 28 dias, apresentando os resultados mostrados na tabela 14.

Tabela - 14. Resistência do concreto convencional.

Dias de cura	CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	Média	Desvio Padrão
3	17,6	1,0	19,9	18,17	1,54
7	27,2	30,6	29,7	29,17	1,61
28	31,7	31,6	29,6	30,97	1,18

O resultado do Slump test obteve um resultado de 62 mm, conforme Figura 38, ficando dentro dos padrões de abatimento estabelecido de 60 mm a 80 mm.



Figura 34 – Ensaio do Slump test com abatimento de 62 mm.

#### 4.5 DOSAGEM EXPERIMENTAL DO CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL

##### 4.5.1 Desenvolvimento do primeiro traço de CAA

Para o primeiro traço foram obtidas as características apresentadas na tabela 15, cujas aplicações, conforme a norma NBR 15823 para concreto auto-adensável,

levando em conta a sua fluidez, se enquadra na maioria das aplicações correntes, podendo ser usado em paredes, vigas e pilares.

Com relação a sua característica de viscosidade plástica aparente, o CCA está adequado para uso em elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, mas exige controle de exsudação e de segregação podendo ser usado em lajes, paredes diafragma, pilares-parede, indústria de pré-moldados.

Na característica de habilidade de passante ficou adequado para a maioria das aplicações correntes podendo ser usado em elementos estruturais com espaçamento de armaduras de 60 mm a 80 mm de diâmetro.

Na resistência a segregação ficou adequado para uso em pilares, paredes, elementos estruturais complexos e elementos pré-moldados.

Tabela 15. Resultados dos ensaios e características do CAA para o primeiro traço.

Ensaio	Resultado	Classe
Slump flow test (cm)	71,5	SF 2: 660 a 750
T <sub>500</sub> (s)	0,9	VS 1 ≤ 2 s
V - funil test (s)	2,48	VF 1 ≤ 8 s
L - box test	0,85	PL 2 ≥ 0,80, com 3 barras de aço.
Coluna de Segregação (%)	14,97	RS 2 ≤ 15

A tabela 16 mostra as resistências obtidas nos ensaios de compressão axial nas idades de 3, 7 e 28 dias.

Tabela 16. Resistência do CAA obtido para o primeiro traço.

Dias de cura	CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão
3	19,0	20,5	19,7	19,73	1,06
7	24,0	24,3	24,0	24,10	0,17
28	28,5	28,9	26,5	27,97	1,28

Com os resultados apresentados, observa-se que o objetivo da produção do primeiro traço de concreto auto-adensável foi alcançado, apesar do aumento do consumo de cimento ter sido 16,5% maior em relação ao traço matriz (concreto convencional) e a resistência ter ficado 9,69% abaixo do traço de referencia, ainda assim, a menor resistência obtida ficou acima do fck estabelecido. Além disso, observa-se que houve o uso de 0,43% de aditivo superplastificante em relação a massa do cimento que foi o menor dentre os três experimentos. Não sendo usado nenhum aditivo ou fíler modificador de viscosidade para este primeiro ensaio.

#### 4.5.2 Desenvolvimento do segundo traço de CAA

No segundo traço foram obtidas as características apresentadas na tabela 17, as quais, conforme a norma NBR 15823 para concreto auto-adensável, levando-se em consideração a sua fluidez, enquadra o concreto produzido, para a maioria das aplicações em estruturas, podendo ser usado em paredes vigas pilares.

Sua viscosidade plástica aparente ficou adequada ao uso em elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, mas exige controle de exsudação e de segregação, podendo ser usado em lajes, paredes diafragma, pilares-parede, indústria de pré-moldados.

Na habilidade de passante, apresentou-se adequado para a maioria das aplicações correntes, podendo ser utilizado em elementos estruturais com espaçamento de armaduras de 60 mm a 80 mm de diâmetro.

Na resistência a segregação, este pode ser aplicado com uma distância a ser percorrida menor que 5 metros e espaçamento entre armadura maior que 80 mm de espessura, sendo adequado para uso em lajes de pequena espessura, estruturas convencionais de pouca complexidade.

Tabela - 17. Ensaio e características do CAA para o segundo traço.

Ensaio	Resultado	Classe
Slump flow test (cm)	68,5	SF 2: 660 a 750
T <sub>500</sub> (s)	1,12	VS 1 ≤ 2 s
V - funil test (s)	2,58	VF 1 ≤ 8 s
L - box test	0,80	PL 2 ≥ 0,80, com 3 barras de aço.
Coluna de Segregação (%)	18,01	RS 1 ≤ 20

Na tabela 18 são as resistências obtidas nos ensaios de compressão axial nas idades de 3, 7 e 28 dias.

Tabela 18. Resistência do CAA obtido para o segundo traço.

Dias de cura	CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão
3	26,6	25,2	26,0	25,93	0,70
7	31,7	31,4	32,0	31,70	0,30
28	33,1	34,2	32,4	33,23	0,91

Dos resultados apresentado na tabela 18, observa-se que a resistência média obtida para o CAA foi, de acordo com o segundo traço, de 33,23 MPa, com todos os valores superiores a 31,6 MPa, que é o valor de  $F_{cj28}$ , determinado na expressão (7), atendendo desta forma aos valores de resistência estabelecidos inicialmente.

#### 4.6 DOSAGEM EXPERIMENTAL DO CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL COM RESÍDUO DE VIDRO

As características do concreto com resíduo de vidro moído são apresentadas na tabela 19, que de acordo com a norma NBR 15823 para o concreto auto-adensável, levando-se em consideração sua fluidez, enquadra este como concreto adequado para a maioria das aplicações em estruturas correntes, podendo ser usado em paredes vigas pilares.

Sua viscosidade plástica aparente ficou adequada para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, mas exige controle de exsudação e da segregação podendo ser usado em lajes, paredes diafragma, pilares-parede, indústria de pré-moldados.

Na habilidade de passante, o concreto apresentou-se adequado para a maioria das aplicações correntes podendo ser utilizado em elementos estruturais com espaçamento de armaduras de 60 mm a 80 mm de diâmetro.

Tabela 19. Ensaio e características do CAA com resíduo de vidro.

Ensaio	Resultado	Classe
Slump flow test (cm)	69,5	SF 2: 660 a 750
T500 (s)	1,88	VS 1 ≤ 2 s
V - funil test (s)	4,31	VF 1 ≤ 8 s
L - box test	0,87	PL 2 ≥ 0,80, com 3 barras de aço.
Coluna de Segregação (%)	7,78	RS 2 ≤ 15

Na resistência a segregação pode ser aplicado com uma distância a ser percorrida menor que 5 metros e espaçamento entre armadura menor que 80mm de

espessura e ficou adequado para uso em, pilares, paredes, elementos estruturais complexos e elementos pré-moldados.

A tabela 20 mostra as resistências obtidas nos ensaios de compressão axial nas idades de 3, 7 e 28 dias.

Tabela 20. Resistência do CAA com resíduo de vidro.

Dias de cura	CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	Média	Desvio Padrão
3	24,0	21,2	23,6	22,93	1,51
7	33,3	28,3	29,8	30,30	2,57
28	33,6	33,5	34,5	33,86	0,55

A produção do concreto com resíduo de vidro, também atingiu seus objetivos de obter um CAA. Além disso, observou-se dos resultados apresentados na tabela 20 que houve um aumento da resistência mecânica à compressão axial, em torno de 21,2% em relação ao primeiro traço de CAA.

Dos resultados apresentado na tabela 18, observa-se ainda que a resistência média obtida para o CAA com resíduo de vidro moído foi de 33,23 MPa, com todos os valores superiores a 31,6 MPa, que é o valor de  $F_{cj28}$ , determinado na expressão (7), atendendo desta forma aos valores de resistência estabelecidos inicialmente.

Houve ainda um aumento considerável de resistência a segregação, onde o primeiro traço de CAA apresentou uma segregação de 14,97%, enquanto que o CAA com resíduo de vidro apresentou uma segregação de apenas 7,78%, com uma diferença de 92,41% entre ambos. Porém, houve um consumo muito maior de aditivo superplastificante, algo em torno de 349% em relação ao primeiro traço de CAA, isto devido ao aumento da viscosidade por efeito físico do resíduo de vidro.

#### 4.7 VERIFICAÇÃO DE TRINCAS E FISSURAS NA SUPERFÍCIE DA PLACA OBTIDA COM CAA

Utilizando o segundo traço produzido do concreto auto-adensável devido a ser o traço de maior resistência, conforme já mencionado, preparou-se uma placa de concreto para verificar a ocorrência de trincas ou fissuras em sua superfície em 48 horas de cura em ambiente natural.

Conforme mostrado na Figura 39, observou-se que a superfície da placa não apresentou nenhum tipo de trinca ou fissura. Mesmo observando sua superfície ampliada 30 vezes, por meio de um microscópio óptico, esta também não apresentou nenhum tipo de fissura visível (Figura 39). Donde, conclui-se que para o concreto analisado na presente pesquisa não há a necessidade da utilização de fibras para inibir o estado de fissuração advindo de um consumo mais elevado de cimento.

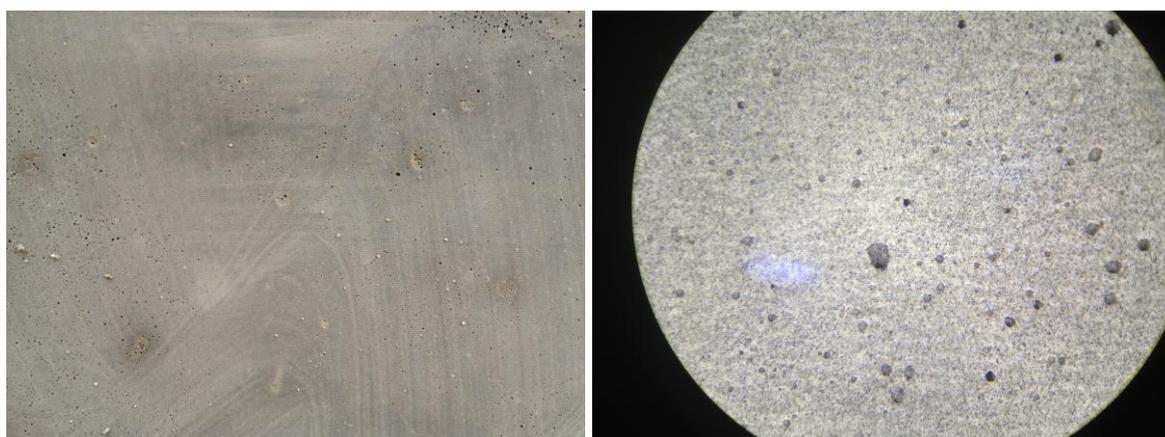


Figura 35 – Superfície da placa de concreto, com imagem normal (esquerda) e ampliada em 30 vezes (direita). Em ambos os casos sem trincas ou fissuras visíveis.

## 6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos agregados graúdo e miúdo mostraram uma qualidade aceitável, passando por todos os requisitos exigidos pelos ensaios realizados neste trabalho conforme suas respectivas normas, para a produção de concreto comum. Com relação ao agregado miúdo, para a produção do concreto auto-adensável, observou-se que o mesmo possui ótimas características para a obtenção de um Concreto Auto-adensável (CAA), pois a areia estudada era composta de uma granulometria característica de areia fina, comum na região, que melhora a viscosidade do concreto auto-adensável reduzindo a possibilidade de segregação.

O agregado graúdo também apresentou boas características para a produção do CAA, pois possui uma forma mais lisa e arredondada do que as britas graníticas que são comumente utilizadas em outras regiões do país, onde essa característica consequentemente melhorará a trabalhabilidade do CAA. Como o seu diâmetro máximo obtido foi de 19 mm, o seixo empregado na pesquisa possui característica granulométrica que ajudará o concreto auto-adensável a ter uma boa habilidade de passante, pois evitará que ocorram bloqueios ao passar entre as armaduras evitando consequentemente a segregação.

Na escolha do traço para a produção do concreto convencional o método de cálculo escolhido foi o da ABCP, pois este método usado permitiu produzir o concreto convencional que apresentou uma boa relação argamassa-agregado, atingiu um valor no ensaio de abatimento dentro do especificado e atendeu as resistências pré-estabelecidas com os materiais comercializados na região de Manaus.

O objetivo da produção do concreto auto-adensável foi atingido, apesar do aumento do consumo de cimento com relação ao traço matriz, houve um pequeno uso de aditivo superplastificante e nenhum uso de aditivo modificador de viscosidade. O primeiro e segundo traço apresentaram boas características segundo a norma brasileira para concreto auto-adensável.

A produção do concreto com resíduo de vidro moído, passado na peneira numero 200, também atingiu seus objetivos de tornar-se auto-adensável, além de aumentar sua resistência mecânica em relação ao primeiro traço de concreto auto-adensável usado como matriz, porém, houve um consumo maior de aditivo superplastificante em relação aos dois traços de concreto auto-adensável, devido ao aumento da viscosidade por efeito físico do resíduo de vidro.

Através das análises deste trabalho concluiu-se que os materiais da região de Manaus têm boas características para a produção de concreto auto-adensável sem ter a necessidade da importação da maioria dos insumos para sua produção, excetuando-se unicamente o aditivo superplastificante, que não é produzido na região.

Já o resíduo de vidro nas condições que foram aplicadas, mostrou ter boas características de modificar a viscosidade do concreto no estado fresco. Já o concreto com resíduo de vidro no estado endurecido melhorou a resistência mecânica, no ensaio de compressão axial, em todas as idades ensaiadas (3, 7, e 28 dias), em relação ao primeiro traço de concreto auto-adensável que foi usado como matriz para a produção do traço do concreto auto-adensável sem o resíduo, devido a um maior preenchimento dos vazios, com conseqüente aumento de sua densidade.

O resíduo de vidro é um material que mantém as propriedades do concreto auto-adensável no estado endurecido com ganhos de resistência e no estado fresco com o aumento de viscosidade, a qual diminui a sua segregação estática e dinâmica.

Com o uso resíduo de vidro além de melhorar as propriedades do concreto a sociedade ainda poderá ter grandes ganhos ambientais, pois este resíduo normalmente acaba em lixões sem destinação, podendo ser uma aplicação útil na construção civil.

## 7 REFERÊNCIAS

ACI 211.4R-93, “*Guide for selecting proportions for high-strength concrete with portland cement and fly ash*”. **ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA, 2004.**

ALENCAR, R. BATTAGIN, I. , & CUPERTINO, M. A. , 2010. **A norma brasileira de concreto auto-adensável.** *Revista Concreto.* Ano XXXVIII, n. 59, pp 58-64. São Paulo: IBRACON.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. ***Manual de Ensaios de agregados, concreto fresco e concreto endurecido.*** São Paulo: ABCP, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12654: *Controle tecnológico de materiais componentes do concreto.*** Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823: *Concreto auto-adensável – Classificação, controle e aceitação no estado fresco.*** Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823: *Ensaios para classificação do concreto auto-adensável.*** Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: *Moldagem e cura de corpos-de-prova de concreto cilíndricos e prismáticos.*** Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: *Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto.*** Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: *Agregados para concreto.*** Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: *Determinação da resistência à compressão.*** Rio de Janeiro, 1997.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215:** *Determinação da finura do cimento por meio de peneira 0.075mm n° 200. Rio de Janeiro, 1997.*

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7217:** *Agregado - determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987.*

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7218:** *Agregados - determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 1987.*

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7219:** *Agregados - determinação do teor de materiais pulverulentos. Rio de Janeiro, 1987.*

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7220:** *Impurezas orgânicas das areias. Rio de Janeiro, 1987.*

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7251:** *Agregado em estado compacto e seco – determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.*

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7809:** *Agregado graúdo - determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. Rio de Janeiro, 1982.*

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7810:** *Agregado em estado solto – determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1983.*

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9777:** *Agregados - determinação da absorção de água em agregados miúdos. Rio de Janeiro, 1987.*

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9937:** *Agregados - determinação da absorção e da massa específica para agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1987.*

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9976:** *Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1987.*

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM-67: *Concreto fresco – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.* Rio de Janeiro, 1998.**

BARROS, A. R. ***Avaliação do comportamento de vigas de concreto.*** Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas. Alagoas, Brasil, 2009.

BARROS, A. R., ***Avaliação do comportamento de vigas de concreto.*** Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Alagoas, 2008.

BARTOS, P. J. M. *Fresh Concrete: **Properties and Tests.*** Elsevier Science Publishers B. V., London 1992.

BOUHAMOU, N ; BELAS, N ; ATTAR, A,; ACHOUR, B ; EBROUKI. Properties of Self-Consolidating Concrete Produced Using Local Algerian Materials. ***In Journal of Construction in Developing Countries,*** Algeria, 2011.

CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE. **Local Impacts and land stewardship.** Switzerland, 2002. Disponível em: <  
[http://www.wbcscement.org/index.php?option=com\\_content&task=view&id=67&Itemid=136](http://www.wbcscement.org/index.php?option=com_content&task=view&id=67&Itemid=136)>. Acesso em 5 de junho de 2012.

CIMENTO.ORG. **Tipos de cimento, CII-Z.** São Paulo, 2005. Disponível em: <  
[http://www.cimento.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=98&Itemid=151](http://www.cimento.org/index.php?option=com_content&view=article&id=98&Itemid=151)>. Acesso em 19 de junho de 2012.

Dodson, V., **“Concrete Admixtures”**, VNR Structural Engineering Series (1990).

DRUTA, C. **Tensile Strength and Bonding Characteristics of Self-compacting Concrete.** Thesis of Master of Science in Engineering Science, Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, Louisiana 2003.

EFNARC – European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems. **Specification and guidelines for self-compacting concrete.** In: *EFNARC*. Fevereiro, 2002.

FRANCES YANG. **Self-Consolidating Concrete.** CE 241: Concrete Technology, GAGNE, R., A. BOISVERT, AND M. PIGEON, “*Effect of Superplasticizer on Mechanical Properties of High - Strength Concretes with and without Silica Fume*”, In ***ACI Materials Journal***, Vol. 93, No. 2, pp.111-120 (1996).

GEIKER, M.R., BRANDL, M., THRANE, L.N., and Nielsen, L.F., “*On the effect of coarse aggregate fraction and shape on the rheological properties of self-compacting concrete*”, ***Cement, Concrete, and Aggregates***, Vol.24, No.1, 2002.

GOMES, Paulo; BARROS, Alexandre. **Métodos de Dosagem de Concreto Autoadensável.** São Paulo: Pini; 2009.

HARTMANN, C. T. **Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilatos destinado a concretos de cimento Portland.** Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

HU, J., AND WANG, K., “*Effects of aggregate on flow properties of mortar*”, **Proceeding of the Mid-Continent Transportation Research Symposium, Ames, Iowa**, Iowa State University, 2005.

LISBÔA, E. M., **Obtenção do concreto auto-adensável utilizando resíduo de serragem de mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Alagoas, 2004.

LIU, M. **Wider Application of Additions in Self-compacting Concrete.** Thesis of doctor, University College London, London, 2009.

MD NOR ATAN & HANIZAM AWANG. *the compressive and flexural strengths of self-compacting concrete using raw rice husk ash.* In: ***Journal of Engineering Science and Technology Vol. 6, No. 6 (2011) 720 – 732***, 2011.

N R GAYWALA : D B RAIJIWALA. *SELF COMPACTING CONCRETE: A CONCRETE OF NEXT DECADE* In: **Journal of Engineering Research and Studie**, Vol. II, Issue IV, October-December, 2011/213-218.

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

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

PAIVA, Otávio. **Resíduo industrial de vidro moído em argamassa de cimento Portland**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Amazonas, Manaus - AM: 2009.

SAFIUDDIN, **Development of Self-consolidating High Performance Concrete Incorporating Rice Husk Ash**, Thesis of doctor, University of Waterloo, Ontario, 2008.

SCCEPG, *The European Guidelines for Self-compacting Concrete: Specification, Production and Use*, **Self-compacting Concrete European Project Group, The European Federation of Concrete Admixtures Associations**, West Midlands, UK, 2005.Spring, 2004.

SILVA, **Estudo de viabilidade técnica do uso de resíduo de vidro de cinescópico como agregado graúdo no concreto de cimento Portland**, 53<sup>o</sup> Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON, 2011.

STRUBLE, L., AND HAWKINS, P. *“Hydraulic cements – physical properties”*, **Tests and Properties of Concrete, ASTM STP 169C, American Society for Testing and Materials**, Philadelphia, 1994.

SYED ALI RIZWAN, THOMAS A BIER AND HUSNAIN AHMAD, *Self-compacting Concrete -a Useful Technology. In :Pakistan Engineering Congress, 70th Annual Session Proceedings*, PAKISTAN, 2008.

TANDE, S. N. & MOHITE, P. B. Applications of Self Compacting Concrete. 32nd **Conference on OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES: 28 - 29 August** Singapore, 2007.

TAYLOR, M.R., LYDON, F.D., and Barr, B.I.G., "*Mix proportions for high strength concrete*", ***Construction and Building Materials*, Vol.10, No.6**, 1996.

TUTIKIAN, Bernardo; DAL MOLIN, Denise. **Concreto Auto-adensável**. São Paulo: Pini; 2008.