

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA**

**RAFAEL GERMANO DAL MOLIN FILHO**

**CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM CINZA DO BAGAÇO DA  
CANA-DE-AÇÚCAR**

**MARINGÁ**  
**2012**

RAFAEL GERMANO DAL MOLIN FILHO

CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM CINZA DO BAGAÇO DA  
CANA-DE-AÇÚCAR

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, na área de concentração Infra-estrutura e Sistemas Urbanos, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Romel Dias Vanderlei.

MARINGÁ  
2012

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
(Biblioteca Central - UEM, Maringá – PR., Brasil)

M722c Molin Filho, Rafael Germano Dal  
Concreto autoadensável com cinza do bagaço da  
cana-de-açúcar / Rafael Germano Dal Molin Filho. --  
Maringá, 2012.  
163 f. : il. (algumas color.)

Orientador: Prof. Dr. Romel Dias Vanderlei.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de  
Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de  
Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Urbana, 2012.

1. Argamassa autoadensável. 2. Concreto especial.  
3. Resíduo agroindustrial. 4. Reologia. I.  
Vanderlei, Romel Dias, orient. II. Universidade  
Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia.  
Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Urbana. III. Título.

CDD 22. ed. 690


masa-000282

RAFAEL GERMANO DAL MOLIN FILHO

CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM CINZA DO BAGAÇO DA  
CANA-DE-AÇÚCAR


Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, na área de concentração Infra-estrutura e Sistemas Urbanos, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 20 de abril de 2012.

  
Prof. Dr. **Berenice Martins Toralles**

**Carbonari**

**Membro**

  
Prof. Dr. **Paulo César Correia Gomes**

**Membro**

  
Prof. Dr. **Romel Dias Vanderlei**

**Orientador**

***Dedico este trabalho de forma especial a DEUS.***

*Também a minha esposa Larissa Nakao Dal Molin Filho pelo seu imenso carinho, compreensão e amor desprendido a nossa família e ao incentivo especial a este trabalho. Da mesma forma aos meus pais Antonio Carlos Filho e Irene Maria Dal Molin Filho, que por intermédio do amor, sempre me ensinaram a buscar as conquistas da vida pelo caminho da justiça, da honestidade e da paz.*

## **AGRADECIMENTOS**

De uma maneira geral, agradeço a todos que fizeram parte direta ou indiretamente do desenvolvimento desta pesquisa. Aos colegas, professores, funcionários e amigos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana.

Ao meu orientador, o professor doutor Romel Dias Vanderlei, que de forma especial sempre trouxe sábias e fundamentais contribuições por meio do conhecimento profissional transmitido. Agora aproveito a oportunidade para agradecer a sua preciosa capacidade de trabalho, que de maneira exemplar, soube identificar e reconhecer minhas fraquezas com a percepção de convertê-las em pontos positivos a meu favor, sempre me incentivando e mostrando os caminhos a serem seguidos para alcançar cada etapa do trabalho. Muitíssimo obrigado.

À amiga, companheira e dedicada Marisa Fujiko Nagano, que doou horas e mais horas de honrosas contribuições aos experimentos realizados.

Ao saudoso amigo Otávio Tadashi Quadros Watanabe, que sempre de forma exemplar e competente ajudou nas cansativas e exigentes rotinas dos experimentos.

Ao caro amigo Lucas Seemann Kim, que com a sua competência eficiente não mediu esforços no desempenho das atividades experimentais exigidas ao longo do trabalho.

Ao ilustre amigo Thiago Botion Neri pelo incentivo dado em todos os momentos. Aos trabalhos realizados em conjunto e pela imensa parceria também em todos os locais de convívio de nossa amizade.

Ao professor doutor Generoso De Angelis, coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana (PEU), pela imensa dedicação e excelência ao longo da administração do programa. Sempre encorajando com profissionalismo os mestrandos no rumo das conquistas.

Ao secretário Douglas Bueno (PEU-UEM) e ao técnico administrativo Juarez Antonio dos Santos (DEC-UEM) que cordialmente proporcionaram ajuda e amizade.

À professora doutora Fernanda Antonio Simões pela gentileza de compartilhar de forma espontânea o espaço físico e os recursos da sua sala para o desenvolvimento tranquilo e confortável das minhas atividades.

Ao professor José Wilson Assunção, coordenador do Laboratório, e a todos da equipe Laboratórios de Construção Civil e de Mecânica dos Solos, especialmente à senhora Keli e aos senhores Valter, Cipriano, Celso e Aparecido, que ajudaram na condução dos trabalhos.

À Agromega Ltda, na pessoa do senhor Deivid, pela agilização e condição especial de fornecimento do filer calcário calcítico.

À Conterpav, na pessoa do senhor Anderson pela doação da brita para o desenvolvimento do CAA. Da mesma maneira ao professor José Kiysha Yshiba pela articulação desta doação.

À Basf do Brasil, por intermédio do engenheiro coordenador de negócios Vitor M. Marconi, pelo patrocínio do aditivo superplastificante Glenium 51.

À metalúrgica Sepo e à Loja Portal, sob a tutela do ilustre amigo Rodrigo Lopes pelos serviços prestados na montagem e produção dos dispositivos.

À Usina Santa Teresinha pela doação da CBC para a UEM.

Novamente e de forma incessante agradeço a Deus pela oportunidade de compartilhar com todos estes irmãos mais uma conquista importante em minha vida.

*“O Espírito do Senhor sempre te revestirá,  
segura na mão de Deus e vai”*

*Nelson Monteiro da Mota*



## RESUMO

O concreto autoadensável (CAA) apresenta consistência fluida e ao mesmo tempo coesa com característica de auto-adensamento, possibilitando o preenchimento de fôrmas e a passagem por entre obstáculos apenas pela ação do seu peso próprio, sem a ocorrência de segregação. Assim, o CAA descarta o uso de agitadores mecânicos na etapa de lançamento e compactação, reduzindo custos, tempo e etapas no processo no canteiro de obras ou em fábricas de pré-moldados. Em sua composição, geralmente são usadas adições minerais e aditivos químicos. Os materiais utilizados foram: filer calcário calcítico (adição mineral), como aditivo químico o superplastificante GLENIUM 51 (policarboxílico de 3ª geração), cimento CP II E 32, areia quartzosa, brita basáltica, água e a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC). A CBC é um subproduto gerado no reaproveitamento energético do bagaço da cana-de-açúcar queimado nas caldeiras das usinas. Somente no Paraná, estima-se para a safra 2012/2013 a geração de 268.000 t de CBC. A CBC foi utilizada como agregado miúdo em substituição parcial da areia. Desta forma, objetivou-se a contribuição para a diminuição da extração da areia e a criação de uma destinação técnica com valor agregado para a CBC. O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de CAA com a utilização da CBC. Os parâmetros autoadensáveis foram classificados pelos critérios da ABNT NBR 15823-1:2010 e de Gomes e Barros (2009). Os ensaios autoadensáveis utilizados foram: o Ensaio de Espalhamento no Cone de Abrams para avaliar a fluidez, o escoamento e a viscosidade plástica, o Ensaio do Funil-V para avaliar a viscosidade, os Ensaios da Caixa-L e do Anel-J para avaliar a habilidade passante e o Ensaio do Tubo-U para avaliar a resistência à segregação. O traço unitário, em massa, do CAA com CBC desenvolvido foi: 1: 1,8: 0,2: 2,21: 0,45: 0,40: 0,0055 (cimento: areia: CBC: brita: água: filer: superplastificante). O desenvolvimento do CAA sem CBC apresentou um traço unitário, em massa, similar de 1: 2: 2,12: 0,45: 0,40: 0,0055 (cimento: areia: brita: água: filer: superplastificante), diferente apenas em 0,09 na relação da brita e na presença parcial da CBC em substituição a areia. Ambos os traços de concretos, sem e com CBC, tiveram atendimento dos parâmetros autoadensáveis em cada ensaio avaliado, ou pela ABNT NBR 15823-1:2010 ou por Gomes e Barros (2009). Sendo que o CAA com 10% de CBC, em substituição parcial da areia, teve atendimento de todos os parâmetros dos ensaios definidos pela ABNT NBR 15823-1:2010. Os desempenhos da resistência à compressão e da resistência à tração aos 28 dias foram satisfatórios. Pela ABNT NBR 8953:1992 foi possível classificá-los como pertencentes ao grupo I e classe C35 de resistência. Os consumos de cimento foram de 401 kg/m<sup>3</sup> para o CAA sem CBC e de 396 kg/m<sup>3</sup> para o CAA com CBC, diferença de 1,2%, podendo assim afirmar que a CBC não promoveu alteração significativa no consumo de cimento. Porém, a substituição da areia por CBC na taxa de 10% promoveu uma redução no consumo de areia de 89,2 kg/m<sup>3</sup>. Contudo, foi verificado que a substituição de 10% de areia por CBC no traço do CAA desenvolvido, não altera as características reológicas, mantendo os mesmos aspectos de fluidez, coesão e consistência pelos ensaios realizados, assim como não produz alterações nas propriedades mecânicas. Com isso, pode-se concluir que é possível utilizar a CBC na produção de CAA, sem prejuízo às características reológicas e as propriedades mecânicas, reduzindo assim o consumo de areia.

**Palavras-chave:** argamassa autoadensável; concreto especial; resíduo agroindustrial; reologia.

## ABSTRACT

Self-compacting concrete (SCC) presents a fluid consistency as well as a cohesive self-compacting feature which enables it to fill molds and to pass through obstacles only through its own weight, without any segregation. Thus, self-compacting concrete casts off the use of mechanical stirrer at the initial step and at the compacting, reducing costs, time and steps for processes in building sites and prefabricated industries. Mineral additions and chemical additives are generally used for its composition. The material used was: calcitic limestone filler (mineral addition), GLENIUM 51 hyperplasticiser (3rd generation polycarboxylic), cement CP II E 32, quartzite sands, basalt gravel, water and the ash from sugar cane bagasse, which is a by-product generated through the reuse sugar cane burned bagasse energetic in boilers. It is estimated for 2012/2013 harvest the generation of 268.000 t of CBC, which was applied as fine aggregate partially replacing sand. Thus, the aim was the contribution to a decreasing in sand extraction and to a development of a technical destination with aggregate value for the bagasse. The self-compacting parameters were classified by ABNT NBR 15823-1:2010 e criteria, by Gomes and Barros (2009). The self-compacting tests applied were: Slump Flow Test to evaluate plastic fluidity, draining and viscosity; V-Funnel Test to evaluate viscosity, L-Box Test, J-Ring Test to evaluate bandwidth ability and, U-Pipe Test to evaluate resistance to segregation. The single feature, in mass, which was developed from SCC with CBC was 1: 1,8: 0,2: 2,21: 0,45: 0,40: 0,0055 (cement: sand: CBC: gravel: water: filler: hyperplasticiser). The development of of SCC without CBC presented a single feature, in mass, similar to 1: 2: 2,12: 0,45: 0,40: 0,0055 (cement: sand: gravel: water: filler: hyperplasticiser), being different only in 0,009 for gravel relation and for CBC partial presence when replacing sand). Both features had their aspects evaluated by at least one of the criteria followed, where SCC with 10% CBC, replacing sand, reached all parameters recommended by ABNT NBR 15823-1:2010. The SCC with 10% CBC partially replacing sand has met all standards set by ABNT NBR 15823-1:2010. Compressive strength and tensile strength performances for the 28 days were both satisfactory. It was possible to classify them as belonging to a resistance class I and C35 group through ABNT NBR 8953:1992. Cement consumption was 401 kg/m<sup>3</sup> for SCC without CBC and 396 kg/m<sup>3</sup> for CAA with CBC, a difference of 1.2%, establishing, thus, that CBC did not provide a meaningful change in cement consumption. However, CBC replacing sand at 10% rate provided a decreasing of 89.2 kg/m<sup>3</sup> in sand consumption. It was observed, though, that replacing 10% of sand for CBC in the developed SCC feature does not change the rheological characteristics and keeps the same fluidity, cohesion and consistency aspects, as well as it does not produce any changes in mechanical properties. It can therefore be established that it is possible to use CBC in SCC production without having its rheological characteristics and mechanical properties damaged reducing thus sand consumption.

**Key-words:** self-compacting grout; special concrete; agroindustrial waste; rheology.

# SUMÁRIO

|  |          |
|--|----------|
| <b>CAPÍTULO 1</b> .....  | <b>1</b> |
| INTRODUÇÃO.....  | 1        |
| 1.1 JUSTIFICATIVA.....   | 3        |
| 1.2 DELIMITAÇÃO.....   | 5        |
| 1.3 OBJETIVOS.....   | 5        |
| 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....  | 6        |
| <b>CAPÍTULO 2</b> .....  | <b>7</b> |
| REVISÃO TEÓRICA.....   | 7        |
| 2.1 CONCRETO AUTOADENSÁVEL.....  | 7        |
| 2.1.1 Origem e Definição.....  | 7        |
| 2.1.2 Vantagens e Desvantagens.....  | 9        |
| 2.1.3 Aplicações e Indicações de Uso.....  | 10       |
| 2.1.4 Componentes do CAA.....  | 12       |
| 2.1.4.1 Cimento.....   | 14       |
| 2.1.4.2 Agregados.....   | 15       |
| 2.1.4.3 Água.....  | 15       |
| 2.1.4.4 Adições.....   | 16       |
| 2.1.4.5 Aditivos.....  | 18       |
| 2.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL.....  | 21       |
| 2.2.1 Reologia.....  | 21       |
| 2.2.2 Propriedades no Estado Fresco.....   | 24       |
| 2.2.2.1 Norma ABNT NBR 15823 para Concreto Autoadensável.....                            | 24       |
| 2.2.2.2 Ensaios para Determinação das Propriedades Auto-Adensáveis no Estado Fresco..... | 28       |
| 2.2.2.2.1 Ensaio de espalhamento ( <i>Slump Flow Test</i> ).....                         | 28       |
| 2.2.2.2.2 Ensaio do Anel-J ( <i>J-Ring test</i> ).....                                   | 29       |
| 2.2.2.2.3 Ensaio da Caixa-L ( <i>L-Box test</i> ).....                                   | 31       |
| 2.2.2.2.4 Ensaio do Funil-V ( <i>V-Funnel test</i> ).....                                | 32       |
| 2.2.2.2.5 Ensaio do Tubo-U ( <i>U-Pipe Test</i> ).....                                   | 34       |
| 2.2.3 Propriedades no Estado Endurecido.....   | 35       |
| 2.2.3.1 Aderência do Concreto.....   | 35       |
| 2.2.3.2 Resistência à Compressão.....  | 36       |
| 2.2.3.3 Resistência à Tração.....  | 37       |
| 2.2.3.4 Módulo de Elasticidade.....  | 37       |
| 2.3 MÉTODOS DE DOSAGEM DO CAA.....   | 38       |
| 2.3.1 Método de Okamura.....   | 39       |

|  |    |
|--|----|
| 2.3.1.1 Ensaio do Tronco de Cone na Mesa de Consistência ..... | 42 |
| 2.3.2 Método da EFNARC 2005 .....                              | 43 |
| 2.3.3 Método de Gomes 2002 .....                               | 45 |
| 2.3.3.1 Ensaio do Funil de Marsh .....                         | 48 |
| 2.3.3.2 Ensaio do Mini-slump .....                             | 50 |
| 2.3.4 Método de Tutikian 2004 .....                            | 50 |
| 2.4 CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR (CBC) .....              | 53 |
| 2.4.1 Considerações gerais .....                               | 53 |
| 2.4.2 Processo de geração da CBC .....                         | 54 |
| 2.4.3 Características da CBC .....                             | 58 |
| 2.4.4 Trabalhos com CBC .....                                  | 60 |

## **CAPÍTULO 3 .....**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>MATERIAIS E MÉTODOS PARA GERAÇÃO DO CAA .....</b>   | <b>63</b> |
| 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS NA COMPOSIÇÃO DO CAA .....  | 64        |
| 3.1.1 Cimento .....  | 64        |
| 3.1.2 Agregados .....  | 64        |
| 3.1.2.1 Agregado Miúdo .....   | 64        |
| 3.1.2.2 Agregado Graúdo .....  | 66        |
| 3.1.3 Adições e Aditivos .....   | 67        |
| 3.1.3.1 Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar (CBC) .....  | 67        |
| 3.1.3.2 Filer Calcário Calcítico .....   | 69        |
| 3.1.3.3 Aditivo Superplastificante .....   | 70        |
| 3.1.4 Água .....   | 70        |
| 3.2 MÉTODO PROPOSTO PARA OBTENÇÃO DO CAA .....   | 71        |
| 3.2.1 Parâmetros de Verificação das Propriedades Autoadensáveis .....  | 73        |
| 3.2.2 Materiais, Procedimentos e Roteiro para a Geração do CAA .....   | 74        |
| 3.2.3 Detalhamento da Metodologia .....  | 78        |
| 3.2.3.1 Seleção e Caracterização dos Materiais – <b>Fase 1</b> .....   | 78        |
| 3.2.3.2 Estudo da Pasta – <b>Fase 2</b> .....  | 78        |
| 3.2.3.2.1 Determinação do fator $a/c$ .....  | 80        |
| 3.2.3.2.2 Determinação da dosagem ótima de $sp/c$ para cada faixa de $f/c$ .....                             | 82        |
| 3.2.3.2.3 Estudo complementar da variação do volume de pasta na composição ótima do esqueleto granular ..... | 83        |
| 3.2.3.3 Estudo da Argamassa – <b>Fase 3</b> .....  | 89        |
| 3.2.3.3.1 Dosagem dos materiais na argamassa .....   | 91        |
| 3.2.3.4 Desenvolvimento do CAA – <b>Fase 4</b> .....   | 93        |
| 3.2.3.4.1 Dosagem dos materiais no CAA .....   | 93        |

|                                  |  |            |
|----------------------------------|--|------------|
| 3.2.3.4.2                        | Produção do CAA .....  | 94         |
| 3.2.3.5                          | Desenvolvimento do CAA-CBC – <b>Fase 5</b> .....   | 94         |
| 3.2.3.5.1                        | Dosagem dos materiais no CAA-CBC .....   | 94         |
| 3.2.3.5.2                        | Produção do CAA-CBC .....  | 96         |
| <b>CAPÍTULO 4</b>                | .....  | <b>97</b>  |
| RESULTADOS E DISCUSSÕES .....    |  | 97         |
| 4.1                              | MATERIAIS UTILIZADOS NA COMPOSIÇÃO DO CAA – <b>Fase 1</b> .....                                    | 97         |
| 4.1.1                            | Agregado Miúdo .....   | 97         |
| 4.1.2                            | Agregado Graúdo .....  | 98         |
| 4.1.3                            | Filer Calcário Calcítico .....   | 99         |
| 4.1.4                            | Cinza do Bagaço de Cana-de-açúcar (CBC) .....  | 100        |
| 4.2                              | ESTUDOS DA PASTA – <b>Fase 2</b> .....   | 101        |
| 4.2.1                            | Determinação da Pasta .....  | 101        |
| 4.2.1.1                          | Estudo do Fator a/c .....  | 101        |
| 4.2.1.2                          | Determinação da Dosagem Ótima de sp/c para Cada Faixa de f/c .....                                 | 102        |
| 4.2.2                            | Estudo Complementar da Variação do Volume de Pasta na Composição Ótima do Esqueleto granular ..... | 109        |
| 4.2.2.1                          | Estudo da Composição Ótima do Esqueleto Granular .....   | 109        |
| 4.2.2.2                          | Estudo do Concreto no Estado Fresco .....  | 110        |
| 4.3                              | ESTUDO DA ARGAMASSA – <b>Fase 3</b> .....  | 118        |
| 4.3.1                            | Estudo da Argamassa .....  | 118        |
| 4.3.2                            | Estudo da Argamassa com CBC .....  | 119        |
| 4.4                              | DESENVOLVIMENTO DO CAA – <b>Fase 4</b> .....   | 123        |
| 4.4.1                            | Estudo do Estado Fresco .....  | 123        |
| 4.4.2                            | Estudo do Estado Endurecido .....  | 131        |
| 4.5                              | DESENVOLVIMENTO DO CAA-CBC – <b>Fase 5</b> .....   | 133        |
| 4.5.1                            | Estudo do Estado Fresco .....  | 133        |
| 4.5.2                            | Estudo do Estado Endurecido .....  | 145        |
| 4.6                              | CONSIDERAÇÕES FINAIS .....   | 148        |
| <b>CAPÍTULO 5</b>                | .....  | <b>153</b> |
| CONCLUSÃO .....                  |  | 153        |
| 5.1                              | TRABALHOS FUTUROS .....  | 155        |
| <b>CAPÍTULO 6</b>                | .....  | <b>156</b> |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... |  | 156        |

## LISTA DE EQUAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| Equação 1 - Expressão de Newton .....   | 22 |
| Equação 2 - Expressão de Newton para fluídos pseudoplásticos .....                              | 23 |
| Equação 3 - Cálculo da Resistência à Segregação (R.S.) no método do Tubo-U .....                | 35 |
| Equação 4 - Expressão do espalhamento relativo ( $G_m$ ) .....                                  | 43 |
| Equação 5 - Expressão do tempo de escoamento relativo ( $R_m$ ).....                            | 43 |
| Equação 6 - Equação para determinação do Grau de Uniformidade (U) .....                         | 68 |
| Equação 7 - Coeficiente de Curvatura (CC) .....   | 68 |
| Equação 8 - Determinação da Massa Unitária (MU.) .....  | 85 |
| Equação 9 - Determinação do Volume de Sólidos ( $V_s$ ) .....                                   | 86 |
| Equação 10 - Índice de vazios em porcentagem (IV) .....   | 86 |
| Equação 11 - Somatória do volume dos materiais em 1 m <sup>3</sup> de concreto (pasta).....     | 87 |
| Equação 12 - Massa de cimento no concreto em kg .....   | 87 |
| Equação 13 - Massa de brita no concreto em kg .....   | 87 |
| Equação 14 - Massa de areia no concreto em kg .....   | 87 |
| Equação 15 - Equação para determinação da água total no concreto em kg .....                    | 88 |
| Equação 16 - Determinação da água adicionada na primeira etapa em kg .....                      | 88 |
| Equação 17 - Determinação da água adicionada na segunda etapa em kg .....                       | 88 |
| Equação 18 - Determinação da água adicionada na terceira etapa em kg .....                      | 88 |
| Equação 19 - Obtenção da massa de brita corrigida em kg .....                                   | 89 |
| Equação 20 - Obtenção da massa de areia corrigida em kg .....                                   | 89 |
| Equação 21 - Somatória do volume dos materiais em 1 m <sup>3</sup> de concreto (argamassa)..... | 93 |
| Equação 22 - Massa de cimento no concreto em kg .....   | 93 |
| Equação 23 - Massa de brita no concreto em kg .....   | 94 |
| Equação 24 - Massa de agregado miúdo no concreto em kg .....                                    | 95 |
| Equação 25 - Massa de areia no concreto em kg .....   | 95 |
| Equação 26 - Massa de CBC no concreto em kg .....   | 95 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Vista do bloco de ancoragem e da estrutura da ponte Akashi-Kaykio.....                                       | 10 |
| Figura 2 - Tanque para gás liquefeito em Osaka.....   | 11 |
| Figura 3 - Túnel com alta densidade de aço em Yokohama .....  | 11 |
| Figura 4 - Comparação do uso de finos no CAA versus Convencional .....  | 13 |
| Figura 5 - Comportamento reológico de alguns tipos de concretos .....   | 21 |
| Figura 6 - Ilustrações do aparato para o ensaio de espalhamento do cone de Abrams ...                                   | 29 |
| Figura 7 - Ilustrações do Anel-Japonês .....  | 31 |
| Figura 8 - Ilustrações do aparato para o ensaio de passagem da Caixa-L.....   | 32 |
| Figura 9 - Esquemas do aparato recomendado para o ensaio do Funil-V .....   | 33 |
| Figura 10 - Ilustrações do aparato para o ensaio de resistência à segregação Tubo-U ...                                 | 34 |
| Figura 11 - Esquema simplificado do método de dosagem de Okamura .....  | 40 |
| Figura 12 - Esquema simplificado do método de dosagem de Okamura .....  | 41 |
| Figura 13 - Modelo de cone para o ensaio de mini-slump para argamassas.....   | 42 |
| Figura 14 - Fluxograma da metodologia do CADAR de Gomes (2002) .....  | 47 |
| Figura 15 - Ilustração do Funil de Marsh e ao lado modelo de gráfico para determinação do ponto de saturação .....      | 49 |
| Figura 16 - Modelo de mini-cone para o ensaio de Mini-slump.....  | 50 |
| Figura 17 - Fluxograma da metodologia de Tutikian .....   | 51 |
| Figura 18 - Usinas, destilarias e projetos do setor sucroalcooleiro do PR .....   | 53 |
| Figura 19 - Esquemática básica da produção de açúcar e álcool e seus subprodutos  | 55 |
| Figura 20 - Ilustrações gerais do processo de geração e da própria CBC.....   | 56 |
| Figura 21 - Distribuição granulométrica da areia segundo ABNT NBR 7211:2009 .....                                       | 65 |
| Figura 22 - Distribuição granulométrica dos agregados graúdos segundo ABNT NBR 7211:2009 para limites (9,5 - 25)mm..... | 67 |
| Figura 23 - Curva Granulométrica da CBC de acordo com ABNT NBR 6502:1995 .....  | 68 |
| Figura 24 - Fluxograma da metodologia. ....   | 72 |
| Figura 25 – Betoneira de 400 litros usada na preparação do concreto. ....   | 74 |
| Figura 26 – Moldagem e desmoldagem dos corpos de prova .....  | 76 |
| Figura 27 - Prensa hidráulica de 100 toneladas para os ensaios de compressão axial e compressão diametral .....         | 77 |
| Figura 28 - Funil de Marsh com suporte e béqueres utilizados .....  | 79 |
| Figura 29 - Mini-cone e placa de vidro utilizados .....   | 79 |
| Figura 30 - Dispositivos e materiais utilizados no preparo da pasta .....   | 80 |

|   |            |
|---|------------|
| <b>Figura 31 - Dispositivos utilizados no preparo da Massa Unitária.....</b>  | <b>84</b>  |
| <b>Figura 32 – Esquematização para o ensaio do Tronco de Cone na Mesa de Consistência .....</b>   | <b>90</b>  |
| <b>Figura 33 – Armazenamento e disponibilização para a produção dos materiais secos ...</b>   | <b>98</b>  |
| <b>Figura 34 – Adição mineral e CBC .....</b>   | <b>100</b> |
| <b>Figura 35 - Pasta piloto do fator <math>a/c=0,45</math> .....</b>  | <b>102</b> |
| <b>Figura 36 - Gráfico do tempo de fluxo (Log.) versus a variação de <math>sp/c</math> para cada faixa de <math>f/c</math>.....</b>       | <b>104</b> |
| <b>Figura 37- Ensaio do mini-slump para as pastas com melhores resultados .....</b>   | <b>105</b> |
| <b>Figura 38 - Tempo de fluxo (log.) versus a variação <math>sp/c</math> para <math>f/c</math> (0,4 e 0,5) e <math>a/c</math> 0,5 ...</b> | <b>107</b> |
| <b>Figura 39 - Novos espalhamentos da pasta na placa de vidro para as melhores combinações de cada relação <math>f/c</math>.....</b>      | <b>107</b> |
| <b>Figura 40 - Novas ilustrações da pasta 34. ....</b>  | <b>108</b> |
| <b>Figura 41 - Gráficos da composição ar/br.....</b>  | <b>109</b> |
| <b>Figura 42 - Amostra preparada no cilindro padrão para pesagem .....</b>  | <b>110</b> |
| <b>Figura 43 - Espalhamento dos concretos 1 e 2 .....</b>   | <b>113</b> |
| <b>Figura 44 - Espalhamento dos concretos: 3, 4, 5 e 6.....</b>   | <b>114</b> |
| <b>Figura 45 - Amostra do concreto 4.....</b>   | <b>115</b> |
| <b>Figura 46 - Espalhamento dos concretos: 7 e 8.....</b>   | <b>115</b> |
| <b>Figura 47 - Ensaio de adensabilidade do concreto 7 .....</b>   | <b>116</b> |
| <b>Figura 48 – Espalhamento pelo ensaio do Tronco de Cone na Mesa de Consistência ...</b>   | <b>119</b> |
| <b>Figura 49 – Espalhamento para as argamassas com melhores resultados para cada taxa de substituição da areia por CBC .....</b>          | <b>121</b> |
| <b>Figura 50 – Evolução do ponto de saturação pelo aumento da taxa de CBC em substituição a areia .....</b>                               | <b>122</b> |
| <b>Figura 51 – Concretos 9 e 11 na placa de espalhamento.....</b>   | <b>124</b> |
| <b>Figura 52 – Repetição do concreto 11 e concreto 12 na placa de espalhamento .....</b>  | <b>125</b> |
| <b>Figura 53 – Ensaio de espalhamento do concreto 13.....</b>   | <b>128</b> |
| <b>Figura 54 – Ensaio do Anel-J para o concreto 13.....</b>   | <b>129</b> |
| <b>Figura 55 – Ensaio do Tubo-U para o concreto 13.....</b>   | <b>130</b> |
| <b>Figura 56 – Ensaio de compressão diametral do concreto 13.....</b>   | <b>132</b> |
| <b>Figura 57 – Ensaio de espalhamento concreto 14.....</b>  | <b>135</b> |
| <b>Figura 58 – Aspecto do concreto 15 no Slump Flow Test, no Anel-J e na Caixa-L.....</b>   | <b>137</b> |
| <b>Figura 59 – Ensaio de espalhamento para os concretos 16, 17 e 18 .....</b>   | <b>138</b> |
| <b>Figura 60 – Ensaio de espalhamento e Anel-J para os concretos 18 e 19 .....</b>  | <b>141</b> |
| <b>Figura 61 – Ensaio da Caixa-L para o concreto 19.....</b>  | <b>143</b> |



|  |            |
|--|------------|
| <b>Figura 62 – Ensaio com o Funil-V, Tubo-U e Massa Específica do concreto 19.....</b>                 | <b>144</b> |
| <b>Figura 63 – Corpo de prova do concreto 19 rompido após ensaio de compressão<br/>diametral .....</b> | <b>146</b> |
| <b>Figura 64 – Aspectos visuais dos concretos com e sem CBC .....</b>                                  | <b>146</b> |

## LISTA DE QUADROS

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Quadro 1 - Composições de CAA por alguns pesquisadores .....</b>                                    | <b>13</b> |
| <b>Quadro 2 - Efeitos de alguns materiais na reologia.....</b>   | <b>22</b> |
| <b>Quadro 3 – Divisão da série da ABNT NBR 15823 em função das propriedades no estado fresco .....</b> | <b>25</b> |
| <b>Quadro 4 - Classificação do CAA em função de sua aplicação .....</b>                                | <b>27</b> |
| <b>Quadro 5- Normas de referências para o CAA .....</b>  | <b>44</b> |
| <b>Quadro 6 - Lista de testes e informações para as propriedades do CAA.....</b>                       | <b>45</b> |
| <b>Quadro 7 - Subprodutos e resíduos gerados pela fabricação de álcool e açúcar.....</b>               | <b>57</b> |
| <b>Quadro 8 - Alguns trabalhos com o foco de avaliação do uso da CBC na construção civil .....</b>     | <b>62</b> |
| <b>Quadro 9 - Informações sobre o filer calcário calcítico utilizado .....</b>                         | <b>70</b> |
| <b>Quadro 10 - Informações sobre o aditivo superplastificante utilizado.....</b>                       | <b>70</b> |
| <b>Quadro 11 - Faixa de parâmetros para os ensaios de auto-adensamento .....</b>                       | <b>73</b> |

## LISTA DE TABELAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 1 - Caracterização química de alguns trabalhos com CBC .....                          | 59  |
| Tabela 2 – Caracterização do Cimento CP II E 32 .....  | 64  |
| Tabela 3 - Caracterização da areia .....   | 65  |
| Tabela 4 - Classificação da areia segundo ABNT NBR 7211:2009 .....                           | 65  |
| Tabela 5 - Caracterização da brita .....   | 66  |
| Tabela 6 - Classificação da brita segundo ABNT NBR 7211:2009 .....                           | 66  |
| Tabela 7 - Caracterização da CBC oriunda da Usina de Iguatemi.....                           | 69  |
| Tabela 8 - Quantidade de água a considerar para acréscimo na mistura.....                    | 81  |
| Tabela 9 - Proporções dos materiais para um a/c = 0,5 e f/c = 0,5.....                       | 83  |
| Tabela 10 - Faixas experimentais entre areia e brita .....                                   | 84  |
| Tabela 11 - Estudo do fator a/c .....  | 101 |
| Tabela 12 - Informações do estudo da pasta .....   | 103 |
| Tabela 13 - Informações do novo estudo da pasta com a/c = 0,5.....                           | 106 |
| Tabela 14 - Traço unitário das 8 faixas de concretos ensaiadas.....                          | 110 |
| Tabela 15 - Composição das 8 faixas de concretos ensaiados.....                              | 111 |
| Tabela 16 - Faixas experimentais de concreto no ensaio de espalhamento.....                  | 112 |
| Tabela 17 – Composição e resultados para argamassas sem CBC .....                            | 118 |
| Tabela 18 – Composição e resultados para argamassas com CBC.....                             | 120 |
| Tabela 19 – Traço unitário dos concretos com Varg: 50%, 60% e 70%.....                       | 123 |
| Tabela 20 – Traço unitário dos concretos 11 e 12.....  | 124 |
| Tabela 21 – Resultados dos ensaios autoadensáveis dos concretos 11 e 12 .....                | 125 |
| Tabela 22 – Traço unitário dos concretos 12 e 13.....  | 126 |
| Tabela 23 – Resultados dos ensaios autoadensáveis do novo concreto 12 e do concreto 13 ..... | 127 |
| Tabela 24 – Resistência à compressão e tração por compressão diametral aos 28 dias.          | 131 |
| Tabela 25 – Análise da resistência à tração pela ABNT NBR 6118:2007.....                     | 132 |
| Tabela 26 – Traço unitário do concreto 14.....   | 133 |
| Tabela 27 – Resultados dos ensaios autoadensáveis do concreto 14 .....                       | 134 |
| Tabela 28 – Traço unitário do concreto 15.....   | 135 |
| Tabela 29 – Resultados dos ensaios autoadensáveis do concreto 15 .....                       | 136 |
| Tabela 30 – Traços unitários dos concretos 16, 17 e 18.....                                  | 138 |
| Tabela 31 – Resultados dos ensaios autoadensáveis dos concretos 16, 17 e 18 .....            | 139 |
| Tabela 32 – Traços unitários da repetição do traço 18 e o novo traço 19 .....                | 140 |

|  |            |
|--|------------|
| <b>Tabela 33 – Resultados dos ensaios autoadensáveis dos concretos 18 e 19 .....</b>       | <b>142</b> |
| <b>Tabela 34 – Resistência à compressão e tração por compressão diametral aos 28 dias.</b> | <b>145</b> |
| <b>Tabela 35 – Análise da resistência à tração pela ABNT NBR 6118:2007.....</b>            | <b>147</b> |
| <b>Tabela 36 – Composição das argamassas .....</b>   | <b>150</b> |
| <b>Tabela 37 – Traços unitários do concreto 13 e do concreto 19.....</b>                   | <b>151</b> |
| <b>Tabela 38 – Consumo de materiais para 1 m<sup>3</sup> de concreto .....</b>             | <b>151</b> |

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- $A_{ad}$  – adição total de água no concreto em kg
- $A_{ad01}$  – primeira parcela de água adicionada em kg
- $A_{ad02}$  – segunda parcela de água adicionada em kg
- $A_{ad03}$  – terceira parcela de água adicionada em kg
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- $ABS_{ar}$  – capacidade de absorção de água pela areia em %
- $ABS_{br}$  – capacidade de absorção de água pela brita em %
- ACI - American Concrete Institute
- $A_{sp}$  – percentual de água no aditivo químico
- a/c – relação água por cimento
- $a_{miúdo}/c$  – relação agregado miúdo (areia + CBC) por cimento
- a/f – relação água por finos
- ar/br – relação areia por brita
- ar/c – relação areia por cimento
- br/ar – relação brita por areia
- BS<sub>j</sub> - Blocking step (efeito do bloqueio) avaliado no ensaio do Anel-J
- CAA – Concreto autoadensável
- CAA - CBC– Concreto autoadensável com cinza do bagaço da cana-de- açúcar
- CAA – CBC<sub>10%</sub>– Concreto autoadensável com taxa de 10% de substituição de areia por cinza do bagaço da cana-de-açúcar
- CADAR – Concreto autoadensável de alta resistência
- CBC – cinza do bagaço da cana-de-açúcar
- CC – índice de curvatura
- CP – corpo de prova de concreto
- EFNARC - European Federation For Specialist Construction Chemicals And Concrete Systems
- $f_{c,D}$ - resistência característica à tração em MPa
- $f_{ck}$  – resistência característica a compressão em MPa
- $f_{ct,m}$  – resistência à tração média esperada em MPa
- $f_{ctk,inf}$  – resistência à tração característica esperada em MPa
- f/c – relação filer por cimento
- $G_m$  – espalhamento relativo da argamassa no ensaio de Tronco de Cone de Consistência
- $H_{ar}$  – umidade da areia
- $H_{br}$  – umidade da brita
- IV – índice de vazios em porcentagem
- $M_{amiúdo}$  – massa do agregado miúdo em kg

**$M_{ar}$**  – massa de areia em kg

**$M_{arc}$**  – massa de areia corrigida em kg

**$M_{br}$**  – massa de brita em kg

**$M_{brc}$**  – massa de brita corrigida em kg

**$M_c$**  – massa de cimento em kg

**$M_{CBC}$**  – massa de cinza do bagaço de cana-de-açúcar em kg

**MU** – massa unitária em kg/m<sup>3</sup>

**PJ** - índice de habilidade passante obtido no ensaio do Anel-J

**PL** - índice de habilidade passante obtido no ensaio da Caixa-L

**RS** – Resistência à segregação do concreto

**Rm** – tempo de escoamento relativo da argamassa no ensaio de Tronco de Cone de Consistência

**SF** – classe obtida no ensaio de espalhamento (*Slump Flow Test*)

**SCC** - Self-Compacting Concrete

**sp/c** – relação superplastificante por cimento

**t<sub>120</sub>** – tempo de escoamento do concreto obtido na marca de 20cm no ensaio da Caixa-L em segundos

**t<sub>140</sub>** – tempo de escoamento do concreto obtido na marca de 40cm no ensaio da Caixa-L em segundos

**t<sub>500</sub>** – tempo de espalhamento do concreto no diâmetro de 500mm (segundos)

**t<sub>500j</sub>** – tempo de espalhamento do concreto no diâmetro de 500mm pelo Anel-J (segundos)

**U** - grau de uniformidade de materiais

**V<sub>ar</sub>** – volume de areia para 1m<sup>3</sup> de concreto

**V<sub>arg</sub>** – volume de argamassa para 1m<sup>3</sup> de concreto

**V<sub>br</sub>** – volume de brita para 1m<sup>3</sup> de concreto

**V<sub>p</sub>** – volume de pasta para 1m<sup>3</sup> de concreto

**VF** – índice de viscosidade plástica aparente obtido no ensaio do Funil-V

**VMA** - aditivos promotores de viscosidade

**V<sub>S</sub>** – volume dos sólidos para 1m<sup>3</sup> de concreto

**VS** – índice de viscosidade plástica aparente obtido no ensaio de espalhamento

**$\rho$**  – massa específica em kg/m<sup>3</sup>

**$\rho_{ar}$**  – massa específica da areia em kg/m<sup>3</sup>

**$\rho_{arg}$**  – massa específica da argamassa em kg/m<sup>3</sup>

**$\rho_{br}$**  – massa específica da brita em kg/m<sup>3</sup>

**$\rho_p$**  – massa específica da pasta em kg/m<sup>3</sup>

# *Capítulo 1*

---

## **INTRODUÇÃO**

Nos últimos anos, mais precisamente no período das três últimas décadas, muitas pesquisas e desenvolvimentos buscaram avanços e melhorias no desempenho dos concretos para aplicação e uso de forma racional e mecanizada na indústria da construção. Desenvolvimentos significativos surgiram para a tecnologia de concreto de alta resistência, que objetiva a melhoria das propriedades mecânicas especificamente. Da mesma maneira, neste cenário, com bastante significância, encontra-se a busca pelo desenvolvimento de melhoria da durabilidade das estruturas de concreto, pelo fato que são enormes os seus custos de reparação e reabilitação quando necessários (NUNES, 2001).

No Japão, no início da década de 1980 os profissionais da construção civil japonesa procuravam desenvolver mecanismos, produtos e processos que relevassem as situações complexas de execução das estruturas armadas, com alta densidade de aço e com formas complexas cada vez mais presentes nos canteiros de obras. Esta preocupação era eminente, uma vez que para que se obtivesse o resultado esperado no desempenho da estrutura, era necessário que a mesma fosse produzida com altos controles de compactação e adensamento. A mão de obra qualificada para tal feito não era abundante e a existente não possuía um grau de segurança confiável. Esta conjuntura de informações serviu como premissa fundamental para que a equipe do professor Okamura, da Universidade de Tokyo, iniciasse os primeiros desenvolvimentos de uma categoria de concreto, que possuía o intuito da eliminação da etapa de adensamento e compactação no canteiro de obras. Este feito seria possível pelo controle de suas propriedades e pela ação do seu peso próprio na execução das peças. Surgiam então, os primeiros desenvolvimentos do concreto autoadensável (CAA) (GOMES, 2002; OKAMURA e OUCHI, 2003; LISBÔA, 2004). O primeiro protótipo foi produzido em 1988, com materiais convencionais do mercado (TOKUDOME, 2006).

Alguns mecanismos, ferramentas e máquinas existentes, atualmente favorecem a aplicação com mais tecnologia e controle da etapa de adensamento. Usualmente temos os vibradores de

agulhas comumente usados e também as técnicas de compactação como elementos que contribuem para a aplicação do concreto no seu estado fresco para a garantia das resistências requeridas e da durabilidade almejada. Porém, trata-se de etapas que geram custos e tempo no processo de execução consideráveis e que são possíveis de melhorias. Em algumas aplicações não é possível utilizar esta tecnologia de adensamento. Estas informações consolidam outros fatores de importância e atuação de desenvolvimento do CAA para a indústria da construção civil (NUNES, 2001; MELO, 2005).

O concreto autoadensável é uma categoria especial de concreto que não necessita de vibração na etapa de lançamento para que haja o adensamento uniforme e homogêneo. Desta forma, se obtém um concreto capaz de moldar-se nos espaços apenas pelo seu peso próprio. Dentre as suas características desejáveis destacam-se a fluidez com moderada viscosidade e o controle da coesão entre suas partículas combatendo a segregação e controle da exsudação (MCGOVERN, 2002; TOKUDOME, 2006).

No mundo, muitas pesquisas são desenvolvidas com o objetivo de criar metodologias de obtenção do CAA com alguns subprodutos gerados pela indústria. Desta maneira, são desenvolvidos mecanismos que interagem diretamente para a contribuição da preservação ambiental dos recursos naturais, mas que ao mesmo tempo permitem a aplicação destes resíduos de forma inteligente dentro de parâmetros tecnicamente controlados e recomendados (CAVALCANTI, 2006).

A cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC), objeto central desta pesquisa, é um subproduto gerado pela queima do bagaço da cana-de-açúcar, no processo de co-geração de energia nas usinas de álcool e açúcar, que vem sendo estudado, entre outras aplicações, para uso e aplicação na indústria da construção como para produção de argamassas e concretos. Alguns estudos objetivam o uso da mesma sob a forma de agregado para efeito filer na combinação granular dos compostos e outros estudos objetivam o seu uso até mesmo em substituição de aglomerantes como o cimento portland na fabricação de argamassas e concretos. Esta última condição é possível quando se tem o controle tecnológico da queima e da moagem para preservação das propriedades pozolânicas presentes quando a CBC encontra-se no seu estado amorfo (CORDEIRO, 2006).



## 1.1 JUSTIFICATIVA

Segundo Lisbôa *et al.* (2005, p. 1), o concreto autoadensável (CAA) requer na sua estrutura granular agregados menores do que em um concreto convencional para auxiliar na formação da sua microestrutura e na obtenção de algumas das suas principais características. Desta forma, potencializa-se o uso dos resíduos finamente moídos, que juntamente com o cimento irão compor os chamados finos do concreto e ou das argamassas.

Para que um concreto seja caracterizado como autoadensável, o composto deve possuir controle em pelo menos três propriedades: a fluidez, a coesão e a resistência à segregação (EFNARC, 2002). Desta forma, o uso de resíduos finos e inertes, nas suas devidas proporções, com controles tecnológicos e com a devida comprovação técnica, contribuem para a garantia de duas das três propriedades, a coesão e a resistência à segregação (LISBÔA *et al.*, 2005, GOMES, 2002; NUNES, 2001; MELO, 2005). Cavalcanti (2006, p. 30), ainda recomendou o uso de finos com mais três contribuições, a saber: pela diminuição da dosagem de cimento, pela redução do calor de hidratação e pela contribuição para redução de fissuras internas e melhorias na microestrutura do concreto.

Pesquisas buscam desenvolvimentos de materiais que aproveitem os resíduos gerados nos seus processos industriais, bem como nos processos de outras indústrias, com o intuito de reduzir seus custos e minimizar os impactos ambientais que possam ser causados por estes resíduos que podem ser tratados como subprodutos gerados nos processos. Dentre elas, destacam-se as que possuem o foco de desenvolvimento de finos para uso como filer na estrutura granular de concretos e argamassas e ou até mesmo com aplicações pozolânicas proporcionando propriedades aglomerantes. Desta maneira, permite-se a redução do uso de cimento no traço do concreto pela substituição direta por tais resíduos (NUNES, 2001).

Lisbôa (2004, p. 2) relaciona que países como Holanda e Japão vêm utilizando resíduos na construção civil para melhoria da gestão ambiental e, como uma necessidade eminente de desenvolver outros materiais que possam atuar como agregados e ou aglomerantes. O CAA pode representar, além do aumento na produtividade e melhorias no ambiente construtivo, uma importante contribuição tecnológica sustentável ao concreto (CAVALCANTI, 2006). A utilização de resíduos industriais com o foco de melhorias das propriedades do produto final é visto como uma contribuição significativa e positiva para a tecnologia do concreto sustentável e do meio ambiente (MEHTA, 2002).

Nunes (2009, p. 50), em suas considerações finais, recomenda estudos mais detalhados com a CBC, ao passo de se controlar suas propriedades físicas e químicas para a finalidade desejada, relevando que o uso da CBC na construção civil contribuirá para a preservação ambiental. As contribuições do uso da CBC na construção civil, atualmente possuem especial atenção em vários estudos divulgados no Brasil e no mundo. No Quadro 8 (página 61) estão apresentados alguns destes trabalhos que vêm estudando a caracterização das propriedades da CBC, bem como a apresentação objetiva de resultados de trabalhos que já utilizaram este subproduto para alguma finalidade da construção civil.

De acordo com a CONAB (2012), no Brasil, para a safra de 2011/2012, foram processados 571,471 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, cerca de 52 milhões (8,4%) de toneladas a menos do que a safra 2010/2011, que foi de 623,905 milhões de toneladas. Atualmente, o estado do Paraná ocupa o posto de quarto maior produtor deste vegetal. Na safra 2012/2013 é esperado um crescimento de 4,2% em relação a safra 2011/2012. Este crescimento pode representar uma produção de aproximadamente 43,28 milhões de toneladas de cana-de-açúcar no estado do Paraná (CONAB, 2012). De acordo com as informações extraídas de FIESP/CIESP (2001), de uma maneira geral, para cada tonelada de cana-de-açúcar processada são geradas 0,260 toneladas de bagaço de cana-de-açúcar, de tal forma que 95% deste total é reaproveitado em processos de co-geração de energia nas caldeiras. Logo, para estes 260 kg/t gerados, são produzidos cerca de 6,2 Kg/t de cinzas (CBC). Portanto, para a estimativa de produção da safra 2012/2013, mesmo é esperada somente no estado do Paraná, a geração de 268.000 toneladas de CBC.

Contudo, este trabalho traz uma proposta de desenvolvimento de concreto autoadensável (CAA), com a utilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) no estado cristalino e com beneficiamento de separação na peneira 0,595mm (#30). Almeja-se a utilização deste subproduto como agregado miúdo de menor granulometria na estrutura granular do concreto, contribuindo a formação do esqueleto granular do composto e o controle das propriedades autoadensáveis.

As contribuições do CAA diretamente relacionadas com a construção civil e suas consequentes vantagens para as obras de infraestrutura trazem entre outras melhorias: a redução do custo de aplicação do concreto, a eliminação da etapa de adensamento, a otimização de mão-de-obra com aumento de produtividade e a redução de custo global da estrutura. Ainda pode-se ter: maior rapidez na execução da obra, diminuição do ruído,

economia de energia elétrica, eliminação de vibração e aumento das possibilidades de trabalho com fôrmas de pequenas dimensões, eficiência econômica de aplicação (produtividade elevada), entre outros fatores (LISBÔA *et al.*, 2005; EFNARC, 2002; MELO, 2005; NUNES, 2001; SIMONETTI, 2008).

Com o uso da CBC no CAA, além da exploração e estudo de desenvolvimento da tecnologia do concreto, valoriza-se a utilização de um subproduto agroindustrial gerado em larga escala nos estados produtores de açúcar e etanol, que é o caso do Paraná, em especial na sua região norte/noroeste. Além disso, relevando a proposta central deste trabalho de utilizar a CBC na produção do CAA, busca-se atribuí-la diretamente na substituição de parte da areia natural na composição do traço. Sendo assim, promovida a redução do consumo deste recurso natural finito cuja sua extração produz a degradação da região envolvida.

## 1.2 DELIMITAÇÃO

Este trabalho possui o foco de obtenção de concreto autoadensável com cinza do bagaço de cana-de-açúcar como agregado miúdo em substituição parcial da areia que atenda os parâmetros autoadensáveis da ABNT NBR 15823-1:2010. As taxas estudadas desta substituição em massa são 5%, 10%, 20%, 25%, 30% e 40%. Estudos da resistência a compressão axial e de resistência a compressão diametral (flexão) são realizados aos 28 dias para comprovação básica da resistência a compressão e a tração dos traços obtidos.

## 1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é a obtenção de concreto autoadensável (CAA) com a utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC).

Especificamente, este trabalho pretende contribuir com o desenvolvimento de concreto autoadensável contendo cinza do bagaço de cana-de-açúcar como agregado miúdo em substituição parcial da areia. Avaliando assim, a capacidade de autoadensabilidade, as propriedades mecânicas de compressão e tração e a influência da CBC nos consumos de areia natural e cimento, comparando todos estes resultados aos seus correspondentes obtidos pelo concreto autoadensável sem CBC desenvolvido pela mesma metodologia.

## 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No **Capítulo 1** foi retratada a introdução, a justificativa, os objetivos e a estrutura do trabalho com o propósito destinado para que o leitor compreenda a proposta de estudo da pesquisa.

No **Capítulo 2** estruturou-se a fundamentação teórica dos conceitos relacionados com o tema da pesquisa. Buscou-se agregar informações de trabalhos técnicos sobre concreto autoadensável e metodologias aplicadas para sua geração. Também foi dada ênfase às informações sobre a cinza do bagaço da cana-de-açúcar, desde seu processo de geração e da sua caracterização até alguns trabalhos que versaram sobre este subproduto.

No **Capítulo 3** foi exposta a metodologia aplicada para o desenvolvimento da pesquisa.

No **Capítulo 4** foram apresentados os resultados e as discussões da pesquisa.

No **Capítulo 5** foi realizada a conclusão e algumas recomendações para trabalhos futuros.

Por fim, o **Capítulo 6** apresenta as bibliografias utilizadas para a consolidação do embasamento do trabalho.

# *Capítulo 2*

---

## **REVISÃO TEÓRICA**

Neste capítulo será apresentado o embasamento teórico para a pesquisa. Apresentam-se os conceitos sobre concreto autoadensável (CAA), resguardando valores desde sua motivação de origem, suas características, os materiais estudados e recomendados na sua composição até as metodologias desenvolvidas para sua produção. Também são apresentadas informações sobre o subproduto agroindustrial cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) a ser utilizado nesta pesquisa.

### **2.1 CONCRETO AUTOADENSÁVEL**

#### **2.1.1 Origem e Definição**

A aplicação técnica do concreto e a sua compactação nos elementos estruturais sempre foram motivos de atenção e cuidados especiais nos processos de construção civil. Collepardi (2001, p. 2) informa que estudos de 1975 e 1976, já mostravam pesquisas com desenvolvimento de concretos autonivelantes e não segregantes. Com a crescente utilização do concreto, por volta de 1980, surgiram problemas nos produtos gerados por conta das variáveis dos processos de produção. A falta de homogeneização da etapa de adensamento do concreto e as suas consequentes reduções qualitativas do produto era um dos problemas evidentes a serem enfrentados. No Japão, devido a problemas de abalos sísmicos que exigiam projetos mais complexos e duráveis, iniciaram-se desenvolvimentos e estudos de concretos especiais, que fossem capazes de preencher espaços em fôrmas complexas com alta densidade de aço, de forma simples e eficiente. Também existiam agravantes técnicos gerados por conta do número reduzido de trabalhadores especialistas nesta atividade, bem como a falta de equipamentos sofisticados para o processo de lançamento e adensamento. Almejava-se desta maneira, até mesmo um tipo de concreto, que pela sua consistência, fosse até capaz de dispensar o adensamento (GOMES, 2002; MELO, 2005; NUNES, 2001, REPETTE, 2005).

Com advento de novas evoluções tecnológicas, em especial a tecnologia de aditivos superplastificantes, foi possível a produção de concretos mais fluidos com segregação controlada (MELO, 2005). A preocupação por volta dos anos 80 era eminente quanto à durabilidade e homogeneidade dos concretos executados. Desta maneira, em Tóquio, por volta de 1986, começou o desenvolvimento do concreto autoadensável pela equipe do prof. Okamura. No ano de 1988, na Universidade de Tóquio, esta equipe realizou o primeiro protótipo com o CAA (CAVALCANTI, 2006; OKAMURA e OUCHI, 2003; NUNES, 2001).

A primeira grande obra a utilizar o concreto autoadensável em sua estrutura foi a ponte Akashi-Kaykio, inaugurada em 1998, no Japão, com 1991 metros de vão livre. Ela utilizou em sua ancoragem cerca de 290.000m<sup>3</sup> de concreto autoadensável. O que fortaleceu o uso desta tecnologia naquele projeto, foi a necessidade de uma execução rápida e a dificuldade do adensamento por conta da alta densidade de aço (GEYER e SÁ, 2005).

O concreto autoadensável é uma categoria especial de concreto, capaz de preencher as fôrmas através exclusivamente de seu peso próprio, dispensando energias externas de compactação e vibração (GEYER e SÁ, 2005, VICTOR, 2007). Sob a ação da gravidade é capaz de fluir e preencher completamente a fôrma e ao mesmo tempo alcançar adensamento completo mesmo em regiões com alta presença de aço. Para tal feito, busca-se conseguir concretos fluidos e resistentes à segregação (EFNARC, 2005).

O concreto autoadensável modificou e vem criando o panorama de possibilidades construtivas, estruturas que possuem formas e dimensões complexas podem ser executadas com esta tecnologia (COELHO e MESQUITA, 2010). O concreto autoadensável é o concreto capaz de alcançar três propriedades características e fundamentais: a fluidez para que a mistura escoe entre os aços das armaduras, a coesão do composto e a resistência à segregação (NUNES, 2001; EFNARC, 2002).

Em uma correlação direta, os aditivos superplastificantes buscam proporcionar ao concreto alta fluidez, já para o controle da coesão entra a atuação dos aditivos modificadores de viscosidade combatendo a exsudação e a segregação do concreto (GEYER e SÁ, 2005). Desta maneira, em sua composição, são usados aditivos superplastificantes e/ou modificadores de viscosidade combinados com elementos finos, entre eles, o próprio cimento portland, as adições minerais (vários resíduos em estudo) e/ou areia fina (LISBÔA, 2004; GOMES, 2002; TUTIKIAN, 2004).

As características relacionadas com a manutenção contínua da capacidade de fluxo sem a perda de estabilidade no processo de execução dependem diretamente do equilíbrio entre a alta fluidez, a moderada viscosidade e a devida coesão entre as partículas do concreto fresco (LISBÔA, 2004). Para este autor, o concreto para ser considerado autoadensável deve preencher os espaços das fôrmas pelo seu peso próprio, passar por obstáculos sem bloqueios e evitar ao máximo a segregação. Outro aspecto comentado por PILZ *et al.* (2009, p.2), é o fato que esta categoria de concreto especial exige um controle de materiais mais refinado e com máxima cautela na sua escolha.

### **2.1.2 Vantagens e Desvantagens**

A tecnologia de CAA apresenta algumas vantagens relacionadas diretamente com o processo e outras associadas com o produto em si. Para Lisbôa *et al.* (2005), algumas destas vantagens seriam: redução de custo na aplicação, maior rapidez na execução da obra, diminuição de ruídos, economia de energia elétrica, aumento de possibilidades de trabalho com formas de pequenas dimensões e eliminação da vibração. Neste trabalho, eles ainda relacionam a vantagem de ser um produto ecológico devido a necessidade de uso de materiais finos em sua composição, assim, esta tecnologia interage com a proposta de utilização de resíduos industriais que são nocivos a natureza. Gomes e Barros (2009, p.4), enfatizam a redução no tempo de concretagem, maior produtividade e até mesmo um ambiente de trabalho mais saudável. Repette (2005, p. 1510), ainda informa sobre o combate a falhas internas do concreto.

Junto com estas vantagens relacionadas, ainda destacam-se a redução da necessidade de aplainamento, conseqüente redução da aplicação de acabamento para painéis verticais, pois a aplicação de CAA permite maior lisura e uniformidade de coloração das superfícies (NUNES, 2001). Outro benefício que esta tecnologia proporciona é o aumento de durabilidade devido a redução de defeitos de concretagem (GEYER e SÁ, 2005).

Com relação ao custo, na conclusão de seus experimentos, Tutikian (2004, p. 140) recomenda para obras especiais o uso do CAA. Segundo ele, os custos com relação ao concreto convencional poderão ser equiparados principalmente pelos ganhos operacionais. Mesmo que com esta tecnologia autoadensável, ocorra a elevação dos preços individuais dos materiais, as racionalizações dos processos construtivos aliada ao aumento da produtividade do canteiro de obras justificam o seu emprego (PROSKE e GRAUBNER, 2002).

Por maiores que sejam as vantagens desta tecnologia de concreto, algumas das quais citadas acima, também se têm algumas desvantagens, ou elementos que necessitam de maior desenvolvimento. O produto não é fácil de ser obtido, necessita de mão de obra especializada em sua confecção, acompanhamento integral maior do que o convencional em todas as suas na fases (produção, transporte, lançamento e nivelamento). No caso do transporte, devem-se ter cuidados especiais pelo menor tempo disponível em relação ao concreto convencional bem como, o controle da segregação nesta etapa (LISBÔA, 2004). Estes cuidados em todas as etapas do CAA são necessários, pois as suas propriedades podem sofrer modificações devido a sua alta fluidez e a presença de aditivos na sua composição (ALMEIDA FILHO *et al.*, 2008).

### 2.1.3 Aplicações e Indicações de Uso

O desenvolvimento e a aplicação do CAA foram iniciados no Japão e, posteriormente se espalhou pelo mundo (NUNES, 2001). Lisbôa (2004, p.29) informa que no Japão tiveram-se várias aplicações pioneiras de suma importância técnica para sequência dos desenvolvimentos mundiais, tais como: a ponte Akashi-Kaykio (Figura 1), tanques para gases liquefeitos em Ozaka (Figura 2) e alguns túneis em Yokohama (Figura 3).



**Figura 1 - Vista do bloco de ancoragem e da estrutura da ponte Akashi-Kaykio**

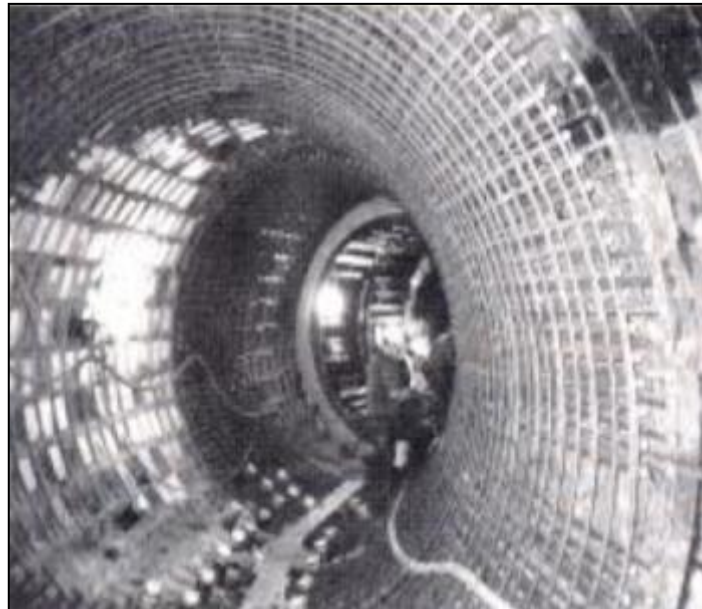
Fonte: (NUNES, 2001).





**Figura 2 - Tanque para gás liquefeito em Osaka**

Fonte: (NUNES, 2001).



**Figura 3 - Túnel com alta densidade de aço em Yokohama**

Fonte: (CAVALCANTI, 2006).

De acordo com os estudos de Tutikian (2004), outros países da Europa como França e Espanha tiveram consideráveis aplicações ainda no século XX. No Brasil, algumas obras no centro-norte, mais especificamente em Goiânia e no sul do país, representam a maior aplicabilidade (GEYER e SÁ, 2005; CAVALCANTI, 2006). As obras que utilizam esta tecnologia de concreto, geralmente respaldam-se de valores relacionados com seus ganhos globais, referentes ao processo e a possibilidade de construção de sofisticados produtos estruturais. Um destaque especial da aplicação do CAA está na confecção de peças pré-fabricadas (CAVALCANTI, 2006; LISBÔA *et al.*, 2005; NUNES, 2001; OKAMURA e OUCHI, 2003; TUTIKIAN, 2004).

Em termos gerais, o CAA pode ser aplicado nos seguintes projetos (CAMARGOS, 2002; NUNES, 2001; OKAMURA e OUCHI, 2003):

- paredes, vigas e colunas especiais,
- lajes de pequenas espessuras ou lajes nervuradas,
- parede diafragma,
- reservatório de água e piscinas,
- locais de difícil acesso,
- peças de pequenas dimensões, com formatos não convencionais,
- fôrmas com grande concentração de ferragem,
- obras com apreciação do concreto aparente,
- fundações executadas por hélice contínua,
- túneis, barragens e estruturas mistas como o uso de fibra de aço.

Para Gomes e Barros (2009, p.4), o CAA pode ser aplicado em obras correntes da engenharia civil, no entanto possuem maiores recomendações para elementos estruturais com alta taxa de armadura, formas complexas e cantos de difícil acesso. Segundo eles, tais aplicações apresentam características que dificultam o processo de vibração. Victor (2007, p.8), no congresso RILEM, realizado em Chicago no ano de 2005, informa que as autoridades, pesquisadores e desenvolvedores de concreto, realçaram o enorme potencial de utilização do CAA e intensificaram os interesses e investimentos nestes desenvolvimentos.

#### **2.1.4 Componentes do CAA**

O concreto autoadensável possui em sua estrutura quatro elementos básicos do concreto convencional: cimento, agregados (gráudo e miúdo), água somados às adições minerais e aditivos químicos (TUTIKIAN, 2004; SIMONETTI, 2008).

Uma característica marcante do CAA, como o apresentado na Figura 4, é a relação de acréscimo de finos na sua composição em comparação ao convencional. Os materiais finos abrangem elementos com diâmetros inferiores a 0,125mm, e podem ser classificados como pozolânicos (cinza, casca arroz, metacaulin e sílica ativa, entre outros) e não pozolânicos (filer calcário, areia de pequena granulometria, entre outros). Entende-se por materiais pozolânicos aqueles materiais que na presença de água, podem reagir com o hidróxido de cálcio, formando compostos secundários com capacidade cimentante (SIMONETTI, 2008).



**Figura 4 - Comparação do uso de finos no CAA versus Convencional**

Fonte: Adaptado de Okamura e Ouchi (2003)

Ainda por Simonetti (2008, p. 31), tem-se a recomendação de utilizar os finos em substituição ao cimento somente quando este apresenta propriedade pozolânica. A ausência desta característica no material fino deve induzir ao uso somente como agregado de granulometria muito fina. De maneira geral, as recomendações da EFNARC (2002), para o uso de materiais para o concreto autoadensável deve seguir a EN 206-1 (especificação, desempenho, produção e conformidade de concreto).

No Quadro 1, Lisbôa (2004) apresenta faixas de composição de CAA extraídas de alguns pesquisadores e faixas para composição de concreto autoadensável de alta resistência (CADAR) recomendada por Gomes (2002).

| Proporções para 1m <sup>3</sup> de CAA        | * CAA       | **CADAR     |
|---|-------------|-------------|
| Volume de pasta (%)                           | 35 – 40     | 38 – 45     |
| Massa de finos (kg/m <sup>3</sup> )           | 400 – 650   | 605 – 735   |
| Cimento (kg/m <sup>3</sup> )                  | 200 – 400   | 430 – 480   |
| Massa de água (kg/m <sup>3</sup> )            | 150 – 180   | 170 – 185   |
| Rel. água/finos (massa)                       | 0,25 – 0,40 | 0,25 – 0,29 |
| Rel. água/(finos+ag.miúdo) (massa)            | 0,12 – 0,14 | 0,11 – 0,14 |
| Volume de agregado graúdo (%)                 | 30 – 35     | 26 – 31     |
| Rel. agregado graúdo/concreto (massa)-(%)     | 32 – 40     | 29 – 35     |
| Massa de agregado graúdo (kg/m <sup>3</sup> ) | 750 – 920   | 695 – 835   |
| Rel. agregado graúdo/agregados (volume)       | 0,44 – 0,64 | 0,47 – 0,50 |
| Tamanho do agregado graúdo (mm)               | 10 – 20     | 12          |
| Rel. agregado miúdo/argamassa (volume)-(%)    | 40 – 50     | 39 – 45     |
| Massa de agregado miúdo (kg/m <sup>3</sup> )  | 710 – 900   | 740 – 790   |

**Quadro 1 - Composições de CAA por alguns pesquisadores**

Fonte: adaptado de (LISBÔA, 2004)

Nota: as indicações foram extraídas na íntegra da fonte original. \* representam as informações de autores como: Domone e Chai (1996) Skarendahl e Peterson, 2000; Saak *et al.*, 2001; Su *et al.* 2001 e a marcação \*\* foram retiradas de Gomes (2002).

#### 2.1.4.1 Cimento

De acordo com Gomes e Barros (2009, p. 51), todos os tipos de cimento Portland podem ser utilizados, repetindo a escolha da classe pela exigência específica de sua aplicação. Para a EFNARC (2002), estes cimentos na sua composição devem ter até 10% de aluminato tricálcico ( $C_3A$ ). Este composto juntamente com o ferroaluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ), são responsáveis pela adsorção do aditivo superplastificante pelas partículas do cimento. Ainda para esta entidade, para que se tenha o controle de retração do concreto, devido ao alto calor gerado, o consumo de cimento deve estar entre  $350\text{kg/m}^3$  e  $450\text{kg/m}^3$  no CAA.

Na composição do CAA tem-se um alto consumo de cimento, que traduz em uma enorme geração de pasta de cimento e redução de consumo de agregado graúdo em relação ao convencional. Desta maneira, dois pontos são levados à tona, a eventual elevação do custo e o alto calor de hidratação. Desta maneira, busca-se substituir parcelas do cimento por fileres e/ou pozolanas (GOMES, 2002).

O efeito filer é a consequência da maior compacidade conferida a mistura pela inclusão de partículas finas e ultrafinas de adições minerais (CORDEIRO, 2006). As pozolanas são materiais inorgânicos, naturais ou até mesmo artificiais, silicosos ou silico-aluminosos, que finamente moídos e na presença de água reagem com o hidróxido de cálcio proporcionando propriedades aglomerantes ao composto (CORDEIRO *et al.*, 2009). Macedo (2009, p. 30) descreve que o hidróxido de cálcio que é liberado na reação química do cimento, reage com a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e ou alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) formando silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), aluminatos de cálcio hidratados (A-C-H) e/ou silicoaluminatos de cálcio hidratados (S-A-C-H).

Para combater o alto calor gerado, têm-se usado muitos cimentos a base de belita, esta categoria de cimento utiliza  $C_2S$  na forma impura tornando-o menos reativo, gerando assim menor temperatura nos processos de cura (GOMES, 2002).

No Brasil, tem-se usado o cimento portland composto, CPII. Ele além de ser facilmente encontrado com baixo custo em comparação a outras categorias, atende as especificações da EFNARC com relação à presença de  $C_3A$  na sua composição, ficando em patamares inferiores a 8% (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

#### 2.1.4.2 Agregados

De uma maneira geral as especificações para agregados são as mesmas exigências para o concreto convencional. Recomendam-se que partículas menores que 0,125mm devem ser consideradas como material fino da mistura (GOMES e BARROS, 2009, p. 52). As composições de CAA possuem elevado volume de pasta (cimento + água) e requerem diminuição do volume de agregados graúdos, bem como reduções das suas dimensões máximas características (CAVALCANTI, 2006). A fim de se garantir uma correta adensabilidade no CAA, deve-se reduzir a quantidade de agregado graúdo em função do aumento do teor de partículas finas. Esta relação entre agregado graúdo e miúdo é um dos principais fatores que influenciam na reologia do concreto (MELO, 2005).

Nos estudos de Okamura e Ouchi (2003), eles expressam a quantidade de agregados miúdos em razão do volume de sólidos na argamassa, que representou o valor de 40%. Já para o agregado graúdo, eles expressam pela razão do volume de sólidos no concreto, cujo valor obtido foi de 50%. Estas representações proporcionais da quantidade de agregados nas suas respectivas condições, segundo estes autores, demonstram o chamado grau de adensamento dos agregados.

Para os agregados graúdos deve-se ter dimensões máximas características entre 16 a 20mm. Para o agregado miúdo, não há restrição quanto ao tipo da areia, uma vez que elas não contenham impurezas e não possuam agentes nocivos. Deve-se ter controle constante da umidade dos agregados (GOMES, 2002; EFNARC 2002). Segundo Gomes (2002), juntamente com o controle da viscosidade da pasta e das argamassas, os agregados são responsáveis pela capacidade de fluir entre os obstáculos, principalmente pelo limite do tamanho máximo do agregado graúdo.

#### 2.1.4.3 Água

De acordo com a ABNT NBR 15823-1:2010, a água para utilização no CAA deve estar de acordo com a ABNT NBR 15900 em especial a parte 1 que define os requisitos. A quantidade de água a ser utilizada no CAA é definida pela relação a/c (água por cimento) (CAVALCANTI, 2006)

A tensão de escoamento do concreto é inversamente proporcional a quantidade de água, assim como, logo, um aumento de água diretamente repercute no aumento da deformabilidade e na diminuição da viscosidade do concreto. No concreto, o aumento da água também reduz a sua resistência mecânica. Logo, para que se garanta a fluidez sem comprometer a resistência do CAA, utilizam-se aditivos superplastificantes em substituição de partes de água no composto (CAVALCANTI, 2006; MELO, 2005).

#### 2.1.4.4 Adições

Tratam-se de materiais finamente moídos de origem mineral. Eles são incorporados ao concreto a fim de se explorar características técnicas previamente estabelecidas. Geralmente não possuem fácil reciclagem e podem ser gerados por vários segmentos industriais, entre elas a própria construção civil e a metalurgia (MELO, 2005; MOOSBERG-BUSTNES, 2003).

Por Melo (2005, p. 36) têm-se duas definições técnicas para classificar as adições:

- *Inertes*: quando são usados com interesses de ação física de compacidade, como exemplos o filler calcário e o pó de quartzo.
- *Reativas*: diretamente proporcionam a formação de hidratos nas reações do cimento. E ainda em uma classificação mais direta subdividem-se em *pozolânicas*, como cinza volante, sílica ativa e matacaulin e como *cimentantes*, exemplo a escória de alto forno. E por fim, alguns resíduos que possuam ações tanto cimentantes como pozolânicas, como a cinza volante com alto teor de cálcio.

Mehta e Monteiro (1994) destacam que tais adições podem ser incorporadas sob duas situações: a primeira em até 30% de substituição do cimento e a segunda em adição aos cimentos compostos. Nas duas situações o efeito sob o concreto é similar.

As adições tanto as inertes como as reativas, podem ser utilizadas no CAA (EFNARC, 2002). Estas adições minerais, que são parcelas que contribuem para a formação do esqueleto granular do concreto, correspondem em parte ao resultado esperado para as propriedades especiais do CAA. Geralmente serão requeridas outras adições que contribuam para características como a fluidez, esta que é geralmente obtida por acréscimos de aditivos químicos superplastificantes (PILZ *et al.*, 2009).

As contribuições das adições são notórias aos aspectos de redução dos contatos entre agregados (fricção), do aumento da viscosidade e de ganhos na resistência a segregação do concreto. A necessidade da presença de finos no esqueleto granular do CAA pode ser empenhada pela presença destas adições minerais que contribuem para a uniformidade das secções ao longo da peça a ser moldada com o concreto. Consegue-se preencher espaços maiores deixados pelos agregados graúdos (ESPING, 2003).

Adições como o filer basalto e o filer calcário já foram estudadas como contribuição à pasta de concreto autoadensável de autodesempenho (CAAD). Neste mesmo estudo, comprovou-se que os elementos como área específica, forma e textura superficial contribuem para a melhoria e controle dos aspectos reológicos da pasta PAAD (PIOVEZAM *et al.*; 2008). O filer calcário mais indicado é o de origem calcítico (REPETTE, 2005; MELO 2005).

Para Cavalcanti (2006, p. 32), são destacados três fatores de contribuição para a utilização de adições minerais: a contribuição para a redução de cimento nos traços, redução do calor de hidratação e diminuição de fissuras internas no concreto e, de uma maneira geral, elas melhoram a microestrutura do concreto.

Com relação aos tamanhos dos finos utilizados nos traços de CAA, podemos extrair informações como: para Gomes (2002), dimensões de até 0,100mm e EFNARC (2002) de até 0,125mm. Cavalcanti (2006, p. 33), atenta para os cuidados em relação a essa definição, pois ela está relacionada a um dos principais parâmetros nas definições dos traços de CAA a relação a/f (água com relação a finos).

#### 2.1.4.4.1 Filer Calcário

Como já realçado nas citações de Melo (2005) e enfatizado por Cavalcanti (2006) o filer calcário caracteriza-se como uma adição mineral predominantemente inerte. Sua utilização na estrutura do concreto se dá pela busca da otimização do empacotamento mecânico dos componentes da estrutura, bem como, pelas suas contribuições desejáveis no estado fresco, atuando principalmente sobre a viscosidade e conseqüente resistência a segregação.

Segundo Dana (1993 *apud* Melo, 2005), o filer calcário é proveniente da rocha calcária e pela sua composição química pode ser classificado como calcítico ou dolomítico. O primeiro é constituído basicamente da calcita que possui predominância de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ).

Para a geração do dolomítico se tem substituição parcial do cálcio presente na calcita por magnésio, formando a dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ). O filer calcário dolomítico pode ser prejudicial à durabilidade das estruturas de concreto em função do risco de ocorrer a reação álcali-carbonato e expansão do composto (NEVILLE, 1997; EFNARC, 2002).

#### 2.1.4.5 Aditivos

As propriedades essenciais ao concreto autoadensável, como a fluidez e a resistência à segregação são conquistadas com o uso de aditivos superplastificantes e modificadores de viscosidade combinado com altos teor de finos, sejam eles cimento, adições minerais e areia muito fina (LISBÔA, 2004; GEYER e SÁ, 2005; PILZ *et al.*, 2009; SIMONETTI, 2008).

Segundo Lisbôa (2004), ainda existem outras categorias de aditivos que podem ser utilizados de acordo com a pretensão proposta, tais como: aditivos incorporadores de ar, para controlar tensões de congelamento e descongelamento dos concretos em regiões de baixa temperatura, aditivos retardadores de pega, entre outros.

##### 2.1.4.5.1 Aditivos Superplastificantes

Em sua definição temática são conhecidos como redutores de água de alta eficiência, capazes de serem 3 vezes mais eficientes que os plastificantes. São tensoativos, de cadeias moleculares longas e um grande número de grupos polares na cadeia do hidrocarboneto (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Para Repette (2005, p. 1512), estes aditivos devem reduzir pelo menos 20% do volume de água.

Mesmo com uma baixa relação a/c (água por cimento), são capazes de manter excelente trabalhabilidade do concreto fresco por um bom período sem alterar as propriedades de pega e endurecimento (RAMACHANDRAN *et al.*, 1998 *apud* MELO, 2005). Da mesma maneira, Cavalcanti (2006, p. 38) afirma que o uso de 1% de superplastificante em relação à massa de cimento podem ser incorporados a abatimentos de até 250mm sem causar exsudação e retardamento de pega. No CAA, o uso do aditivo superplastificante está aliado à busca pelas propriedades de fluidez prolongada e ótima, e na trabalhabilidade do composto no estado fresco (NUNES, 2001; GEYER e SÁ, 2005; CAVALCANTI, 2006; GOMES, 2002).



Por muito tempo, até meados de 1970, o ACI (American Concrete Institute) não recomendava o uso de concretos com resultados de abatimento maiores que 175mm, já que a exsudação aumentava enormemente. Quando se utilizava menos cimento, em virtude da diminuição do decréscimo de finos no composto, o problema se intensificava. Mas com o surgimento dos aditivos superplastificantes este problema se tornou irrelevante, onde são dosados concretos com abatimentos maiores que 250mm com exsudação controlada. Conseguia-se, então, concretos reodinâmicos bem fluidos, coesos e com baixa segregação e exsudação (TUTIKIAN, 2004).

As propriedades mais estimadas no CAA, a fluidez e a resistência à segregação, são possíveis pela combinação de aditivos superplastificantes combinados com altos teores de materiais finos (CAVALCANTI, 2006; TUTIKIAN, 2004). Os aditivos químicos superplastificantes devem atender as exigências da Norma EN 934-2 (aditivos químicos superplastificantes) (CAVALCANTI, 2006; EFNARC, 2002).

Os primeiros aditivos redutores de água (primeira geração) que surgiram no mercado, foram os plastificantes, eram constituídos de dispersantes poliméricos à base de lingnosulfatos capazes de reduzir de 5 a 10% do consumo de água (AÏTCIN, 2000; MELO, 2005).

Segundo Melo (2005, p. 50), os constituídos de segunda geração estão divididos em dois grupos: os polinaftalenos sulfonados, proveniente da naftalina subproduto da indústria petrolífera e as polimelaninas provenientes da melanina. Suas cadeias possuem grupos funcionais mais homogêneos e seus modos de ação ocorrem por repulsão eletrostática.

Os poliacrilatos também designados como poliacrilatos, constituem os chamados aditivos superplastificante de terceira geração. São constituídos por cadeias poliméricas muito longas capazes de promover um efeito formidável na repulsão dos grãos de cimento (CAVALCANTI, 2006; MELO, 2005). O superplastificante mais consumido na produção do CAA, atualmente são os de terceira geração (NUNES, 2001; CAVALCANTI, 2006; GEYER e SÁ, 2005).

#### *2.1.4.5.2 Aditivos Promotores de Viscosidade*

A resistência à segregação, obtida pela utilização de finos, também pode ser proporcionada pelo uso de aditivos promotores de viscosidade (VMA), agindo também na viscosidade do

composto proporcionando homogeneidade e estabilidade na mistura (MELO, 2005; REPETTE, 2005; PILZ *et al.*, 2009). Com o emprego deste tipo de aditivo consegue-se um aliado na redução do risco de separação de materiais heterogêneos durante o transporte, assentamento e início de cura (KHAYAT e GHEZAL, 2003).

Os aditivos promotores de viscosidade são basicamente constituídos de polímeros solúveis em água, onde os mesmos podem ser a base de celulose, acrílico ou glicol, biopolímeros e agentes inorgânicos. (MELO, 2005).

A ocorrência da alteração da viscosidade acontece por duas formas: a adsorção na superfície de partículas finas ou dispersão em água (NUNES, 2001). Os biopolímeros que promovem viscosidade pela dispersão em água são tidos como melhores promotores. O que mais se destaca dentre os biopolímeros é o *Welan Gum* que é um polissacarídeo (MELO, 2005).

Aspectos como melhor microestrutura e homogeneidade do composto, obtenção de um sistema de vazios estável, maior flexibilidade na escolha de materiais e uma gama maior de possibilidade de processo de lançamento, podem ser proporcionados pelo uso dos aditivos promotores de viscosidade (KHAYAT *et al.*, 1999).

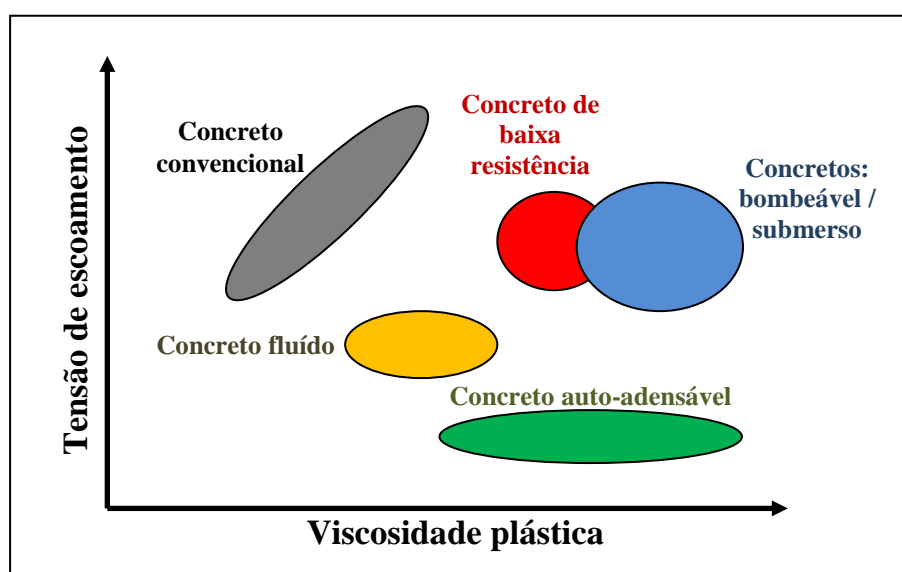
## 2.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL

### 2.2.1 Reologia

A reologia (rheos = fluir, logos = estudo) tem por proposta estudar a deformação do fluxo da matéria, diretamente avaliando a tensão de cisalhamento aplicada e a deformação em determinado período de tempo (GLATTHOR; SCHWEIZER, 1994 *apud* CARDOSO, 2009). Sendo assim, Melo (2009, p. 49) enfatiza que a reologia é a ciência que estuda o fluxo e deformação dos materiais pela existência de uma tensão ou uma força externa.

As propriedades reológicas influenciam dois quesitos básicos do CAA, a tensão de escoamento e a viscosidade plástica (MELO, 2005). A tensão de escoamento é a tensão mínima necessária para que o escoamento se inicie e a viscosidade é dada pela taxa de escoamento em relação à tensão de cisalhamento (CARDOSO, 2009; MELO, 2005).

Como se busca no CAA, o aumento da fluidez deve-se ter uma tensão de escoamento baixa. Para o controle da estabilidade necessária, deve-se ter uma viscosidade moderada. Geralmente os concretos convencionais exigem tensões de escoamento altas e viscosidades baixas (GOMES, 2002). Nunes (2001, p. 3.3) relaciona por meio de um gráfico (Figura 5) várias categorias de concreto nas suas relações de tensão de escoamento (chamada por ele de tensão de cedência) versus a viscosidade plástica.



**Figura 5 - Comportamento reológico de alguns tipos de concretos**

Fonte: adaptado de Nunes (2001)

No Quadro 2, temos a relação de alguns dos componentes de concreto nos efeitos diretamente relacionados com a tensão de escoamento e com a viscosidade plástica.

| Ação   | Efeito na tensão de escoamento | Efeito na viscosidade plástica |
|--|--------------------------------|--------------------------------|
| Aumento no volume da água                          | Redução                        | Redução                        |
| Aumento na quantidade de agregado miúdo            | Aumento                        | Aumento                        |
| Aumento na quantidade de cimento                   | Aumento                        | Aumento                        |
| Aumento na finura do agregado miúdo                | Aumento                        | Aumento / Efeito               |
| Emprego de aditivo plastificante                   | Redução                        | Sem efeito                     |
| Emprego de aditivo incorporador de ar              | Sem efeito                     | Redução                        |
| Substituição de parte de cimento por cinza volante | Redução                        | Redução                        |
| Substituição de parte de cimento por sílica ativa  | Aumento                        | Redução                        |

**Quadro 2 - Efeitos de alguns materiais na reologia**

Fonte: (BANFILL, 1994, *apud* MELO, 2005)

A atuação da tensão de escoamento e a viscosidade podem traduzir no controle da resistência à segregação do concreto. Esta relação é inversamente proporcional, ou seja, tensões altas requerem viscosidades baixas e, viscosidades altas requerem tensões baixas (NIELSON e WALLEVIK, 2003).

Um comportamento característico para os fluidos líquidos, como a água, é dada pela expressão de Newton (Equação 1), que caracteriza tais fluidos como Newtonianos de comportamento linear (CARDOSO, 2009; VICTOR, 2007).

$$\tau = \eta \cdot \gamma' \quad (1)$$

Onde:

$\tau$  = tensão de cisalhamento (Pa),

$\gamma'$  = taxa de cisalhamento ( $s^{-1}$ ),

$\eta$  = viscosidade (Pa.s).

Para concentrações com forte presença de partículas, como nas argamassas, a interação entre estes elementos é uma medida fundamental na sua caracterização. Logo, o comportamento não é mais linear, passando a ser não-linear (CARDOSO, 2009). Quando o fluido possui tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) próximo de 1 (um) dizemos que o mesmo tem comportamento newtoniano (linear) (MELO, 2009).

Cardoso (2009, p. 6) relaciona a existência de pelo menos duas formas reológicas não-lineares de fluxos.

- *Pseudoplásticos*: Com o aumento da taxa de cisalhamento ocorre a diminuição da viscosidade ( $0 < \eta < 1$ ),
- *Dilatante*: Aumento da viscosidade do sistema com o aumento da taxa de cisalhamento, tal feito, característico de suspensões concentradas ( $\eta > 1$ ).

Para explicar o comportamento reológico da pasta de cimento alguns modelos pseudoplásticos são utilizados, como os de Bighan (Equação 2), o de Ostwald de Waale (ou de potência) e o de Hershell-Buckley (MELO, 2005; MELO 2009; VICTOR, 2007).

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \gamma' \quad (2)$$

**Onde:**

$\tau$  = a tensão de cisalhamento (Pa),

$\tau_0$  = a tensão de cisalhamento inicial (Pa),

$\gamma'$  = a taxa de cisalhamento ( $s^{-1}$ ),

$\eta$  = a viscosidade (Pa.s).

A argamassa do concreto deve seguir comportamento de materiais pseudoplásticos para facilitar espalhamento, nivelamento e acabamento, onde se tem elevada viscosidade ou uma considerável tensão de escoamento para se manter estável após as etapas de aplicação (CARDOSO, 2009). As duas constantes reológicas, a tensão de escoamento e a viscosidade, devem ser medidas para caracterizar o comportamento do concreto autoadensável (NUNES, 2001). Alguns testes utilizados para verificar a reologia da pasta serão apresentados no item 2.3 deste trabalho.

A ABNT NBR 15823-1:2010 traz outras definições de termos pertinentes ao estudo das propriedades reológicas do concreto autoadensável:

**Viscosidade plástica aparente** – propriedade do CAA que está relacionada com a coesão e, que influencia diretamente o comportamento do concreto no escoamento.

**Resistência à segregação** – capacidade do concreto permanecer homogêneo durante todas as etapas (transporte, lançamento e acabamento);

**Habilidade de preenchimento; fluidez** – diretamente relacionada com a capacidade de preencher formas e os espaços destinados ao lançamento;

**Habilidade passante** – relacionado com a capacidade do CAA fluir dentro da fôrma, passando pelos obstáculos (embutidos) sem obstrução do fluxo ou segregação;

**Segregação dinâmica** – segregação que pode acontecer dentro da fôrma durante o lançamento;

**Segregação estática** – relacionados aos fenômenos de sedimentação durante o período de cura, quando o concreto já se encontra em repouso.

Para Gomes e Barros (2009, p. 48), a alta deformabilidade e a moderada viscosidade são os parâmetros que condicionam o comportamento reológico do CAA e garantem as principais propriedades a serem atendidas.

## **2.2.2 Propriedades no Estado Fresco**

O CAA em sua essência tem a capacidade de se mover no interior das fôrmas, preenchendo os espaços entre as armaduras, exclusivamente pelo seu peso próprio quando se encontra no estado fresco (NUNES, 2001). Outras características deste concreto também podem ser apreciadas no seu estado fresco, como a capacidade de passagem entre obstáculos sem sofrer interferência do agregado graúdo e sem alterar sua resistência à segregação e/ou exsudação. As características inerentes a fluidez e a capacidade de preencher fôrmas são obtidas no CAA pela alta fluidez e pela alta coesão do composto. Para o controle da habilidade de passagem entre obstáculos são conseguidas pela viscosidade e o uso controlado do diâmetro máximo do agregado (CAVALCANTI, 2006; LIBOA, 2004). Logo, para o equilíbrio de estabilidade e resistência à segregação do CAA são objetivados o controle da viscosidade e o controle da coesão da mistura (GOMES, 2002). Para o estudo e determinação dos aspectos reológicos do CAA são aplicados métodos de ensaios que utilizam equipamentos e processos peculiares desta categoria. Antes de relacionar diretamente alguns destes métodos, será apresentada uma breve revisão da ABNT NBR 15823:2010, que faz menção direta com os parâmetros de classificação, controle e aceitação do CAA no seu estado fresco.

### **2.2.2.1 Norma ABNT NBR 15823 para Concreto Autoadensável**

Desde treze de maio de dois mil e dez, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) validou e disponibilizou a série de normas ABNT NBR 15823:2010 intitulada “Concreto autoadensável”. Esta série foi dividida em seis partes:

Parte 1 – Classificação, controle e aceitação no estado fresco;

Parte 2 – Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – Método do cone de Abrams;

Parte 3 – Determinação da habilidade passante – Método do Anel-J;

Parte 4 – Determinação da habilidade passante – Método da Caixa-L;

Parte 5 – Determinação da viscosidade – Método do Funil-V;

Parte 6 – Determinação da resistência a segregação – Método da coluna de segregação.

A parte 1 (ABNT NBR 15823-1:2010) estabelece os requisitos para classificação, controle e aceitação no seu estado fresco, bem como o estabelecimento dos limites para as classes de auto-adensibilidade e, por fim prescreve os ensaios de verificação do CAA. As recomendações gerais da norma indicam que a mesma pode ser aplicada em concretos com massa específica normal de 2000 kg/m<sup>3</sup> a 2800 kg/m<sup>3</sup> dos grupos I e II da ABNT NBR 8953. Ainda indica a permissão, segundo os seus critérios, para a produção do CAA em obra, em centrais e na indústria de pré-moldados. No Quadro 3 são apresentados as os parâmetros para classificação das propriedades auto-adensáveis no estado fresco.

| Método de ensaio | Propriedade Investigada   | Parâmetros |         |           |                  |
|------------------|---|------------|---------|-----------|------------------|
|                  |   | Classe     | Unidade | Faixa     | Observação       |
| ABNT NBR 15823-2 | Espalhamento ( <i>Slump-flow</i> )                                | SF 1       | mm      | 550 a 650 |                  |
|                  |   | SF 2       |         | 660 a 750 |                  |
|                  |   | SF 3       |         | 760 a 850 |                  |
| ABNT NBR 15823-2 | Viscosidade plástica aparente<br>t <sub>500</sub> sob fluxo livre | VS 1       | s       | ≤ 2       |                  |
|                  |   | VS 2       | s       | > 2       |                  |
| ABNT NBR 15823-3 | Habilidade passante pelo<br>Anel-Japonês                          | PJ 1       | mm      | 0 a 25    | 16 barras de aço |
|                  |   | PJ 2       | mm      | 25 a 50   | 16 barras de aço |
| ABNT NBR 15823-4 | Habilidade passante pela<br>Caixa-L                               | PL 1       | (H2/H1) | ≥ 0,8     | 2 barras de aço  |
|                  |   | PL 2       | (H2/H1) | ≥ 0,8     | 3 barras de aço  |
| ABNT NBR 15823-5 | Viscosidade plástica aparente<br>pelo Funil-V                     | VF 1       | s       | < 9       |                  |
|                  |   | VF 2       | s       | 9 a 25    |                  |
| ABNT NBR 15823-6 | Resistência à segregação pela<br>coluna de segregação             | SR 1       | %       | ≤ 20      |                  |
|                  |   | SR 2       | %       | ≤ 15      |                  |

**Quadro 3 – Divisão da série da ABNT NBR 15823 em função das propriedades no estado fresco**

Fonte: (ABNT NBR 15823-1:2010)

Os parâmetros do concreto autoadensável devem ser cuidadosamente definidos, controlados e justificados com base em dosagens experimentais. Os ensaios referentes ao espalhamento (*SF*), viscosidade plástica aparente ( $t_{500}$ ) e a habilidade passante pelo Anel-J (*PJ*) são requisitos de aceitação do concreto no estado fresco para todas as aplicações conforme critérios definidos pela norma. Os demais ensaios e seus parâmetros podem ter sua comprovação exigida em função da sua aplicação (ABNT NBR 15823-1:2010).

No Quadro 4, de acordo com o Anexo A da ABNT NBR 15823-1:2010, estabelecem-se os parâmetros conforme a aplicação desejada para o concreto autoadensável.



| <b>Tabelas originais da NBR 15823-1 (Anexo A)</b>            | <b>Classe</b> | <b>Faixa</b>   |                                  | <b>Aplicação</b>   | <b>Exemplo</b>  |
|--|---------------|----------------|----------------------------------|--|---|
| Tabela A.1 - Classe de espalhamento do CAA                   | SF 1          | (550 a 650) mm |                                  | Estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura e embutidos, com concretagem no ponto mais alto e deslocamento livre.<br>CAA bombeável.<br>Estruturas que exigem curta distância de espalhamento horizontal.  | Lajes,<br><br>Revestimento de túneis,<br>Estacas e certas fundações profundas.                                |
|  | SF 2          | (660 a 750) mm |                                  | Adequado para a maioria das aplicações correntes.  | Paredes, vigas, pilares e outras.   |
|  | SF 3          | (760 a 850) mm |                                  | Alta densidade de armadura e ou forma arquitetônica complexa com uso de agregado graúdo de pequenas dimensões (menor que 12,5 mm).   | Pilares-parede, paredes-diafragma e pilares.  |
| Tabela A.2 - Classes de viscosidade plástica aparente do CAA | VS 1 / VF1    | $\leq 2$ s     | $< 9$ s                          | Adequado para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos exigindo controle da exsudação. Concretagens realizadas do ponto mais alto com deslocamento livre.  | Lajes, paredes-diafragma, pilares-parede, indústria de pré-moldados e concreto aparente.                      |
|  | VS 2 / VF 2   | $> 2$          | (9 a 25)s                        | Adequado para maioria das aplicações correntes. Apresenta efeito tixotrópico que acarreta menor pressão sobre as fôrmas e melhor resistência à segregação. Efeitos problemáticos podem acontecer com relação à superfície de acabamento (ar aprisionado) no preenchimento de cantos e suscetibilidade à interrupções ou demora entre sucessivas camadas. | Vigas, pilares e outras.  |
| Tabela A.3* - Classes de habilidade passante do CAA          | PJ 1 / PL1    | (25 a 50) mm   | $\geq 0,8$ (H2/H1)<br>2 barras   | Adequada para elementos estruturais com espaçamento de 80 a 100mm.   | Lajes, painéis, elementos de fundação.  |
|  | PJ2 / PL2     | (0 a 25) mm    | $\geq 0,8$ (H2/H1)<br>3 barras   | Adequada para a maioria dos elementos correntes. Elementos estruturais com espaçamento de 60 mm e 80 mm.   | Vigas, pilares, tirantes, indústria de pré-moldados.  |
| Tabela A.4 - Classes de resistência à segregação do CAA      | SR 1          | $\leq 20\%$    | Distância a ser percorrida $< 5$ | Espaçamento entre armaduras $> 80$   | Lajes de pequena espessura. Est. conv. com pouca complexidade.  |
|  | SR 2          | $\leq 15\%$    | Distância a ser percorrida $> 5$ | Espaçamento entre armaduras $> 80$   | Elementos de fundações profundas. Pilares, paredes e elementos estruturais complexos. Elementos pré-moldados. |
|  |               |                | Distância a ser percorrida $< 5$ | Espaçamento entre armaduras $> 80$   |   |

**Quadro 4 - Classificação do CAA em função de sua aplicação**

Fonte: (ABNT NBR 15823-1:2010 – ANEXO A)

### 2.2.2.2 Ensaio para Determinação das Propriedades Auto-Adensáveis no Estado Fresco

Os ensaios prescritos pela ABNT NBR 15823:2010 foram apresentados no capítulo anterior. Este capítulo apresentará a metodologia de execução destes ensaios. Para a definição da capacidade de preenchimento de fôrmas, escoamento e a capacidade de fluxo, utilizam-se o ensaio de espalhamento no cone de Abrams (Slump Flow Test) e o Funil-V (viscosidade plástica aparente); para avaliação da passagem entre armaduras (habilidade passante) e obstáculos, utiliza-se o ensaio da Caixa-L e o espalhamento no cone de Abrams com Anel-Japonês (*J*) e, para a medição da resistência à segregação do composto, utiliza-se o teste do Tubo-U (GOMES, 2002; CAVALCANTI, 2006; EFNARC, 2002; ABNT NBR 15823:2010). Ressalta-se neste momento que, os ensaios apresentados na sequência, representam apenas uma parcela dos mecanismos e métodos existentes. Para um aprofundamento sobre os procedimentos e métodos disponíveis e que vêm sendo utilizados, recomenda-se a leitura na íntegra dos trabalhos da referência deste, em destaque (GOMES, 2002; GOMES e BARROS, 2009; NUNES, 2001; OKAMURA, 1997; EFNARC, 2002; KUMAR, 2006; ABNT NBR 15823:2010 e outros).

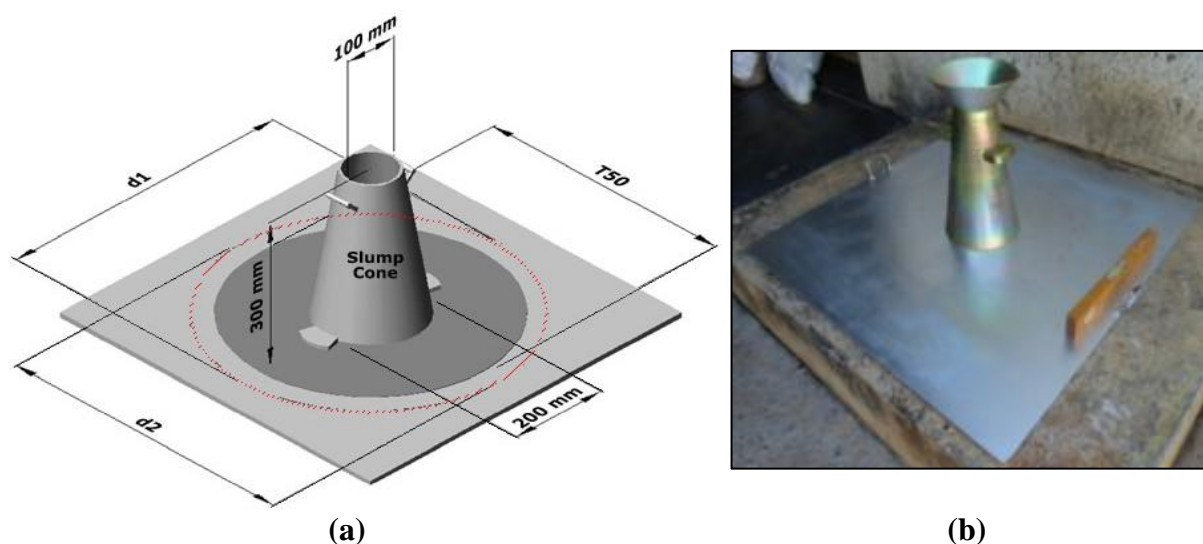
#### 2.2.2.2.1 Ensaio de espalhamento (*Slump Flow Test*)

Mede-se com este ensaio a fluidez do concreto e a sua respectiva capacidade de escoamento, em fluxo livre, sobre ação do seu próprio peso (ABNT NBR 15823-2:2010). Também é possível avaliar de forma visual a exsudação e a segregação (TUTIKIAN, 2004). Este ensaio foi descrito baseado na ABNT NBR 15823-2:2010 e nas informações de Gomes (2002).

**Recursos:** 1 fôrma tronco-cônica (dimensões na Figura 6), 1 funil direcionador, 1 placa metálica plana de pelo menos (#1,5x900x900)mm, 1 cronometro (precisão de 0,1s), 1 régua ou trena milimetrada, 1 concha metálica de enchimento, 1 nível de superfície e 2 pessoas.

**Procedimento:** Com a fôrma tronco-cônica posicionada sobre a placa metálica plana e nivelada, coloca-se o concreto sem compactar a mistura. Nesta etapa, a fôrma e a placa já devem estar umedecidas. Estima-se uma amostra com no mínimo 6 litros de concreto que devem ser colocados de forma contínua. Uma das pessoas aplicará uma força no cone para baixo, para mantê-lo posicionado durante o enchimento e posterior coordenação para o movimento de subida durante o teste. Este movimento deve ser lento e padronizado, inferior a 5 segundos. Então, levanta-se o cone e deixa-se o concreto espalhar sobre a superfície plana

(Figura 6). Toma-se a média de duas medidas do concreto espalhado, após a estabilidade de espalhamento, para se obter a medida do ensaio. Estas medidas são perpendiculares entre si. O tempo para o concreto alcançar o diâmetro de espalhamento de 500 mm também é medido, o chamado  $t_{500}$  (CAVALCANTI, 2006).



**Figura 6 - Ilustrações do aparato para o ensaio de espalhamento do cone de Abrams**

Fonte: Adaptado de Cavalcanti (2006).

Nota: (a) Esquema básico do cone e da placa. (b) Imagem do aparato utilizado.

O tempo ( $t_{500}$ ) deve estar na faixa de 2 a 5 segundos. O espalhamento livre máximo deve estar na faixa de 650 a 800 mm (EFNARC, 2002). Já para Lisbôa *et al.* (2005, p. 3), o tempo  $t_{500}$  também deve ser alcançado entre 2 a 5 segundos e, para o espalhamento máximo espera-se que o concreto fique na faixa de 600 a 800mm. Para Gomes (2002), a faixa de espalhamento deve situar-se entre 600 a 750 mm e o tempo deve acontecer entre 3 a 7 segundos. Segundo a ABNT NBR 15823-1:2010, para o espalhamento existem três faixas admissíveis, a depender da aplicação: *SF 1*, *SF 2* e *SF 3*, com intervalo entre 550mm e 850mm. Já para o  $t_{500}$ , são duas as possibilidades a depender da aplicação, *VS 1* ( $t_{500} \leq 2s$ ) e *VS 2* ( $t_{500} > 2s$ ), os valores e aplicações podem ser consultados nos Quadros 3 e 4.

#### 2.2.2.2.2 Ensaio do Anel-J (J-Ring test)

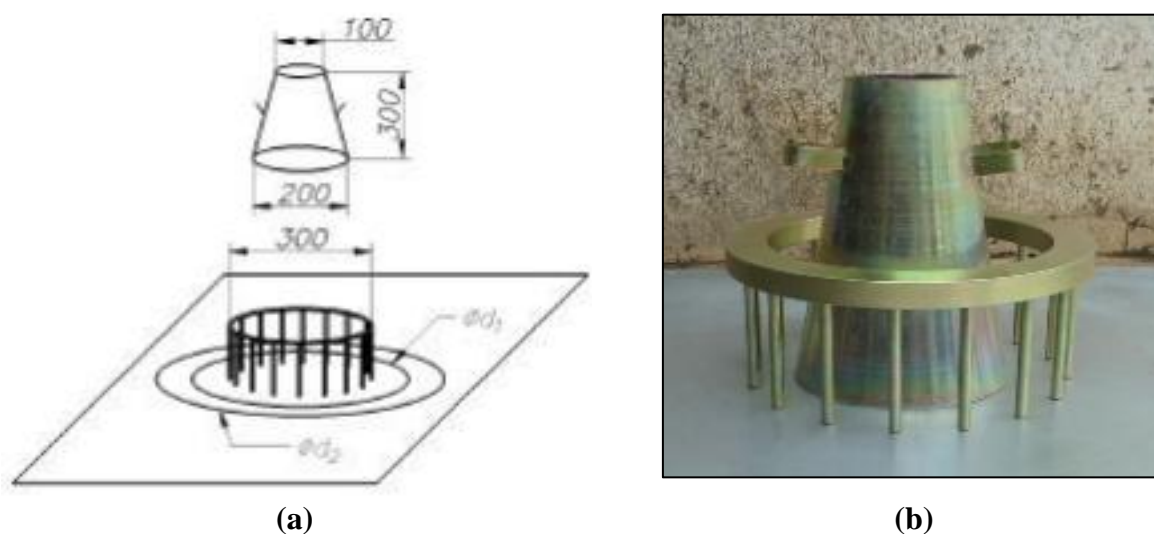
Este ensaio geralmente é utilizado como complemento das experimentações do Cone de Abrams, do Funil-V e outros. Sua proposta busca avaliar a capacidade de resistência ao bloqueio e a fluidez avaliando assim a sua habilidade passante (ABNT NBR 15823-3:2010).

O método descrito foi baseado na proposta de Gomes e Barros (2009) com respaldo nas informações da ABNT NBR 15823-3:2010.

**Recursos:** 1 slump cone, 1 Anel-Japonês (Figura 7), 1 placa metálica plana de pelo menos 900x900mm, 1 cronometro, 1 paquímetro, 1 concha metálica de enchimento, 1 nível de superfície e 2 pessoas. O anel possui diâmetro de 30cm com 16 barras de aço (diâmetro  $10\pm 3$ )cm perpendiculares ao anel com 10cm de comprimento fixadas em uma das faces do contorno.

**Procedimento:** Posiciona-se o anel em volta do slump cone, coloca-se o concreto sem compactar a mistura. A placa deve estar nivelada e umedecida. Estima-se uma amostra com no mínimo 6 litros de concreto. Uma das pessoas aplicará uma força vertical para baixo para manter o cone posicionado durante o enchimento e após, coordenará o movimento de subida durante o teste. Este movimento deve ser suave e padronizado conforme slump flow test. Então, levanta-se o cone e deixa-se o concreto se espalhar sobre a superfície plana e por entre as armaduras do Anel-Japonês. Após a submissão do escoamento do concreto no slump cone, avalia-se a diferença de altura entre a mistura que permaneceu no anel e a mistura que se espalhou para fora da região circular. As medidas externas de altura perpendicular a placa devem ser realizadas 4 vezes para obtenção da sua média aritmética. A medida vertical da altura interna do concreto é realizada no centro da placa (anel). O *blocking step* ( $BS_j$ ) deste ensaio é o resultado da subtração da média das alturas verticais externas pela medida interna central.

Neste ensaio, de acordo com Gomes e Barros (2009, p.34), também se medem os dois diâmetros perpendiculares entre si do espalhamento máximo do concreto. Outra medida para comparação é o  $T_{50j}$  que representa o tempo que o concreto leva para alcançar a marca de espalhamento no 50cm, similar o  $T_{500}$  ensaio de espalhamento.



**Figura 7 - Ilustrações do Anel-Japonês**

Fonte: Adaptado da EFNARC (2002)

Nota: (a) Esquema básico do cone, do anel e da placa. (b) Imagem do aparato utilizado.

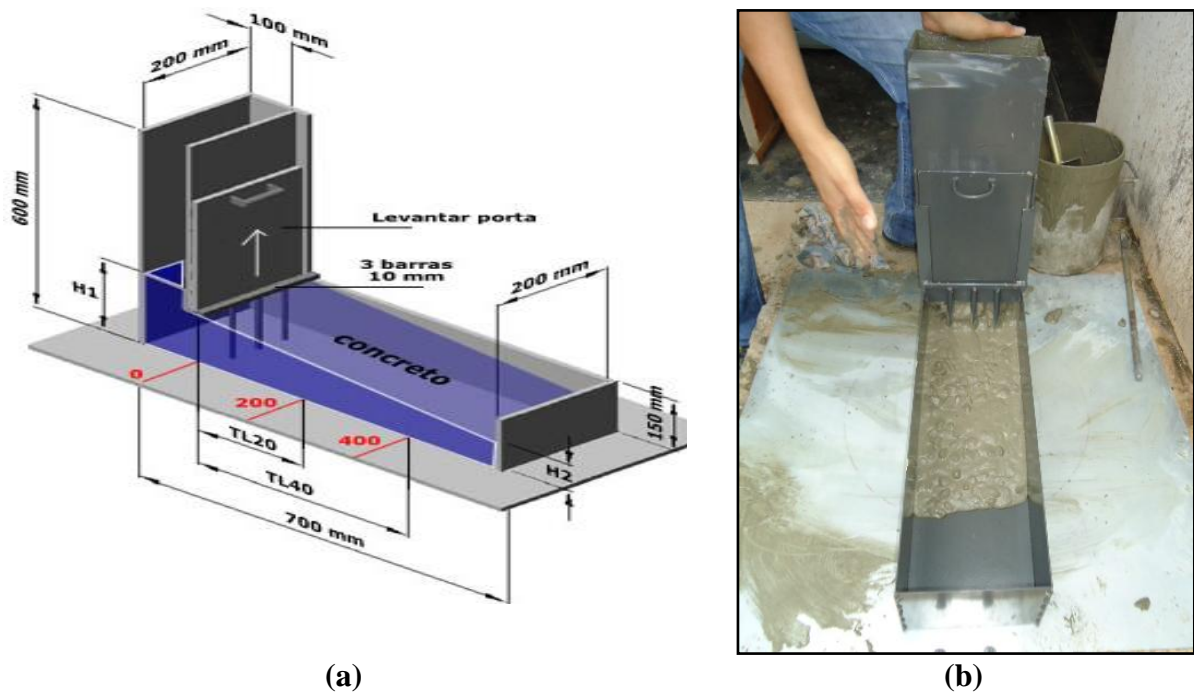
Esta diferença de altura ( $BS_j$ ) não deve ser maior que 10mm (GOMES e BARROS, 2009). Utilizam-se também avaliações visuais para observação do ensaio sobre os aspectos de segregação (MELO, 2005; CAVALCANTI, 2006; TUTIKIAN, 2004). Para a ABNT NBR 15823-3:2010, o espalhamento final ( $d_f$ ) definido pela média aritmética das duas medidas servirá de parâmetro para comparação com espalhamento obtido no método do cone de Abrams. Ou seja, a média do espalhamento máximo pelo *Slump Flow Test* menos a média do espalhamento máximo pelo método do Anel-J. Segundo a ABNT NBR 15823-1:2010, existem duas faixas admissíveis: *PJ 1*, *PJ 2*, cujos valores podem ser consultados no Quadro 3.

#### 2.2.2.2.3 Ensaio da Caixa-L (*L-Box test*)

Este procedimento avalia a capacidade do CAA escoar e resistir ao bloqueio entre as armaduras e as laterais com a armadura (habilidade passante) (ABNT NBR 15823-4:2010; REPETTE, 2005). O método descrito foi baseado na proposta de Gomes (2002) com respaldo nas informações da ABNT NBR 15823-3:2010..

**Recursos:** 1 Caixa-L de aço (Figura 8), 1 cronômetro, 1 concha metálica de enchimento, 1 nível de superfície e 2 pessoas.

**Procedimento:** Nivelar-se o aparato sobre uma superfície firme e umedece-se o seu interior. Como mostra na Figura 8, este aparato é constituído de dois blocos. No bloco vertical despeja-se cerca de 12 litros de concreto, com a comporta fechada. Após, abre-se a comporta e regista-se o tempo que o concreto leva para percorrer 20 cm ( $T_{L20}$ ) e o tempo para atingir 40 cm ( $T_{L40}$ ) no bloco horizontal do aparato. Os parâmetros da altura do concreto ( $H_1$  e  $H_2$ ) no bloco horizontal são medidas após o escoamento completo do concreto.



**Figura 8 - Ilustrações do aparato para o ensaio de passagem da Caixa-L**

Fonte: Adaptado de Cavalcanti (2006)

Nota: (a) Esquema básico da Caixa-L. (b) Imagem do aparato utilizado.

A relação entre  $H_2/H_1$  deve estar na faixa de 0,8 a 1,0 (EFNARC, 2002). Para Lisbôa *et al.* (2005, p. 3), esta relação deve ser  $\geq 0,8$ . Estes autores ainda recomendam os tempos esperados para que a mistura flua até 20cm de  $\leq 2$  segundos ( $T_{L20}$ ) e para que flua até 40 cm, este tempo deve ser  $\leq 4$  segundos ( $T_{L40}$ ). Já a série ABNT NBR 15823-1:2010 faz menção somente a duas possíveis informações da diferença de altura  $H_2/H_1$ , sendo PL 1 e PL 2 as faixas admissíveis. Seus valores podem ser consultados no Quadro 3.

#### 2.2.2.2.4 Ensaio do Funil-V (V-Funnel test)

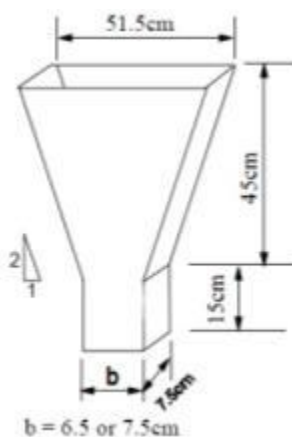
Este ensaio consiste em mensurar o tempo que uma amostra de aproximadamente 10 litros de concreto leva para fluir completamente pelo orifício inferior do aparato (ABNT NBR 15823-

5). O método descrito aqui é uma junção da proposta de Gomes (2002) com a ABNT NBR 15823-5:2010.

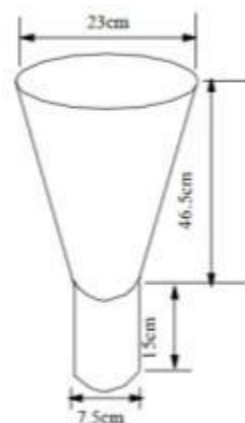
**Recursos:** 1 Funil-V de aço (Figura 9.b), 1 estrutura de sustentação, 1 cronômetro (precisão 0,1s), 1 concha metálica de enchimento, 1 nível de superfície, 1 recipiente para receber o concreto durante o teste de pelo menos 11 litros e 2 pessoas.

**Procedimento:** Com o funil nivelado, umedecido internamente com água e seu orifício inferior fechado, lança-se o concreto de forma contínua até o limite de sua borda superior. Necessita-se de cerca de 12 litros de concreto. Em um tempo inferior a 30 segundos ( $T_{30seg}$ ), abre-se a comporta de fechamento e mede-se o tempo para o escoamento total da mistura. A norma recomenda uma medida complementar do mesmo processo após 5 min de preenchimento do funil ( $T_{5min}$ ). Releva-se que no adensamento não deve ser incorporada nenhuma força externa de adensamento ou compactação.

O orifício do funil deve ter dimensão mínima pelo menos 3 vezes maior que o tamanho do agregado graúdo. Esta dimensão para ensaios de CAA deve estar entre 65 a 75mm (CAVALCANTI, 2006). Na Figura 9, visualiza-se o esquema do aparato.



(a)



(b)



**Figura 9 - Esquemas do aparato recomendado para o ensaio do Funil-V**

Fonte: Adaptado de Gomes (2002)

Nota: (a) Esquema básico do Funil-V. (b) Imagem do aparato utilizado.

Para este ensaio o tempo projetado para que a medida de concreto flua completamente pelo aparato está na faixa de 6 a 12 segundos (EFNARC, 2002). Para Lisboa *et al.* (2005, p. 3),



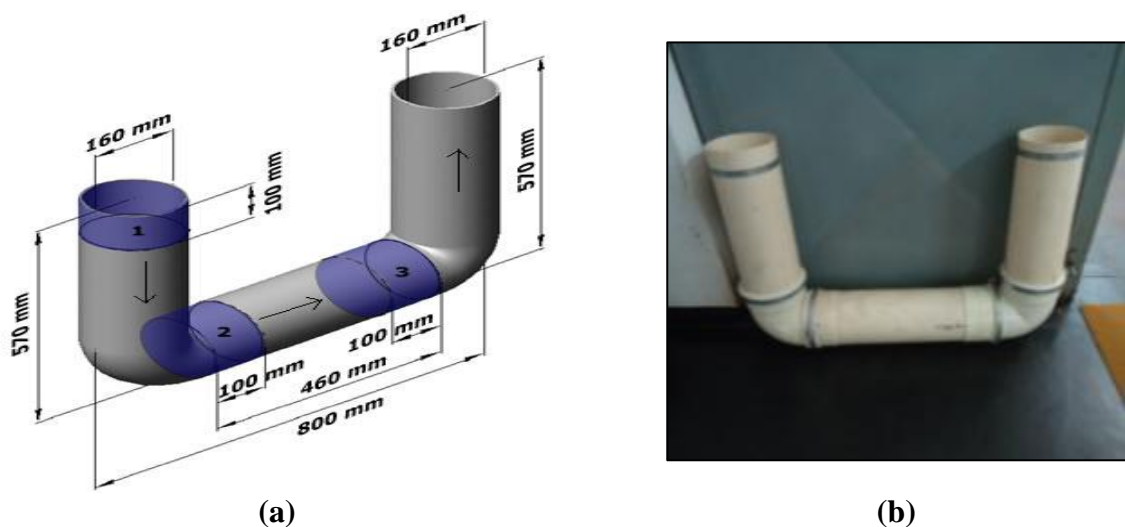
esta faixa admissível pode ser de 6 a 13 segundos. Gomes (2002) indica para este controle o tempo de 7 a 13 segundos. Segundo a ABNT NBR 15823-1:2010, existem duas faixas admissíveis, a depender da aplicação: *VS 1* (<9s) e *VS 2* (entre 9 e 25s), cujos valores e aplicações podem ser consultados nos Quadro 3 e 4.

#### 2.2.2.2.5 Ensaio do Tubo-U (U-Pipe Test)

Desenvolvido por Gomes (2002), serve para estudar a segregação de um concreto autoadensável.

**Recursos:** 1 tubo “U” de PVC (Figura 10), 1 espátula com lâmina maior que 160mm, 1 cronômetro, 1 trena, 1 concha metálica de enchimento, peneira de abertura 5 mm, balança e 2 pessoas.

**Procedimento:** com o tubo em pé (posição da Figura 10) lança-se o concreto por um dos orifícios sem utilizar de compactação ou qualquer outra forma de energia. O tubo em questão é cortado longitudinalmente por toda a sua extensão. Para que o mesmo seja mantido fechado e sem vazamentos são utilizadas presilhas metálicas com parafuso e fita adesiva ao longo do corte. Mantendo o tubo sempre na posição inicial, espera-se por cerca de três horas para abri-lo (verificar estado semi-endurecido) e retirar as três amostras (Figura 10a). Estas 3 amostras devem ter espessura de 10 cm e são lavadas na peneira de 5 mm para remover a argamassa com água corrente. Confere-se a massa presente na peneira da brita retida em cada uma das amostras.



**Figura 10 - Ilustrações do aparato para o ensaio de resistência à segregação Tubo-U**

Fonte: Adaptado de Cavalcanti (2006)

Nota: (a) Esquema básico da Caixa-L. (b) Imagem do aparato utilizado.



O parâmetro para determinar a resistência à segregação (R.S) é baseado na relação do material da amostra 1 (faixa 1) com base no material retido nas faixas 2 e 3 conforme a Equação 3. Valores de R.S  $\geq 0,9$  são tidos como satisfatórios (LISBÔA *et al.*, 2005 e GOMES, 2002). Gomes e Barros (2009, p.41) ainda propõem a medição de uma quarta faixa, que fica oposta a faixa 1 no outro canto superior.

$$RS = \left( \frac{P_1}{P_2}, \frac{P_1}{P_3}, \frac{P_1}{P_4} \right) \quad (3)$$

Onde:

RS= Resistência à segregação,

P<sub>1</sub>= massa do agregado na fatia 1 em kg,

P<sub>2</sub>= massa do agregado na fatia 2 em kg,

P<sub>3</sub>= massa do agregado na fatia 3 em kg,

P<sub>4</sub>= massa do agregado na fatia 4 em kg, oposta a ponta de lançamento.

### 2.2.3 Propriedades no Estado Endurecido

O concreto autoadensável é fortemente conhecido pelo controle de suas propriedades no estado fresco e consequentes contribuições ao processo de confecção de peças de concreto. De acordo com KLUG *et al.* (2003, *apud* CAVALCANTI, 2006 p. 57), são pelo menos quatro as razões na mudança das propriedades do CAA em relação ao CC (concreto convencional): as modificações na composição da mistura, as modificações na microestrutura do concreto, as modificações no procedimento de moldagem e também a transferência de cargas para a matriz de cimento. Na sequência, algumas das principais propriedades investigadas para o CAA no estado endurecido.

#### 2.2.3.1 Aderência do Concreto

Segundo Tokudome (2006, p. 25), uma das principais características do CAA a ser investigada no seu estado fresco é a capacidade de aderência do concreto com a armadura. A ausência da vibração do concreto reduz drasticamente a exsudação e a segregação do concreto, assim contribuem para um melhor desempenho da aderência do CAA em relação direta com o concreto convencional (EFNARC, 2005).

Segundo Barbosa *et al.* (2004, p. 485), a aderência do concreto é a ligação existente entre o aço e o concreto, que faz com que o deslizamento entre eles não ocorra. Desta maneira, a deformação acontece em conjunto transferindo os esforços de um para o outro. Esta relação tem uma ligação dependente na capacidade de carga a ser suportada na estrutura de concreto

armado. Neste mesmo trabalho, estes autores seguiram o ensaio recomendado pela ABNT NBR 7477:1982 para a Determinação do Coeficiente de Conformação Superficial das Barras de aço e o CAA apresentou tensão média de aderência superior ao concreto convencional. Segundo os autores, isso aconteceu pelo fato da resistência à compressão e à tração terem sido maiores que a do concreto convencional estudado.

#### 2.2.3.2 Resistência à Compressão

Algumas das informações de Klug *et al.* (2003 *apud* CAVALCANTI, 2006, p.60) trazem considerações a respeito da resistência à compressão do concreto: ainda não se têm parâmetros para uma comparação exata entre o CAA e o concreto convencional; dada uma mesma relação a/c para um concreto convencional e um CAA, o último apresentará melhor desempenho na resistência à compressão; a diferença dos resultados são significantes, onde o CAA apresenta melhor desempenho. Tutikian (2004, p. 9) diz ser possível determinar faixas de resistência à compressão e dimensionar traços de CAA com custos próximos e até mesmo inferiores ao concreto convencional. Nos trabalhos de Felekoglu (2003) e Cavalcanti (2006), a resistência à compressão dos corpos de provas foram maiores para o CAA comparando com o concreto convencional.

Segundo Coutinho *et al.*, (2011) baseando-se em afirmação de vários autores, em uma comparação direta com o concreto vibrado para paredes de 1,4m a 3,0m o CAA apresenta menor variação da diferença de resistência à compressão ao longo destes elementos pela sua característica de homogeneidade. Porém eles ainda realçam que tanto para o CAA como para o vibrado, a diferença de resistência da base para o topo das peças estruturais dependerá da composição destes concretos. Na geração do CAA deve-se atentar para uma quantidade mínima de pasta e sua relação direta com o preenchimento granular do esqueleto. Esta condição deve preservar as condições e características do concreto no estado fresco e a garantia da resistência à compressão dimensionada (LISBÔA, 2004).

Alguns estudiosos de CAA, como Okamura e Ouchi defendem técnicas e métodos que na sua dosagem não se deve ter uma faixa da resistência à compressão como premissa. Argumentam pelo fato que as relações água/aglomerante são geralmente pequenas para garantia de bons resultados de resistência à compressão, a menos que as adições empregadas não sejam reativas. A dosagem desta categoria de concreto deve estar principalmente focada no

atendimento dos requisitos inerentes às suas condições no estado fresco, tais como, a trabalhabilidade e a resistência à segregação (OKAMURA e OUCHI, 1999).

#### 2.2.3.3 Resistência à Tração

A microestrutura da matriz de cimento na zona de transição dos agregados com o cimento são condições fundamentais na resistência de tração do concreto (CAVALCANTI, 2006). Nos estudos de Gomes (2002), com CAA de alta resistência, a resistência à tração ficou entre 7 e 10% da resistência à compressão. Nos estudos de Tutikian (2004, p. 117), com sua argumentação ele informa que a resistência à tração e à compressão do CAA é próxima do concreto convencional, onde pelos experimentos daquele trabalho tiram-se informações que a resistência à tração é influenciada da mesma forma que a resistência à compressão para os CAA.

#### 2.2.3.4 Módulo de Elasticidade

Cavalcanti (2006, p. 65) argumenta que embora tenha a redução da quantidade de agregados graúdos e o aumento do volume da pasta, não ocorrem significantes alterações nas propriedades de módulo de elasticidade do CAA em relação ao concreto convencional. No trabalho de Gomes (2002), ele alega que até faixas de resistência à compressão de 68MPa, o módulo de elasticidade se mostra em patamares próximos ao concreto convencional.

## 2.3 MÉTODOS DE DOSAGEM DO CAA

Os métodos de dosagem de CAA embora sejam diferentes dos métodos para os concretos convencionais, no geral também são empíricos. Eles buscam por intermédio de princípios incomuns, o atendimento da habilidade de fluir facilmente nas fôrmas com a estabilidade das misturas para uma garantia da ausência de segregação do concreto. Logo, a busca pela alta deformabilidade e a moderada viscosidade são parâmetros que diretamente afetam o comportamento reológico e são responsáveis pela garantia das principais propriedades autoadensáveis. Neste raciocínio, alguns estudos do CAA a respeito do seu comportamento reológico, têm possibilitado aplicações técnicas mais racionais e precisas (GOMES e BARROS, 2009).

O método de Gomes (2002) defendido na obra de Gomes e Barros (2009, p. 143) como método de Gomes *et al.* (2002;2003), direcionará a fundamentação proposta neste trabalho. Na metodologia de Gomes (2002), são aplicados ensaios e procedimentos intermediários de caráter experimentais para a dosagem de concreto autoadensável de alta resistência. Embora não objetiva-se neste trabalho o desenvolvimento da alta resistência para o CAA, busca-se extrair da metodologia de Gomes (2002), a excelente contribuição que o método traz para o entendimento e posterior geração de uma proposta baseada em uma sequência lógica definida por fases experimentais e que podem ser estendidas a outras categorias de CAA. Trata-se de um método que exige pouco investimento financeiro comparado com experimentações que estudam diretamente o concreto em sua forma final, pois é possível realizar experimentações intermediárias em menores escalas quantitativas de materiais e recursos. No entanto, em contrapartida da redução da escala destes investimentos gera-se o aumento da quantidade de experimentações em consequência dos ensaios presentes em todas as fases do método. Outro ponto interessante deste método é a possibilidade da investigação da propriedade ótima da pasta e/ou argamassa independente e simultânea à execução de outras investigações. Desta forma, de maneira objetiva, gera-se a proposta metodológica deste trabalho baseada na construção de fases experimentais que compreendem: o estudo da pasta e da argamassa, o estudo do esqueleto granular e o estudo da combinação técnica destas informações para geração final do CAA sem a CBC e do CAA-CBC.

Para Cavalcanti (2006, p.40), além dos aspectos principais relacionados com a fluidez do concreto, outro ponto fundamental no desenvolvimento dos traços é a capacidade deste concreto passar entre obstáculos sem ocorrer bloqueio e resistência à segregação.

O concreto autoadensável, assim como os concretos de outras categorias, deve seguir princípios técnicos, tais como: a especificação técnica do projeto, os materiais existentes e disponíveis na região de sua aplicação, condições às quais ficarão expostas as estruturas e técnicas de execução, a combinação de materiais com o intuito de obter a melhor razão econômica, resistência e durabilidade (HELENE e TERZIAN, 1992; NEVILLE, 1997).

Lisbôa (2004, p.1 e 2) enfatiza que o desenvolvimento no Japão, na Universidade de Tokyo, em 1986, foi o marco inicial. Desde então, muitas pesquisas no mundo objetivam desenvolver técnicas e métodos de obtenção do CAA. Alguns pesquisadores desenvolvem aparatos (alguns deles apresentados no tópico 2.2.2) e mecanismos para que sejam possíveis medições das suas propriedades principalmente no seu estado fresco.

Da década de 1990 para os dias atuais, muitos métodos foram propostos e criados, dentre eles: Okamura (1995), Ouchi *et al.* (1996), Sedran *et al.* (1996), Petersson e Bilberg (CBI), Saak *et al.* (2001), Nan Su (2001), EFNARC (2002), Maquardt *et al.* (2002), Gomes (2002) e Tutikian (2004). (LISBÔA, 2004; MELO, 2005; NUNES, 2001; SIMONETTI, 2008; TOKUDOME, 2006).

Na sequência, serão apresentados de forma sucinta: o método de Okamura (1997), o método da EFNARC (2002), o método de Gomes (2002) e o método de Tutikian (2004) que representam uma pequena parcela dos métodos já desenvolvidos para obtenção do CAA. Recomenda-se a obra de Gomes e Barros (2009) para informações de outros métodos nacionais e internacionais sobre o CAA.

### **2.3.1 Método de Okamura**

Este método contou com as informações e evoluções das recomendações técnicas das premissas dos primeiros desenvolvimentos de 1986, do professor Hajime Okamura da Universidade de Tokyo, no Japão. Na ocasião, buscava-se de forma direta combater a baixa durabilidade das estruturas japonesas e a escassez de mão de obra qualificada no canteiro de produção (OKAMURA e OUCHI, 2003; CAVALCANTI, 2006).

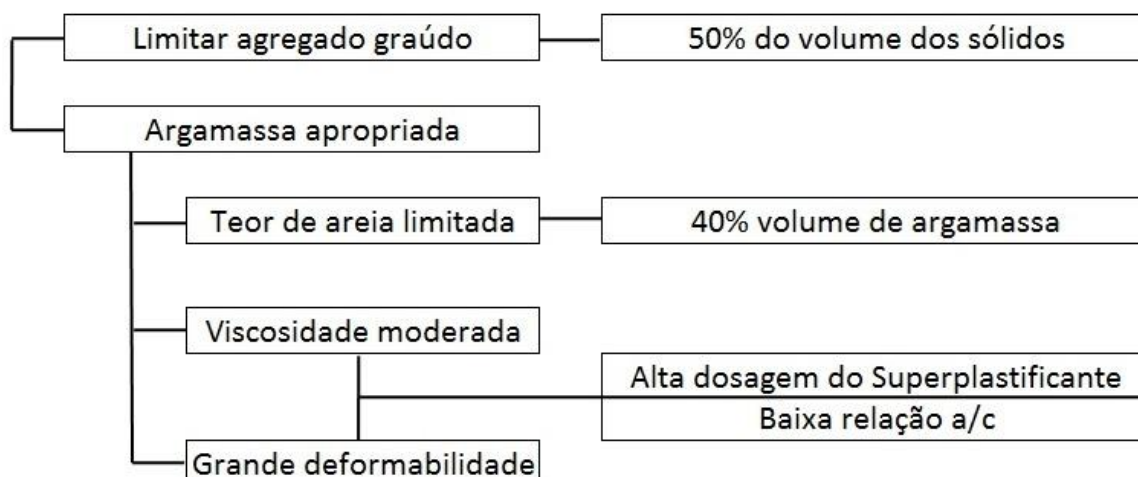
Este método tem por partida o propósito que a única fonte de fornecimento de finos para o concreto é o cimento portland de baixo calor de hidratação, assegurando que a qualidade no estado endurecido é diretamente proporcionada pela qualidade em seu estado fresco (NUNES,

2001). No início do desenvolvimento do traço, ele parte de valores pré-fixados de alguns dos materiais para que sejam alcançadas as propriedades de auto-adensibilidade (GOMES, 2002).

Okamura e Ouchi (2003, p. 6) informam que para um concreto cumprir suas características de auto-adensibilidade dentro da proposta do método, ele deve basear-se em três parâmetros na sua composição:

1. Limitada quantidade de agregados;
2. Baixa relação água/cimento (a/c);
3. Altas dosagens de aditivos superplastificantes.

Na Figura 11, mostra-se uma representação simplificada do método.



**Figura 11 - Esquema simplificado do método de dosagem de Okamura**

Fonte: (OKAMURA e OUCHI, 2003)

Como principais observações destacam-se a quantidade de agregado graúdo limitado a 50% do volume total de concreto e quantidade de agregado miúdo limitada a 40 % do volume total da argamassa. Desta forma, presenciam-se algumas etapas no direcionamento de aplicação do método (CAVALCANTI, 2006):

1. *Determinação do volume de ar incorporado no concreto ( $V_{ar}$ ):* a faixa recomendada do método indica de 4 a 7% de ar incorporado.
2. *Determinação do volume do agregado graúdo ( $V_g$ ):* indica a fixação de 50 % do volume total de agregados no estado compactado.

3. *Determinação do volume de agregado miúdo ( $V_a$ ):* sendo 40% do volume da argamassa.
4. *Determinação da razão água/finos ( $a/f$ ), água/cimento ( $a/c$ ) e do teor de superplastificante (2.3.1.1).*

Esta lógica proposta pelo método de Okamura foi representada de forma esquematizada por Nunes (2001) na sua tese (Figura 12).



**Figura 12 - Esquema simplificado do método de dosagem de Okamura**

Fonte: (NUNES, 2001)

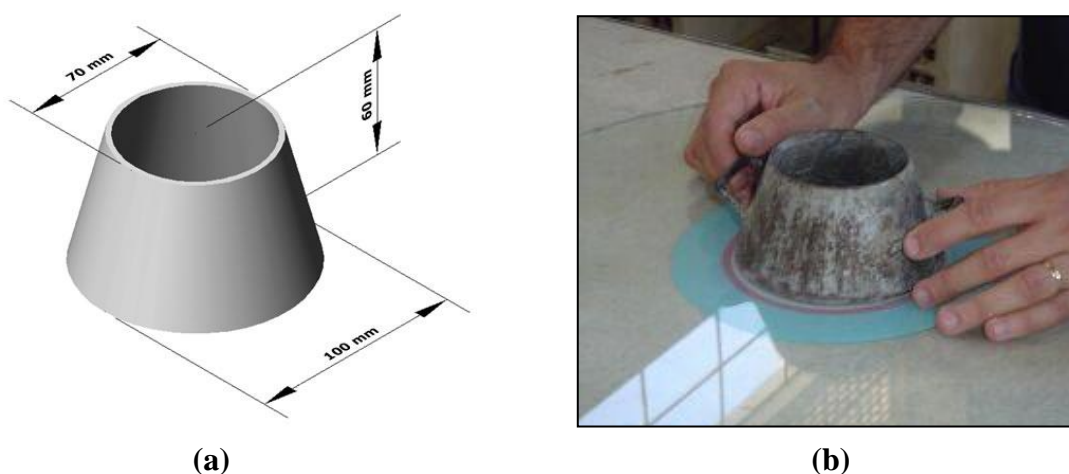
Neste método, a determinação do volume de argamassa é um fator fundamental, pois com esta determinação se obtém a razão  $a/f$  (água/finos) e o teor de superplastificante. Logo, para materializar esta determinação o método recomenda a realização do teste de espalhamento pelo tronco de cone de consistência e para a fluidez o método do Funil-V.

No esquema,  $G_m$  representa o diâmetro de espalhamento relativo e, o índice  $R_m$  é o tempo de escoamento relativo. Estas variáveis são obtidas pelos ensaios de espalhamento com a utilização do tronco de cone de consistência ( $G_m$ ) e o ensaio de fluidez conhecido como Funil

–  $V (R_m)$ . Para a determinação de  $a/f$  e do teor de superplastificantes são usados ensaios a partir da argamassa do concreto. Desenvolver CAA não depende apenas das suas propriedades internas e das suas respectivas combinações, situações como a quantidade de armadura presente e as condições de fronteira e passagem são alguns dos outros fatores determinantes. Na proposta de dimensionamento do CAA, a garantia de um  $G_m=5,0$  e do  $R_m=1,0$ , significa de forma respectiva que o composto possui alta deformabilidade e suficiente viscosidade.

### 2.3.1.1 Ensaio do Tronco de Cone na Mesa de Consistência

Na proposta de Okamura este ensaio é utilizado para verificar as propriedades autoadensáveis das argamassas, em especial a capacidade de fluir. Na Figura 13, visualiza-se o esquema para experimentação. Lança-se a argamassa no interior do mini-cone e após levanta-se e mede-se o espalhamento final e o tempo de fluxo até a estabilização do movimento.



**Figura 13 - Modelo de cone para o ensaio de mini-slump para argamassas**

Fonte: Adaptado de Cavalcanti (2006) e Lisbôa (2004)

Nota: (a) Esquema básico do mini-cone. (b) Imagem do aparato utilizado por Lisbôa.

Neste método, o espalhamento final (d) servirá para obtenção do espalhamento relativo ( $G_m$ ) calculado pela Equação 4.



$$G_m = \left( \frac{d}{d_0} \right)^2 - 1,0 \quad (4)$$

**Onde:**

$G_m$  = Espalhamento relativo,  $d_0$  = diâmetro inicial da mistura (mm),  
 $d$  = diâmetro final do espalhamento (mm).

Na mesma lógica, tem-se a recomendação do cálculo do tempo de escoamento relativo ( $R_m$ ). Ele é obtido pela Equação 5, pelo tempo de fluxo ( $t$ ) obtido pela argamassa no seu espalhamento.

$$R_m = \frac{10}{t} \quad (5)$$

**Onde:**

$R_m$  = Tempo de escoamento relativo,  
 $t$  = tempo de fluxo da argamassa

Edmatsu *et al.* (1999 *apud* GOMES, 2002), sugere para estes ensaios, um diâmetro final de espalhamento de (200 a 283) mm para valores de  $3 \leq G_m \leq 7$  e o tempo de fluxo de (5 a 10) segundos para  $1 \leq R_m \leq 2$ . De acordo com Takada *et al.* (1998 *apud* NUNES, 2001), os valores destas relações para a produção de CAA deve ser de  $G_m = 5,0$  e  $R_m = 1,0$ . Estes valores são referenciais para obtenção do teor de superplastificante na pasta e consequente determinação da relação  $a/f$  e  $a/c$ . Segundo Nunes (2001), valores maiores de  $G_m$  representam maior deformabilidade enquanto um valor menor de  $R_m$  representa uma maior viscosidade. Complementar a estes testes o método recomenda o teste do espalhamento no cone de abrams e no Funil-V para ajustes na dosagem do aditivo químico e dos componentes no CAA.

### 2.3.2 Método da EFNARC 2005

A EFNARC (The European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems) foi fundada em 1989, na Europa, desde sua criação já era tida como uma das principais associações mundiais que estudam e desenvolvem novas tecnologias de concreto. Ela descreve o concreto autoadensável como o mais fabuloso desenvolvimento na área de construção de estruturas de concreto da última década. Estes desenvolvimentos ganham, anos

após anos, maior força e intensidade, haja vista a quantidade de desenvolvimentos e de programas de CAA no mundo (LISBÔA, 2004; CAVALCANTI, 2006). No Quadro 5, temos as normas recomendadas pela EFNARC para elaboração dos CAA.

| <b>Especificações</b>                      | <b>Norma</b> | <b>Atuação</b>  |
|--|--------------|---|
| Materiais constituintes                    | EN 206-1     | Especificação, desempenho, produção e conformidade do concreto      |
| Cimentos                                   | EN 197-1     | Composição, especificação e critérios de conformidade do cimento    |
| Agregados                                  | EN 12620     | Especificações para agregados de concreto                           |
| Água                                       | EN 1008      | Água para concreto  |
| Aditivos químicos como superplastificantes | EN 934-2     | Aditivos químicos   |
| Aditivos minerais, fileres e pigmentos     | EN 12620     | Especificações para agregados de concreto                           |
| Cinzas volantes                            | EN 450       | Definições, exigências e controle de qualidade para cinzas volante  |
| Sílica ativa                               | EN 13263     | Definições, exigências e controle de qualidade para sílica ativa    |
| Produção do concreto                       | EN 206       | Densidade, aumento de resistência, resistência final e durabilidade |
| Sistema de gestão total de qualidade       | EN ISO 9001  | Requerimentos gerais de padrões de qualidade                        |

**Quadro 5- Normas de referências para o CAA**

Fonte: (EFNARC, 2005)

Dentro das especificações para cada um dos componentes do CAA, existem recomendações e avaliações características para cada situação. Com relação ao cimento a EFNARC, recomenda-se que seu consumo esteja na faixa de  $350\text{kg/m}^3$  a  $450\text{kg/m}^3$ , para que o concreto não se submeta a retração descontrolada e excessiva. Abaixo destas recomendações só conseguiram utilizá-los com adição de outros materiais cimentícios, como as pozolanas. Os finos devem possuir dimensão menor que  $0,125\text{mm}$ , se assim não ocorrer devem ser usados agentes reguladores de viscosidade (CAVALCANTI, 2006).

O método é criterioso na orientação com relação às propriedades a serem estudadas no composto no seu estado fresco, tais como, capacidade de preenchimento, capacidade de passagem entre obstáculos e resistência à segregação. No Quadro 6, são apresentados alguns dos ensaios recomendados pela EFNARC.

|    | Teste                          | Propriedade testada      | Unidades  | Faixas típicas |        |
|----|--------------------------------|--------------------------|-----------|----------------|--------|
|    |                                |                          |           | Mínimo         | Máximo |
| 1  | Espalhamento no Cone Abrams    | Habilidade de enchimento | mm        | 650            | 800    |
| 2  | T <sub>500 mmm</sub>           | Habilidade de enchimento | seg.      | 2              | 5      |
| 3  | Funil-V                        | Habilidade de enchimento | seg.      | 6              | 12     |
| 4  | Orimet Filling ability         | Habilidade de enchimento | seg.      | 0              | 5      |
| 5  | Anel-Japonês                   | Habilidade de passagem   | mm        | 0              | 10     |
| 6  | Caixa-L                        | Habilidade de passagem   | H2/H1     | 0,8            | 1      |
| 7  | Caixa U                        | Habilidade de passagem   | (H2/H1)mm | 0              | 30     |
| 8  | Fill-box                       | Habilidade de passagem   | %         | 90             | 100    |
| 9  | Funil-V para T <sub>5min</sub> | Resistência à segregação | seg.      | 0              | 3      |
| 10 | GTM                            | Resistência à segregação | %         | 0              | 15     |

**Quadro 6 - Lista de testes e informações para as propriedades do CAA**

Fonte: (EFNARC, 2005)

Segundo Cavalcanti (2006, p. 46), os principais ensaios utilizados para caracterizar a capacidade de fluxo (habilidade de enchimento) são os testes 1 e 4. Já para capacidade de passagem entre obstáculos, os testes número 6, tubo "U" e o teste de auto-adensibilidade. Para a resistência à segregação utilizam-se os testes 4 e 9.

### 2.3.3 Método de Gomes 2002

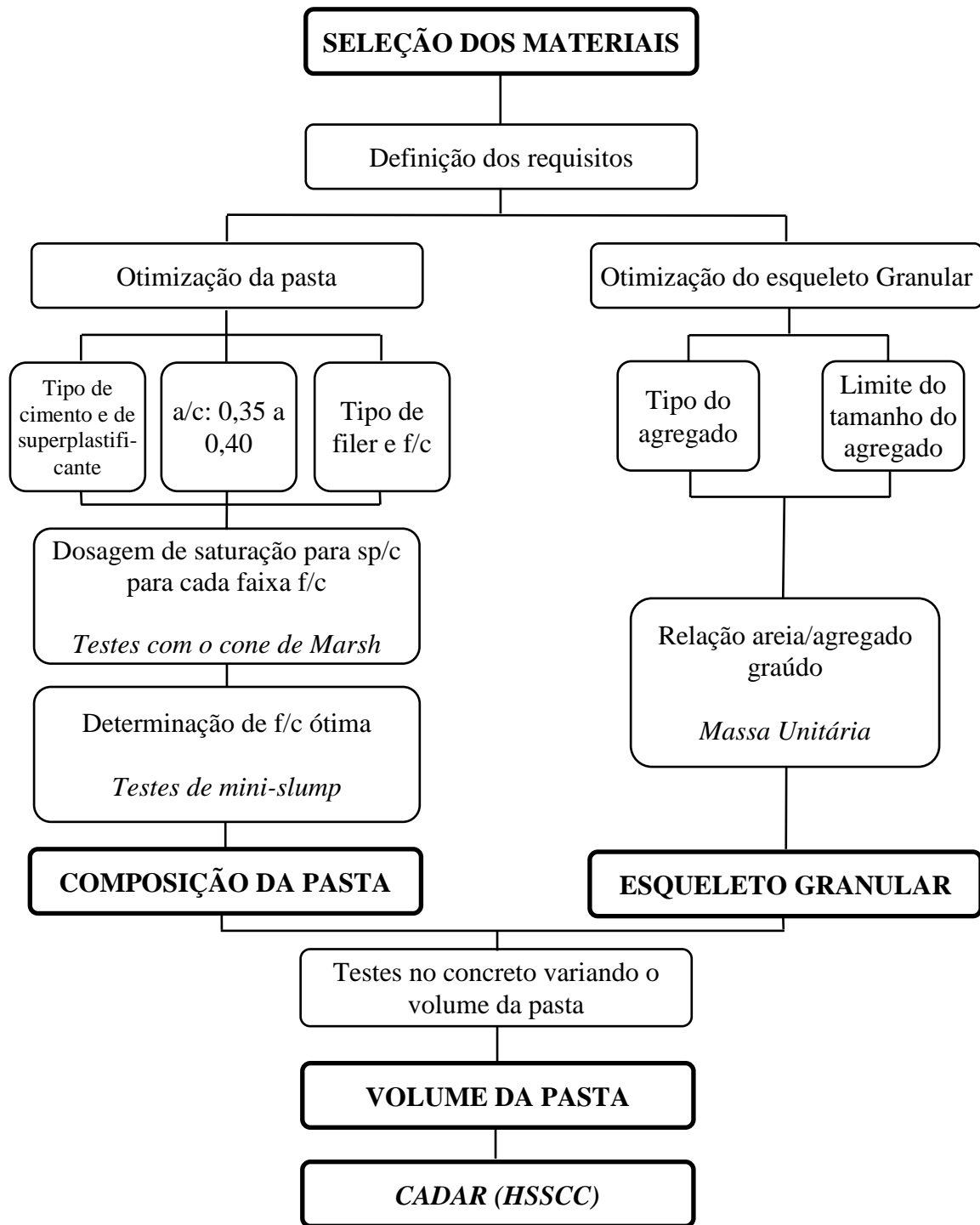
O método proposto nos estudos de doutoramento de Gomes (2002) foi desenvolvido com o propósito de gerar um concreto autoadensável de alta resistência designado de CADAR. O método em seus critérios define a busca pelo atendimento de uma resistência mínima a compressão e por uma série de cumprimento de requisitos técnicos do concreto no seu estado fresco. Na sua lógica, objetiva-se o uso de quantidades mínimas de superplastificantes e cimento.

No desenvolvimento da metodologia são observadas duas fases distintas, tratadas individualmente, que se combinam posteriormente na etapa de geração do concreto. Trata-se do estudo do esqueleto granular e o estudo da pasta de cimento, que são otimizadas individualmente, a fim de se obter as propriedades desejadas do composto final de CADAR.

Assim como já enfatizado, dentro da filosofia buscada pelo método para a geração do CADAR, buscaram-se as seguintes etapas (GOMES, 2002):

- *Otimização do esqueleto granular:* este ensaio segue recomendação da norma ASTM C29/C29M. Para o esqueleto granular as recomendações são para que os valores máximos dos agregados sejam de até 20mm. A máxima densidade no estado seco deve ser o critério para dimensionar a relação ar/br (areia/brita), onde sem o uso de compactação deve-se descobrir a relação que proporcione a menor quantidade de vazios na junção dos dois agregados. Para tanto é utilizado um recipiente com volume de 5 litros onde busca-se estabelecer a quantidade de um dos agregados na relação (100% | 0%) e adicionando o segundo até que se tenha a relação inversa da inicial (0% | 100%). Geralmente, estes valores são variados, na faixa de 10 em 10%;
- *Melhor composição da pasta com a determinação da dosagem ótima de superplastificante:* neste ensaio utiliza-se o funil de Marsh e as recomendações da Norma EN 445 (Norma Europeia – graute para bainhas de protendidos). Para a obtenção da melhor composição da pasta, se faz a variação do superplastificante fixando os valores das relações a/c e f/c (filler/cimento);
- *Produção do concreto com a dosagem ótima obtida na pasta:* junção ótima dos procedimentos citados nas alíneas 1 e 2 e conforme Figura 14.

Na Figura 14, apresenta-se o fluxograma das principais atividades propostas na determinação do CADAR por Gomes.



**Figura 14 - Fluxograma da metodologia do CADAR de Gomes (2002)**

Fonte: adaptado de Gomes (2002).

Na sequência será apresentado o ensaio do Funil de Marsh e o ensaio do Mini-slump utilizados para realizar a composição ótima da pasta. Com eles buscam-se a definição das relações a/c, sp/c e f/c, de tal maneira que se mantenha a coesão com controle de sua segregação e ao mesmo tempo a sua fluidez. Também apresenta-se o ensaio do Tronco de

Cone na Mesa de Consistência que Gomes (2002) havia recomendado para avaliar a capacidade de espalhamento de argamassas autoadensáveis.

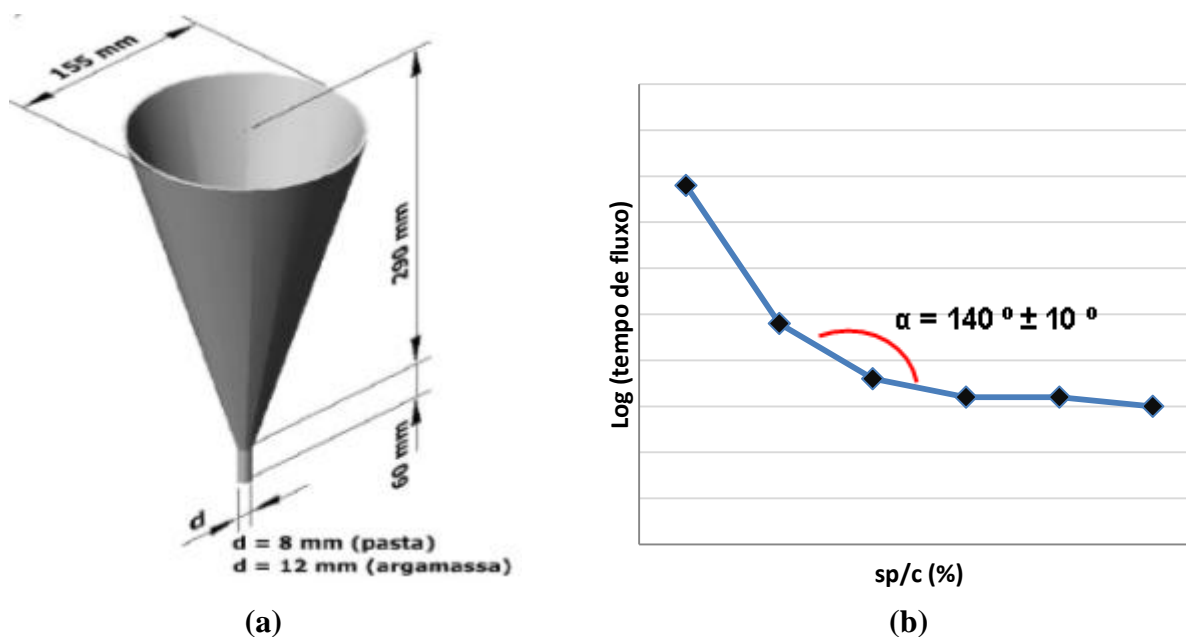
### 2.3.3.1 Ensaio do Funil de Marsh

Este ensaio serve para determinar a dosagem de superplastificante na pasta de cimento respaldada principalmente pelo controle de sua fluidez. Ele possui uma lógica de fácil compreensão. Busca-se medir o tempo que uma amostra ( $v$ ) levará para escoar do funil para um recipiente graduado posicionado abaixo do funil. Este tempo, chamado como tempo de fluxo, é o inverso da medida relativa da fluidez, ou seja, quanto menor for o tempo de fluxo maior será a fluidez da pasta. A proposta relacionada neste método teve origem na norma europeia EN 445 (Norma Europeia – Grautes para bainhas de protendidos. Métodos de Ensaio, 1996). A proposta do método descrita pelo autor, busca medir o tempo que uma amostra ( $v$ ) de 500ml levará para fluir completamente do funil com uma quantidade total 1000ml ( $V$ ) (GOMES, 2002).

Desta maneira, com uma quantidade previamente medida de pasta ( $V$ ) após um processo de mistura, lança-se o material no interior do funil (Figura 15.a) com o orifício inferior fechado. Após, abre-se este orifício e mede-se o tempo que uma amostra ( $v$ ) do volume do material leva para preencher a medida estipulada no recipiente abaixo do funil. Pesquisadores como Aitcin (2000), utilizaram um volume de pasta com  $V = 1,2$  l medindo o escoamento de  $v = 1$  l deste composto, com o funil de abertura de 5mm no orifício inferior. De acordo com Aitcin (2000, p. 200), esta medida para o estudo das pastas pode ser de 5 mm a 12,5 mm. Gomes (2002), Lisboa (2004) e Cavalcanti (2006), realizaram seus experimentos para a determinação do superplastificante na pasta com uma amostra de  $V = 1$  l e escoamento da amostra  $v = 0,5$ l, com o funil de orifício de 8mm para a pasta com valores característicos com a norma original (EN 45). A relação  $a/c$  usada no caso de concreto de auto-desempenho é de 0,35 a 0,40 e a relação  $a/f$  geralmente fixada em valor máximo de 0,4 (GOMES, 2002).

Nesta lógica, o método procura determinar a melhor dosagem de superplastificante na pasta de cimento  $sp/c$ , onde esta medida de dosagem é obtida pelo ponto de saturação. Tal ponto representa a quantidade de superplastificante, na qual qualquer acréscimo de  $sp/c$  não representará melhorias na fluidez da pasta. Para que seja estabelecida esta dosagem ótima de  $sp/c$  (superplastificante/cimento), torna-se necessário o conhecimento prévio da relação  $f/c$  (fíler/cimento) e  $a/c$  (água/cimento) adotadas. Fixada a quantidade de  $a/c$  e de  $f/c$  a serem

experimentadas, varia-se a relação  $sp/c$  e mede-se o tempo de escoamento da amostra ( $v$ ). Com estes valores, projeta-se um gráfico, onde no eixo das coordenadas temos a relação  $\text{Log}(t)$  dos tempos de fluxos pelos valores nas abscissas de  $sp/c$  experimentados (Figura 15.b). Quando o ângulo interno da curva estiver na faixa de abertura de  $140 \pm 10$ , define-se o valor de  $sp/c$  como ponto de saturação para a relação  $f/c$  investigada. O esquema básico do aparato e a ilustração do gráfico a ser projetado pode ser visto na (GOMES, 2002).



**Figura 15 - Ilustração do Funil de Marsh e ao lado modelo de gráfico para determinação do ponto de saturação**

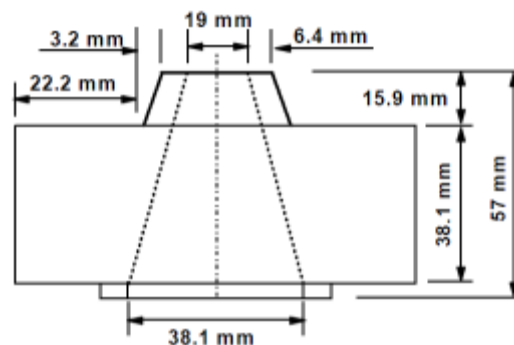
Fonte: adaptado de Cavalcanti (2006) e Gomes (2002)

Nota: (a) Esquema básico do funil de Marsh. (b) Esquema do gráfico

Para o estudo das propriedades autoadensáveis para argamassas também se utiliza este teste, porém com o funil com orifício inferior de 12mm. Investiga-se assim, o ponto de saturação do superplastificante na mistura. Este valor  $sp/c$  será aquele que o acréscimo de superplastificante não produz efeitos significantes na redução do tempo de escoamento. Assim como para as pastas, traça-se o gráfico do log do tempo de escoamento ( $s$ ) pela variação de  $sp/c$  para auxílio na tomada de decisão do ponto de saturação. Para o estudo da argamassa recomenda-se também o Teste de Tronco de Mesa de Consistência (item 2.3.3.3) (LISBÔA, 2004).

### 2.3.3.2 Ensaio do Mini-slump

Neste ensaio é verificada a capacidade de espalhamento da pasta. Com a dosagem ótima de sp/c para cada f/c lança-se a pasta no cone (Figura 16) mede-se o tempo que a amostra leva para percorrer radialmente 115mm ( $T_{115}$ ) e o seu respectivo espalhamento final. As relações ótimas de f/c pela sua respectiva proporção de sp/c serão aquelas que se enquadrarem na faixa  $2s \leq T_{115} \leq 3,5s$  e obtiverem espalhamento máximo final na faixa de  $180 \pm 10mm$  (GOMES, 2002).



**Figura 16 - Modelo de mini-cone para o ensaio de Mini-slump**

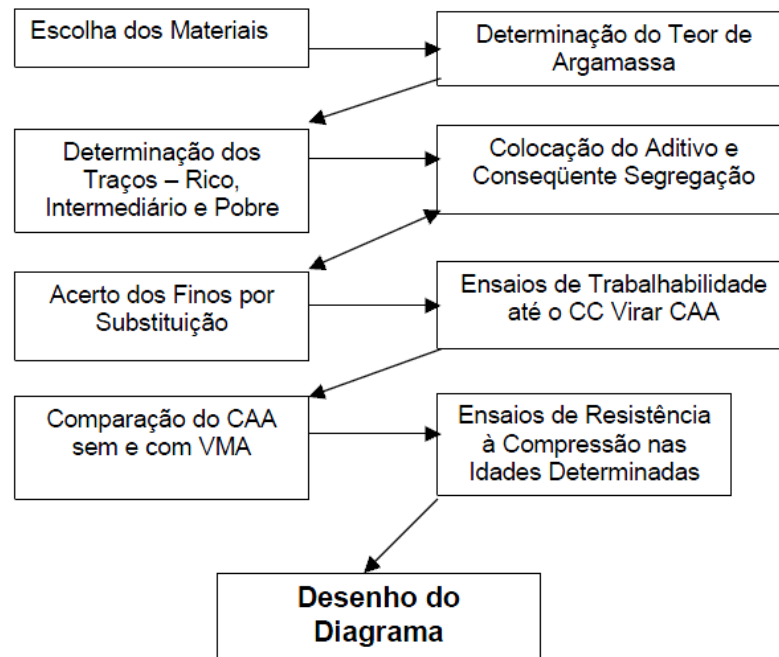
Fonte: (GOMES, 2002)

### 2.3.4 Método de Tutikian 2004

Na sua dissertação de mestrado, apresentada na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Bernardo Fonseca Tutikian desenvolveu uma proposta de metodologia baseada em um roteiro técnico consagrado nacionalmente para concretos convencionais, o método IPT-EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992). Na sua proposta, entre outros fatores, ele busca gerar um concreto tecnicamente aceitável dentro das características de um CAA e que condicione o menor custo possível do composto.

Assim como no método do IPT-EPUSP, foi proposta uma lógica de similaridade com as relações estudadas e empenhadas na geração dos traços, tais como a lei de Abrams e a lei de Lyse. Desta forma, ele propõe a geração do diagrama de dosagem e determinação das equações de comportamento do concreto. Na Figura 17, podemos ver o esquema central para a geração dos traços de CAA a partir da proposta de Tutikian (2004).





**Figura 17 - Fluxograma da metodologia de Tutikian**

Fonte: (TUTIKIAN, 2004)

Seguindo a proposta do método do IPT-EPUSP, gera-se uma configuração de um concreto convencional (CC) e a partir deste, busca-se a geração do CAA. As etapas que entram em sintonia com a Figura 17, na proposta de geração seriam:

1. Escolha e caracterização devida dos materiais;
2. Definição dos parâmetros de dosagem focando sobre a relação a/c pelos requisitos de durabilidade definidos;
3. Definição dos três traços que servirão para condicionar o diagrama de dosagem. Como recomendação (1:3,5), (1:5) e (1: 6,5);
4. Com o traço central define-se o teor de argamassa, mantendo este padrão até o final do estudo;
5. Adicionam-se os aditivos superplastificantes após a sua determinação de composição ótima;
6. Após, inicia-se o processo de acerto de viscosidade da mistura com o uso de finos em substituição parcial da areia;
7. Realizar testes de condições frescas para o CAA;
8. Acertados os melhores parâmetros faz-se a inserção do diagrama de dosagem.

Este método é simples e objetivo, porém para que sejam extraídos resultados ótimos desejáveis são realizados muitos ensaios práticos com as composições. Pela lei de Abrams é relacionada a resistência à compressão com a relação água/aglomerante (a/agl). Já na lei de Lyse, é relacionado a relação a/agl com a quantidade de agregados “m” para uma certa trabalhabilidade. Desta forma, com estas relações configuradas, consegue-se obter um concreto com qualquer resistência. Desde que, esteja dentro do intervalo contemplado, da relação a/agl, quantidade de agregados “m” e no consumo de aglomerante por metro<sup>3</sup> e que sejam utilizados os materiais originais do estudo preliminar (TUTIKIAN, 2004).

## 2.4 CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR (CBC)

### 2.4.1 Considerações gerais

O advento da indústria renovável e os diversos incentivos para o desenvolvimento desta tecnologia vêm alavancando o setor sucroalcooleiro no Brasil e no mundo. Algumas outras culturas de cultivo como o milho, a soja e a laranja vêm cedendo espaço para lavouras de cana-de-açúcar em todo território nacional (MACEDO, 2009). A representação no PIB nacional dos processos industriais e agrícolas de cana-de-açúcar chegam a 3,65% (SOUZA *et al.*, 2007).

Na indústria sucroalcooleira são gerados pelos processos industriais de fabricação de álcool e açúcar e outros produtos, alguns subprodutos como o bagaço da cana-de-açúcar, a sacarose e a palha. O bagaço gerado é reutilizado por processos internos dentro das usinas como co-geradora de energia (NUNES *et al.*, 2008). Ainda podemos destacar outros subprodutos da cana-de-açúcar: a levedura, o melaço, a torta de filtro e a vinhaça (SANTOS *et al.*, 2009).

Como informado no item 1.1 deste trabalho, somente no Paraná são esperados cerca de 43,28 milhões de toneladas de cana-de-açúcar na safra atual (2012/2013). Este volume de cana pode proporcionar cerca de 268.000 t de CBC pelos aproveitamentos energéticos no processo de co-geração de energia (ver Figura 19). As usinas produtoras no estado do Paraná podem ser visualizadas na Figura 18.



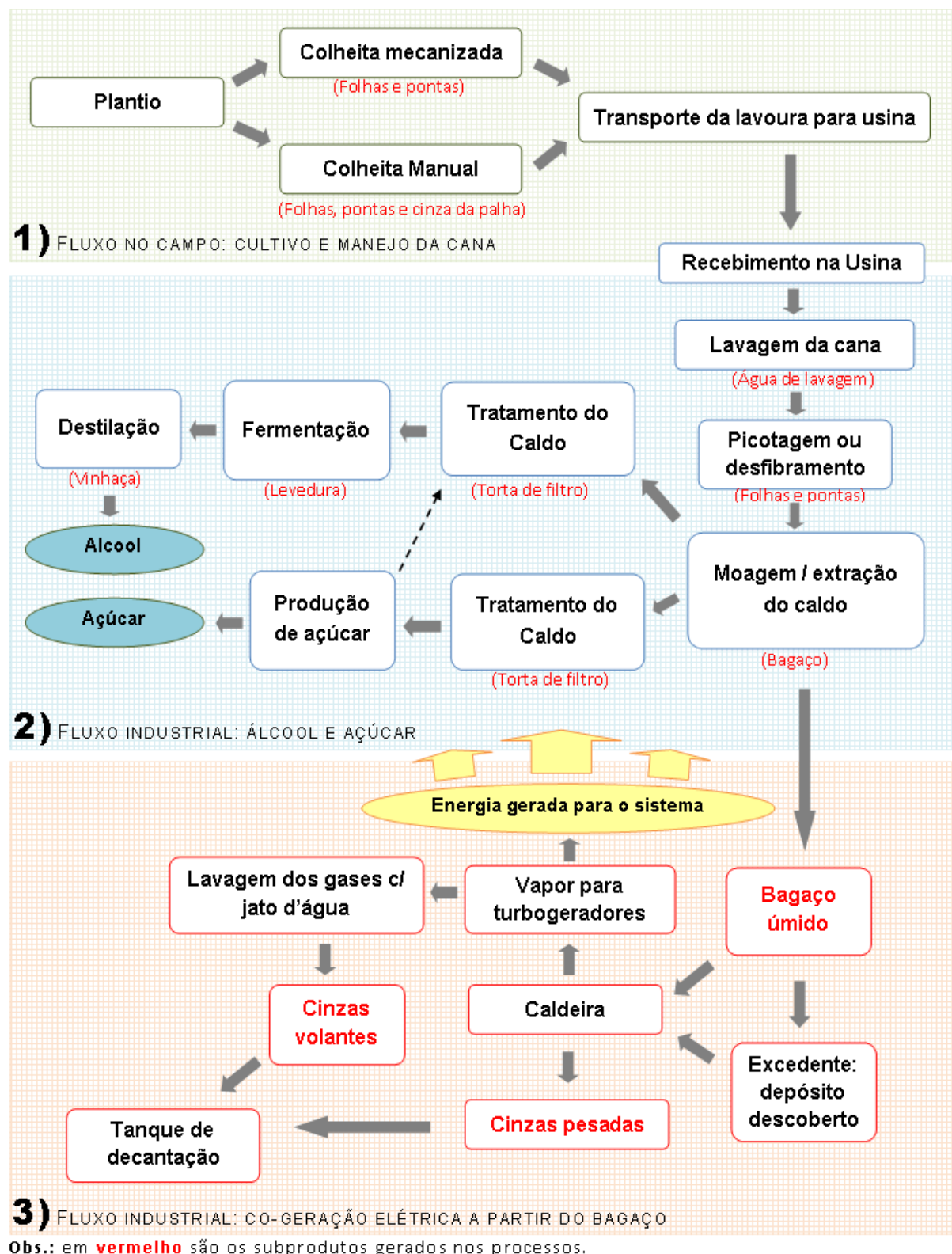
**Figura 18 - Usinas, destilarias e projetos do setor sucroalcooleiro do PR**

Fonte: (ALCOPAR, 2012)

O subproduto da cana-de-açúcar é classificado como um resíduo sólido de categoria rural e natureza de classe II (não inertes) ABNT NBR 10004:2004 . O principal destino para a CBC é na adubação das lavouras juntamente com as tortas de filtro e a palha (FIESP/CIESP, 2001). No entanto, conforme exposto no item 2.4.4, são as crescentes instituições, centros de pesquisas e profissionais que vêm estudando a CBC como agregada a outros produtos, em destaque a construção civil.

#### **2.4.2 Processo de geração da CBC**

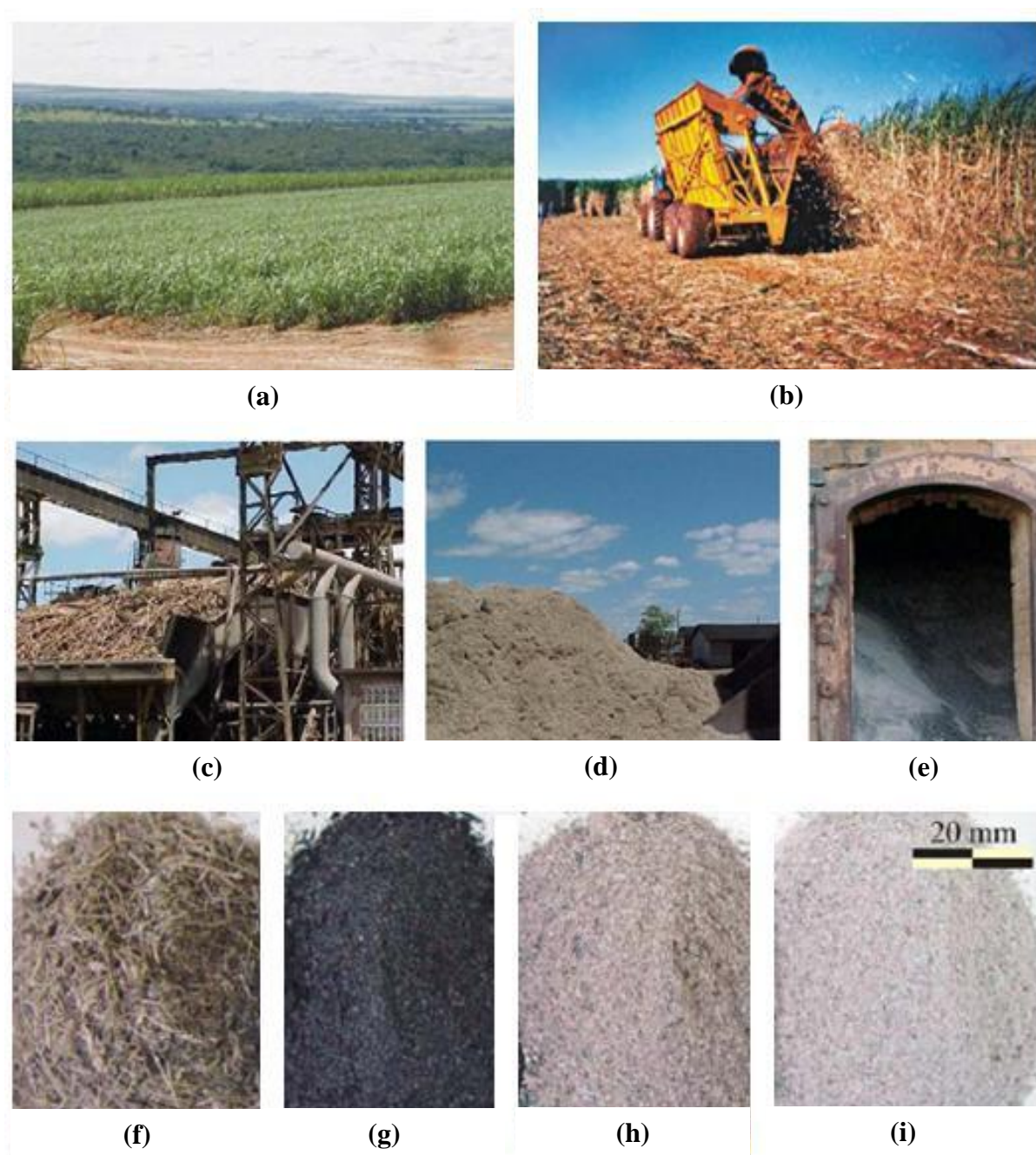
O processo de geração da cinza do bagaço de cana-de-açúcar é uma geração complementar do reaproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar no processo global de geração de açúcar e álcool. No manejo manual ou em queimadas para processo de colheita também é gerada a cinza da palha. Na Figura 19, podemos verificar os principais momentos em que são gerados os mais comuns subprodutos durante este processo, no campo (1), na fábrica (2) e na co-geração energética (3).



Obs.: em **vermelho** são os subprodutos gerados nos processos.

**Figura 19 - Esquematização básica da produção de açúcar e álcool e seus subprodutos**  
 Fonte: adaptado de: Moreira e Goldemberg (1999 *apud* Cordeiro, 2006); Freitas, (2005) e Nunes (2009).

Na Figura 20, visualizam-se ilustrações de alguns processos e subprodutos até o aspecto final da cinza.



**Figura 20 - Ilustrações gerais do processo de geração e da própria CBC**

Fonte: adaptado de Cordeiro (2006) e Freitas (2005)

Nota: (a) lavoura de cana-de-açúcar, (b) colheita mecanizada, (c) cana em início de processo de moagem, (d) depósito descoberto de bagaço pós-moagem, (e) CBC dentro da fornalha da caldeira, (f) aspecto da fibra do bagaço, (g) diferentes cinzas residuais com coloração escura característica de combustão incompleta e presença de alto teor de C, (h) cinza com menor teor de carbono e (i) cinza característica de combustão completa.



No Quadro 7 apresentam-se os principais destinos para os subprodutos gerados a partir dos processos apresentados nas Figuras 19 e 20.

| Subproduto gerado (resíduo) | Valores médios de produção | Geração  | Destinação  |
|-----------------------------|----------------------------|--|---|
| Água de lavagem             | -                          | Lavagem da cana antes da moagem  | Produção do biogás e fertirrigação.   |
| Bagaço                      | 269 kg/t cana moída        | Moagem de cana e extração do caldo                                     | Co-geração de energia elétrica, uso como adubo, ração animal, produção de aglomerados, produção de celulose |
| Torta de filtração          | -                          | Filtração do lodo gerado na clarificação do caldo na geração de açúcar | Condicionador do solo e ração animal  |
| Vinhaça                     | -                          | Resíduo de destilação do melaço fermentado (obtenção do álcool)        | Fertilizante  |
| Melaço                      | -                          | Fabricação do açúcar   | Quase que totalmente usado na produção do álcool  |
| Palha, folhas e pontas      | 18,2 t/hectare de cultivo  | Folhas secas, folhas verdes e ponteiros. Corte da cana.                | Mesmas aplicações do bagaço mais forragem.  |
| Levedura                    | -                          | Fermentação do caldo   | Adubação  |
| CBC                         | 6,2 kg/t de bagaço         | Queima do bagaço em caldeiras para co-geração de energia               | Adubação do solo. Pesquisas como agregado para novos produtos.  |

**Quadro 7 - Subprodutos e resíduos gerados pela fabricação de álcool e açúcar**

Fonte: (CORDEIRO, 2006; FREITAS, 2005; FIESP/CIESP, 2001; NUNES, 2009).

Mesmo que o processo de co-geração libere dióxido de carbono - CO<sub>2</sub> para a atmosfera, a quantidade de emissões é significativamente menor se comparada com outras fontes de energia como o petróleo (FREITAS, 2005). A cana-de-açúcar inclusive é um vegetal com notória capacidade de captação de luminosidade e realização de fotossíntese e consequente captura do CO<sub>2</sub> presente na atmosfera (FIESP/CIESP, 2001; GOLDEMBERG *et al.*, 2008).

Atualmente o CO<sub>2</sub> corresponde a mais da metade dos gases do efeito estufa. Em particular, sob a análise do ciclo da cana, existe um equilíbrio, uma vez que na lavoura a queima da cana-de-açúcar e sua consequente liberação de carbono na forma de CO<sub>2</sub>, pelo balanço da biomassa gera um resultado nulo, pois a biomassa queimada é repostada pela fotossíntese na próxima cultura. Temos a geração de (0,057 – 0,11) kg CO<sub>2</sub>/kWh no ciclo completo da cana (incluindo energia indireta dos mecanismos no processo) enquanto somente a queima de óleo combustível gera em torno de 0,87 kg CO<sub>2</sub>/kWh (FIESP/CIESP, 2001).

O bagaço de cana-de-açúcar é gerado nos processos iniciais de fabricação de açúcar e álcool, cerca de 95% de todo resíduo gerado é queimado e aproveitado na co-geração e apenas 5% são aproveitados para outros fins agrícolas ou industriais (FIESP/CIESP, 2001). Cordeiro *et al.* (2009, p.1) descreve que este bagaço gerado no processo de moagem é queimado como combustível e nas caldeiras servirá para gerar vapor d'água. Segundo Cordeiro (2006, p. 46), este vapor gerado servirá para acionar turbinas para a geração de energia elétrica (co-geração) mantidas no próprio processo de geração de açúcar e álcool. Neste processo, cerca de 450 a 500kg de vapor podem ser gerados com a queima de uma tonelada de cana-de-açúcar (MOREIRA e GOLDEMBERG, 1999 *apud* CORDEIRO, 2006).

### **2.4.3 Características da CBC**

As características da cinza são influenciadas entre outros fatores pela temperatura de queima do bagaço. Conforme a temperatura ou o tempo de exposição do bagaço durante o processo de queima, maior será a liberação de carbono gerando cinzas de diferentes tonalidades e propriedades (ver Figura 20) (CORDEIRO, 2006).

Os processos de reaproveitamento e moagem que diretamente influenciam na granulometria da cinza, impactam no resultado da resistência mecânica das argamassas que utilizam a CBC. O controle da granulometria permite aumentar a superfície de contato dos grãos da CBC, de tal maneira que melhora sua reatividade, e conseqüente a isso geram-se ganhos no arranjo físico entre os seus grãos e também com os outros agregados no chamado efeito filer (FREITAS, 2005).

A atividade pozolânica das cinzas depende diretamente da área específica do material com relação direta com sua composição química. Alguns materiais de estrutura desordenada, consideradas como amorfos, se comparados diretamente com os cristalinos, são mais reativos com o hidróxido de cálcio livre presente no cimento portland (ZARDO *et al.*, 2004). Se controladas as condições de queima do bagaço, a CBC poderá manter suas propriedades amorfas. Se assim for feito, ela poderá atuar como pozolana reduzindo seus impactos se lançada no meio ambiente, podendo inclusive ser empregada tecnicamente em substituição ao cimento portland em concretos e argamassas (CORDEIRO *et al.*, 2009).

Na seqüência, apresenta-se a Tabela 1, que contempla informações de alguns estudiosos com relação à caracterização química mineralógica da CBC, realizados com Difração de Raio X.



Tabela 1 - Caracterização química de alguns trabalhos com CBC

| Composto                       | Quantidade (% em massa)                     |                  |                              |                  |                                 |                                |                |       |       |       |       |       |
|--------------------------------|---|------------------|------------------------------|------------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                | Extraído de Cordeiro (2006)                 |                  |                              | (CORDEIRO, 2006) | (DE PAULA <i>et al.</i> , 2009) | (BORLINI <i>et al.</i> , 2006) | (MACEDO, 2009) |       |       |       |       |       |
|                                | (MARTIRENA; HERNÁNDEZ <i>et al.</i> , 1998) | (MASSAZZA, 1998) | (SINGH <i>et al.</i> , 2000) |                  |                                 |                                |                |       |       |       |       |       |
| SiO <sub>2</sub>               | 72,70                                       | 75,00            | 63,20                        | 78,34            | 83,71                           | 77,50                          | 59,75          | 71,96 | 62,34 | 33,94 | 94,11 | 85,26 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5,30  | 6,70             | 9,70                         | 8,55             |                                 | 4,70                           | 10,28          | 7,15  | 7,78  | 5,62  | 0,74  | 1,98  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,90  | 6,30             | 5,40                         | 3,61             | 6,54                            | 3,80                           | 6,00           | 5,43  | 6,00  | 2,86  | 1,14  | 2,57  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,30  | -                | -                            | 0,50             | 1,16                            | 0,30                           | -              | -     | -     | -     | -     | -     |
| CaO                            | 8,00  | 2,80             | 3,10                         | 2,15             | 1,18                            | 2,30                           | 1,21           | 1,00  | 0,98  | 5,62  | 0,35  | 0,71  |
| MgO                            | 2,90  | 1,10             | 2,90                         | 1,65             | -                               | 3,00                           | 0,53           | 0,63  | 0,53  | 0,61  | 0,13  | 0,50  |
| SO <sub>3</sub>                | 0,10  | -                | 2,90                         | -                | 0,68                            | -                              | 0,08           | 0,03  | 0,08  | 0,23  | 0,11  | 0,17  |
| K <sub>2</sub> O               | 3,50  | 2,40             | -                            | 3,46             | 6,15                            | 5,40                           | -              | -     | -     | -     | -     | -     |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,80  | 1,10             | -                            | 0,12             | -                               | -                              | -              | -     | -     | -     | -     | -     |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 1,60  | 4,00             | -                            | 1,07             | -                               | 2,30                           | -              | -     | -     | -     | -     | -     |
| MnO                            | -   | -                | -                            | 0,13             | 0,08                            | 0,30                           | -              | -     | -     | -     | -     | -     |
| BaO                            | -   | -                | -                            | < 0,16           | -                               | -                              | -              | -     | -     | -     | -     | -     |
| ZrO <sub>2</sub>               | -   | -                | -                            | -                | 0,30                            | 0,06                           | -              | -     | -     | -     | -     | -     |
| CrO <sub>3</sub>               | -   | -                | -                            | -                | 0,09                            | -                              | -              | -     | -     | -     | -     | -     |
| Sc <sub>3</sub> O <sub>2</sub> | -   | -                | -                            | -                | 0,40                            | -                              | -              | -     | -     | -     | -     | -     |
| ZnO                            | -   | -                | -                            | -                | 0,04                            | -                              | -              | -     | -     | -     | -     | -     |
| V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | -   | -                | -                            | -                | 0,03                            | -                              | -              | -     | -     | -     | -     | -     |
| Perda ao fogo                  | 0,8   | 0,9              | 6,9                          | 0,42             | -                               | 0,31                           | 13,3           | 4,68  | 12,14 | 38,92 | 0,96  | 0,51  |

Fonte: (CORDEIRO, 2006; DE PAULA *et al.*, 2009; BORLINI *et al.*, 2006; MACEDO, 2009).

A maior presença em proporção por massa nos estudos acima relatados foi o dióxido de silício (sílica), onde se relata apenas uma amostragem de valor abaixo de 60%. De acordo com Cordeiro (2006, p. 49), este composto é absorvido no solo sob a forma de H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> (ácido monossílico). Com a transpiração das plantas juntamente com a saída da água, ele se deposita externamente nas células da epiderme sob a forma de sílica gel.

Com relação a algumas propriedades físicas, Martins *et al.* (2007, p. 123), por meio do ensaio ABNT NBR 7217:1987, chegaram ao valor de: dimensão máxima característica de 1,2mm, módulo de finura de 1,29 e presença de 1,6% de material pulverulento (< 0,075mm) na CBC. Ainda por estes autores, a massa específica encontrada foi de 2,50 g/cm<sup>3</sup>. De Paula *et al.*

(2009, p. 355), apresentou valores de dimensão específica para a CBC entre 0,001 e 0,014mm e com área superficial de  $24\text{m}^2\text{g}^{-1}$ .

No trabalho de Sales *et al.* (2010, p. 26), eles classificaram a CBC estudada como uma areia fina. Segundo eles, a faixa granulométrica encontrada levou a esta classificação, onde todas as amostras tiveram dimensão máxima característica de 0,6mm a 1,2mm. Os valores encontrados para o módulo de finura ficaram na faixa de (0,52 a 1,46), para a massa unitária (MU) encontrou-se a faixa de (0,98 à 1,43) $\text{g}/\text{cm}^3$  e para massa específica valores entre (2,23 à 2,63) $\text{g}/\text{cm}^3$ , os ensaios granulométricos seguiram a NM 248:2003.

#### **2.4.4 Trabalhos com CBC**

Desenvolvimentos e estudos com esta cinza mostram que elas possuem predominantemente a sílica ( $\text{SiO}_2$ ), que finamente moída e com controle de sua queima, por consequência das suas características químicas e físicas podem contribuir para as reações pozolânicas durante o processo químico de hidratação do cimento portland. (CORDEIRO *et al.*, 2009; Nunes *et al.*, 2008). Mesmo que não exista controle na sua geração de tal maneira que não sejam geradas as propriedades de reatividade hidráulica e de pozolanicidade, estas cinzas podem ser utilizadas como agregados inertes em materiais de construção civil (LIMA *et al.*, 2010).

Na sequência (Quadro 8), serão apresentados de forma objetiva, alguns trabalhos recentes que estudaram de alguma maneira as propriedades da CBC para posteriores usos na construção civil. Vale ressaltar que as informações contidas no Quadro 8 não representam o conteúdo completo das pesquisas, bem como em alguns casos o seu foco central de estudo, apenas remetem algumas considerações parciais dos estudos, comentadas pelos autores.

| Autores                       | Breve comentário   | Alguns resultados  |
|-------------------------------|--|--|
| Zardo <i>et al.</i> , 2004    | Avaliou o potencial das cinzas provenientes da pirólise do CBC como adição mineral em compósitos de matriz cimentícia.                                       | Os compósitos com CBC moídos apresentaram resultados melhores de flexão e tração com relação à cinza não moída. Verificou-se que a CBC utilizada possuía 77,3% de sílica, na forma de cristais e com baixa área superficial direcionando o seu uso apenas como enchimento.   |
| Freitas, 2005                 | Caracterizou a CBC do município de Campos dos Goytacazes para uso na construção civil.   | Seguindo tratamentos adequados, a CBC avaliada pode ser obtida no seu estado amorfo, proporcionando atividade pozolânica. O controle da alteração de granulometria nos processos de moagem pode aumentar a superfície de contato e assim proporcionam maior reatividade e efeito filer.  |
| Borlini <i>et al.</i> , 2006  | Estudou a influência da temperatura de sinterização nas propriedades físicas, químicas, mecânicas e macroestruturais de cerâmica vermelha com adição de CBC. | De uma forma geral os estudos apontaram mudanças significativas nas propriedades físicas e mecânicas da cerâmica vermelha com CBC. Incorporações de até 10% de cinza na massa cerâmica, sinterizada a 1200°C, não mudaram a resistência mecânica quando comparada à massa cerâmica, levando em consideração a barra de erro estatístico. |
| Cordeiro, 2006                | Verificou entre outros focos, o uso da CBC ultrafina com controle de tempo, queima e moagem para produção de concretos convencionais e de alto desempenho.   | Com as condições controladas da CBC em laboratório, conseguiu-se substituição de até 40% do cimento, com manutenção das propriedades mecânicas, de durabilidade e reológicas.  |
| Martins <i>et al.</i> , 2007  | Estudo da CBC como agregado miúdo para argamassas.   | Resultados de corpos de provas que usaram a 100% de CBC com agregado miúdo, alcançaram resultados maiores que com 100% de areia (CP com 3 e 7 dias). Atribui-se esta relação ao efeito filer. Para 28 dias, a relação de superioridade da CBC se mantém, porém com diferença menor entre ambas.  |
| Hojo <i>et al.</i> , 2008     | Comparou tecnologias: mufla convencional e automática para análise de umidade da CBC.  | Existiu uma significativa diferença entre teores de umidades e teores de cinzas estudados para todas as variedades de canas.   |
| Akram <i>et al.</i> , 2009    | Utilizou a CBC como agente modificador de viscosidade para CAA, estudando a relação de custo entre materiais.  | A fluidez do material diminui com o acréscimo de cinzas. Com força de compressão superiores a 34 MPa, o CAA começa equiparar em custo com o convencional.  |
| Cordeiro <i>et al.</i> , 2009 | Avaliou a possibilidade da CBC ser utilizada como pozolana.  | A CBC que foi produzida com queima controla a 600 °C apresentou atividade pozolânica recomendada pelos requisitos da norma ABNT NBR 12653/1992.  |
| Lima, <i>et al.</i> , 2009    | Pesquisou atributos da CBC como substituto do agregado miúdo para desenvolvimento da infraestrutura urbana.  | As amostras de CBC possuem propriedades físicas semelhantes a areia natural.   |
| Macedo, 2009                  | Estudou a viabilidade técnica da utilização da CBC como adição mineral em argamassas.  | As amostras mesmo que sejam de mesma fonte não apresentaram homogeneidade. Confirmou-se a possibilidade de substituição da CBC em relação ao agregado miúdo, onde recomenda-se um valor seguro de 5 %.   |
| Macedo <i>et al.</i> , 2009   | Realizou uma revisão do uso da CBC na construção civil.  | A CBC pode contribuir para a economia e gestão ambiental. As condições de queima e moagem influenciam as CBC estudadas no mundo inteiro. Existem diferenças químicas, mineralógicas e morfológicas nas diferentes CBC em todo o mundo que influenciam nas características, químicas e físicas das pastas, concretos e argamassas.        |

| Autores                       | Breve comentário   | Alguns resultados  |
|-------------------------------|--|--|
| Nunes, 2009                   | Objetivou a apresentação das características físicas e químicas das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar de quatro usinas localizadas na região de Maringá, visando sua aplicação na produção de concreto. | A substituição parcial do cimento pela cinza influenciou o comportamento reológico das pastas e a ação específica do plastificante não se restringe ao cimento. Neste experimento, a fluidez diminuiu com o aumento da substituição do cimento pela CBC.   |
| De Paula <i>et al.</i> , 2009 | Avaliou os potenciais da CBC como material pozzolânico.  | A CBC apresentou tanto o seu estado cristalino com o amorfo. De uma maneira geral os resultados comprovaram a pozzolanicidade da CBC.  |
| Poggiali, 2010                | Objetivou avaliar o desempenho de microconcretos fabricados com clínquer, gesso e diferentes adições de cinzas de bagaço de cana, produzidas na Usina Caeté/MG.  | Os concretos eram constituídos de clínquer, gesso e diferentes composições da CBC. Os resultados com relação ao índice de atividade pozzolânica e de condutividade indicaram que a moagem é um fator que influencia diretamente na reatividade das cinzas. As cinzas finas e grossas, embora possuíssem diferentes dosagens de SiO <sub>2</sub> , proporcionaram ao microconcreto ganhos de desempenho da ordem de 10 a 12%. |
| Lima <i>et al.</i> , 2010     | Pesquisou atributos da CBC como substituto do agregado miúdo para concretos.   | Nas condições do estudo verificou-se que a CBC pode substituir até 30% referindo-se ao traço de referência   |
| Mansaneira, 2010              | Estudou a potencialidade do uso da cinza do bagaço de cana de açúcar como adição ao cimento Portland na produção de argamassas.  | Pelos ensaios de resistência mecânica (resistência à compressão das argamassas) foi possível recomendar a possibilidade de substituição da taxa de até 20% do cimento pela CBCA para o tempo de uma hora de moagem ou de até 10% de substituição para o tempo de 2 horas de moagem com ganhos de resistência mecânica.   |
| Sales <i>et al.</i> , 2010    | Estudou as considerações ambientais da CBC e a possibilidade de sua aplicação na construção civil.   | A CBC estudada apresentou características físicas próximas das areias extraídas dos rios, podendo de forma técnica ser aplicada em obras de infraestrutura. Neste estudo recomendou-s a CBC em substituição da areia e não do cimento, pois a mesma encontra-se no estado cristalino.  |
| Souto, 2010                   | Estudo da substituição de 5 a 30% da CBC na massa de areia para concretos de Classe C30  | Os desempenhos da substituição da areia pela CBC trouxeram contribuições notórias. Para os resultados de resistência a compressão axial, a substituição de até 20% representou ganhos de até 12% na resistência característica em relação ao concreto de referência que não possuía CBC.   |
| Alcantara e Do Santos, 2011   | Utilização de CBC cristalina para o desenvolvimento de concreto autoadensável.   | A CBC atuou de forma satisfatória na formação da pasta e no controle da segregação. A finura muito elevada da cinza e a sua alta superfície específica requerem controles técnicos no processo de dosagem. A CBC atua diretamente no controle da segregação. Neste estudo conseguiu-se baixas resistências a compressão aos 28 dias (18MPa).   |

### Quadro 8 - Alguns trabalhos com o foco de avaliação do uso da CBC na construção civil

Segundo Nunes (2009, p. 11), nos últimos anos, a CBC tem sido estudada com intensidade no Brasil. Alguns estudos encaminham para a sua obtenção sob a forma de pozzolana, de forma natural ou passando por um tratamento preliminar, podendo inclusive ser produzida com controle cronológico de temperatura passando posteriormente por processos de refinamento e preparação como o de moagem.

# ***Capítulo 3***

---

## **MATERIAIS E MÉTODOS PARA GERAÇÃO DO CAA**

Neste capítulo serão apresentados os materiais e o método proposto para a realização dos experimentos, com o intuito de geração do concreto autoadensável com a CBC (CAA-CBC), bem como, da obtenção do traço do CAA sem a CBC. Esta pesquisa foi desenvolvida no Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá (UEM) no estado do Paraná. Contribuíram diretamente o Laboratório de Concretos Especiais, o Laboratório de Construção Civil e o Laboratório de Mecânica dos Solos.

De acordo com Gil (2002), esta pesquisa pode ser classificada com base experimental predominantemente quantitativa. Ela busca avaliar de forma sistemática a possível produção de concreto autoadensável pelo empenho técnico e coordenado dos materiais selecionados. A composição é proposta por meio de testes e métodos experimentais característicos deste tipo de tecnologia, os quais foram apresentados no item 2.2.

A busca pela obtenção do CAA é desafiadora, haja vista que existem inúmeras variáveis a serem controladas no seu estado fresco. Em qualquer método de dosagem um dos primeiros passos é a seleção dos componentes da mistura (GOMES e BARROS, 2009).

### 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS NA COMPOSIÇÃO DO CAA

Os materiais utilizados para a produção do CAA nesta pesquisa foram: cimento, areia, brita filer calcário calcítico, cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC), aditivo superplastificante e água.

#### 3.1.1 Cimento

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o Portland CII-E 32. Realizou-se sua caracterização pela ABNT NBR 7215:1996. Os resultados do tempo de pega (ABNT NBR NM 65:2003) e da resistência à compressão estão apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2 – Caracterização do Cimento CP II E 32**

| Item de controle        | Unidade | Média  |
|-------------------------|---------|--------|
| Início de Pega          | Minutos | 67     |
| Fim de Pega             | Minutos | 212    |
| Resistência aos 3 dias  | MPa     | 17,62  |
| Resistência aos 7 dias  | MPa     | 21,08  |
| Resistência aos 28 dias | MPa     | 40,00* |

Nota: \* valores médios fornecidos pelo fabricante CAUE  
(<http://www.caue.com.br/Institucional/LinhaCimentos/Paginas/caue-uso-geral.aspx>).

De acordo com a ABNT NBR 11578:1991, esta categoria possui alta versatilidade de aplicação e na sua composição encontram-se escórias de alto forno. Ele possui baixo calor de hidratação e aumenta a resistência do cimento Portland comum, principalmente quanto ao ataques por sulfatos. Trata-se também do cimento com maior disponibilidade comercial na região do estudo.

#### 3.1.2 Agregados

A composição granulométrica da areia e da brita foi baseada na ABNT NBR NM 248:2003. Para classificação destes agregados foi utilizada a ABNT NBR 7211:2009.

##### 3.1.2.1 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado foi a areia de origem quartzosa da região de Maringá – PR, cuja caracterização baseou-se nos ensaios descritos nas normas: ABNT NBR NM 30:2003, ABNT

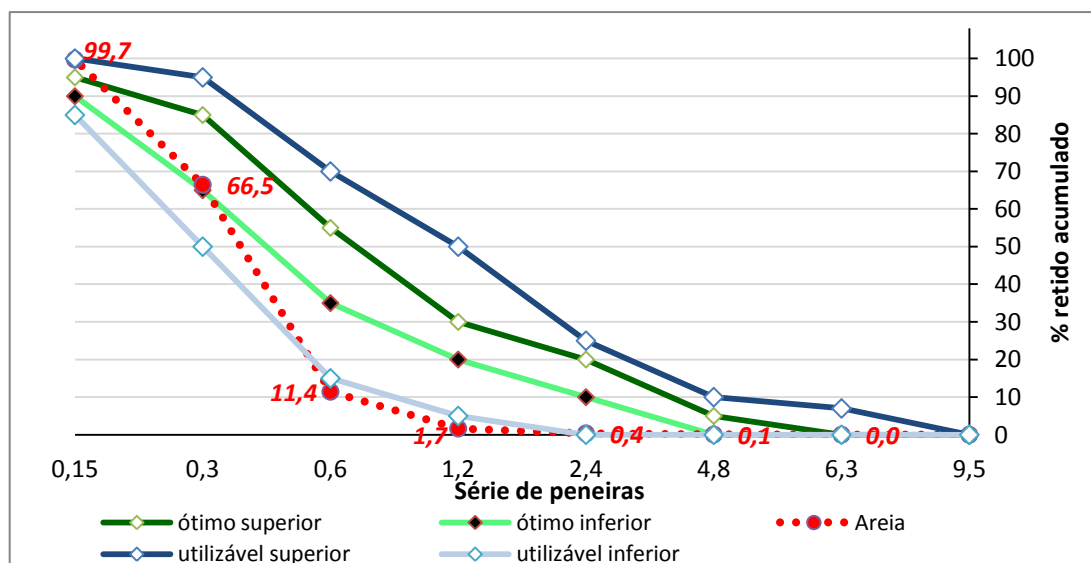
NBR NM 52:2003, ABNT NBR NM 45:2006; ABNT NBR NM 248:2003 e ABNT NBR 7211:2009. As Tabela 3 e 4 e a Figura 21 apresentam as informações geradas nos ensaios de caracterizações.

**Tabela 3 - Caracterização da areia**

| Características   | Unidade           | Valores |
|---|-------------------|---------|
| Massa Específica ( $\gamma_s$ )                         | kg/m <sup>3</sup> | 2642,5  |
| Absorção do Agregado (ABS)                              | %                 | 0,11    |
| Massa Unitária Solta (MU)                               | kg/m <sup>3</sup> | 1491,6  |
| Massa Unitária Compactada (MU)                          | kg/m <sup>3</sup> | 1656,6  |
| Diâmetro Máximo Característico ( $\phi_{m\acute{a}x}$ ) | mm                | 0,6     |
| Módulo de Finura  | %                 | 1,7     |

**Tabela 4 - Classificação da areia segundo ABNT NBR 7211:2009**

| Série de peneiras<br>(ABNT NBR NM ISO<br>3310-1) | Porcentagem, em massa, retida acumulada |            |                    |                    | Valores<br>experimentais<br>(%) |
|--|---|------------|--------------------|--------------------|---------------------------------|
|  | Limites inferiores                      |            | Limites superiores |                    |                                 |
|  | Zona<br>utilizável                      | Zona ótima | Zona ótima         | Zona<br>utilizável |                                 |
| 9,5  | 0                                       | 0          | 0                  | 0                  | 0,0                             |
| 6,3  | 0                                       | 0          | 0                  | 7                  | 0,0                             |
| 4,8  | 0                                       | 0          | 5                  | 10                 | 0,1                             |
| 2,4  | 0                                       | 10         | 20                 | 25                 | 0,4                             |
| 1,2  | 5                                       | 20         | 30                 | 50                 | 1,7                             |
| 0,6  | 15                                      | 35         | 55                 | 70                 | 11,4                            |
| 0,3  | 50                                      | 65         | 85                 | 95                 | 66,5                            |
| 0,15   | 85                                      | 90         | 95                 | 100                | 99,7                            |



**Figura 21 - Distribuição granulométrica da areia segundo ABNT NBR 7211:2009**

### 3.1.2.2 Agregado Graúdo

Para esta pesquisa foram caracterizadas e disponibilizadas duas categoria de agregados graúdos, denominadas brita “A” e brita “B”. Ambas são de origem basáltica oriunda de rochas da região de Maringá - PR, elas foram caracterizadas por meio dos ensaios descritos nas normas: ABNT NBR NM 45:2006; ABNT NBR NM 248:2003; ABNT NBR NM 53:2003; ABNT NBR NM 7211:2009. As informações que seguem na Tabelas 5 e 6 e na Figura 22 mostram os valores característicos para a brita utilizada.

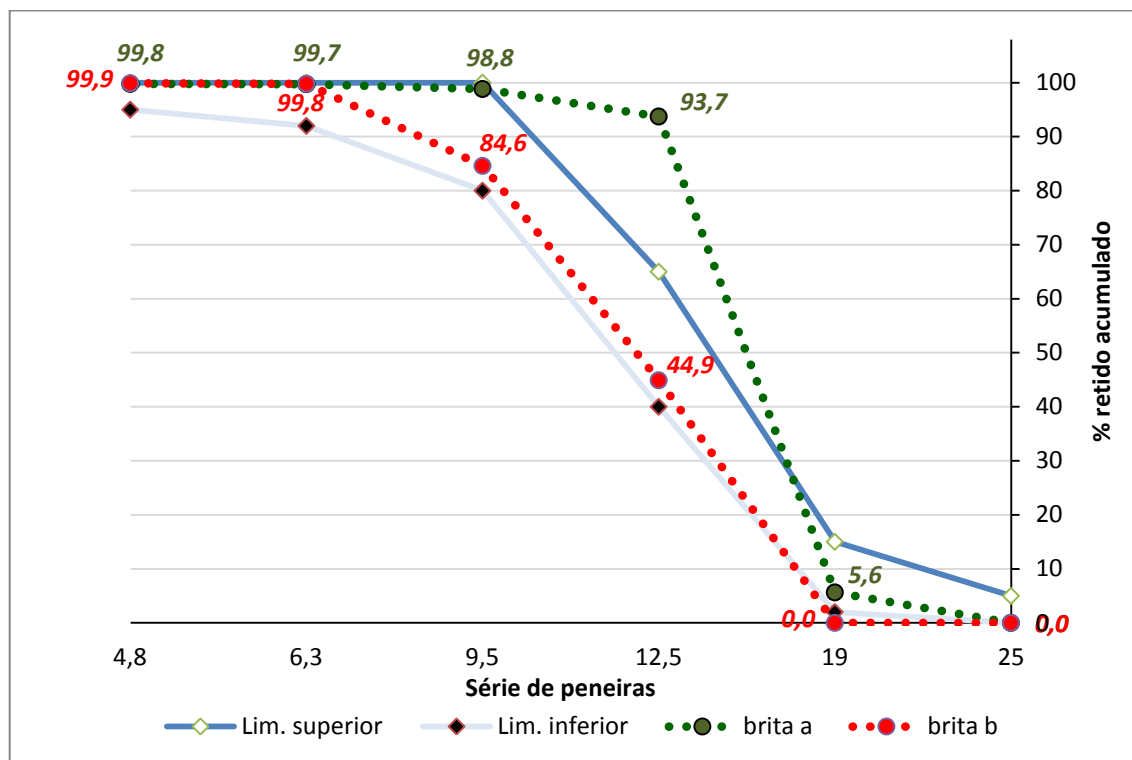
**Tabela 5 - Caracterização da brita**

| Características   | Unidade           | brita “A” | brita “B” |
|---|-------------------|-----------|-----------|
| Massa Específica ( $\gamma_s$ )                         | kg/m <sup>3</sup> | 2705,6    | 2877,1    |
| Absorção do Agregado (ABS)                              | %                 | 3,81      | 1,91      |
| Massa Unitária Solta (MU)                               | kg/m <sup>3</sup> | 1461,5    | 1464,2    |
| Massa Unitária Compactada (MU)                          | kg/m <sup>3</sup> | 1594,7    | 1649,3    |
| Diâmetro Máximo Característico ( $\phi_{m\acute{a}x}$ ) | mm                | 19        | 12,5      |
| Módulo de Finura  | %                 | 7,1       | 6,8       |

**Tabela 6 - Classificação da brita segundo ABNT NBR 7211:2009**

| Série de peneiras (ABNT NBR NM ISSO 3310-1) | Porcentagem, em massa, retida acumulada |     |        |     |         |     |       |     |         |     |         |         |
|---|---|-----|--------|-----|---------|-----|-------|-----|---------|-----|---------|---------|
|   | Zona granulométrica $d/D$               |     |        |     |         |     |       |     |         |     | brita A | brita B |
|   | 4,75/12,5                               |     | 9,5/25 |     | 19/31,5 |     | 25/50 |     | 37,5/75 |     |         |         |
| 76  |   |     |        |     |         |     |       |     | 0       | 5   | 0,0     | 0,0     |
| 64  |   |     |        |     |         |     |       |     | 5       | 30  | 0,0     | 0,0     |
| 50  |   |     |        |     |         |     | 0     | 5   | 75      | 100 | 0,0     | 0,0     |
| 38  |   |     |        |     |         |     | 5     | 30  | 90      | 100 | 0,0     | 0,0     |
| 32  |   |     |        |     | 0       | 5   | 75    | 100 | 95      | 100 | 0,0     | 0,0     |
| 25  |   |     | 0      | 5   | 5       | 25  | 87    | 100 |         |     | 0,0     | 0,0     |
| 19  |   |     | 2      | 15  | 65      | 95  | 95    | 100 |         |     | 5,6     | 0,0     |
| 12,5  | 0                                       | 5   | 40     | 65  | 92      | 100 |       |     |         |     | 93,7    | 44,9    |
| 9,5   | 2                                       | 15  | 80     | 100 | 95      | 100 |       |     |         |     | 98,8    | 84,6    |
| 6,3   | 40                                      | 65  | 92     | 100 |         |     |       |     |         |     | 99,7    | 99,8    |
| 4,8   | 80                                      | 100 | 95     | 100 |         |     |       |     |         |     | 99,8    | 99,9    |
| 2,4   | 95                                      | 100 |        |     |         |     |       |     |         |     | 99,8    | 99,9    |





**Figura 22 - Distribuição granulométrica dos agregados graúdos segundo ABNT NBR 7211:2009 para limites (9,5 - 25)mm**

### 3.1.3 Adições e Aditivos

#### 3.1.3.1 Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar (CBC)

A CBC utilizada nesta pesquisa foi coletada na Usina Santa Terezinha no distrito de Iguatemi, região do Noroeste do Paraná, próxima a cidade de Maringá. Toda a proposta de coleta, armazenamento e manejo, bem como, algumas das principais caracterizações químicas e físicas foram descritas e informadas por Nunes (2009) e Souto (2010) e utilizadas neste experimento. Utilizou-se a cinza na condição natural, tendo como único beneficiamento o peneiramento na malha 0,595mm (#30), com o objetivo de retirar as impurezas.

A análise granulométrica da CBC foi determinada pela ABNT NBR 7181:1984; ABNT NBR 6502:1995 e ABNT NBR 6508:1984 por meio do processo de sedimentação e do peneiramento fino. Com estas informações foram analisadas o Grau de Uniformidade (U) (Equação 6) e o Coeficiente de Curvatura (CC) (Equação 7). Já para a determinação da massa específica foi utilizada a ABNT NBR 6508:1984. Assim como já descrito, as demais informações que constam na Tabela 7 foram obtidas no trabalho de Nunes (2009) e Souto (2010). A Figura 23 retrata a curva granulométrica da CBC.

$$U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (6)$$

**Onde:**

U = Grau de uniformidade. Classificação de acordo com ABNT NBR 6502:1995;

$D_{10}$  = diâmetro de partículas correspondente aos 10% mais finos na curva granulométrica [mm],

$D_{60}$  = diâmetro de partículas correspondente aos 60% mais finos na curva granulométrica [mm].

**Para:**

$U < 5$  muito uniforme

$5 < U \leq 15$  uniformidade média

$U > 15$  desuniforme

$$CC = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (7)$$

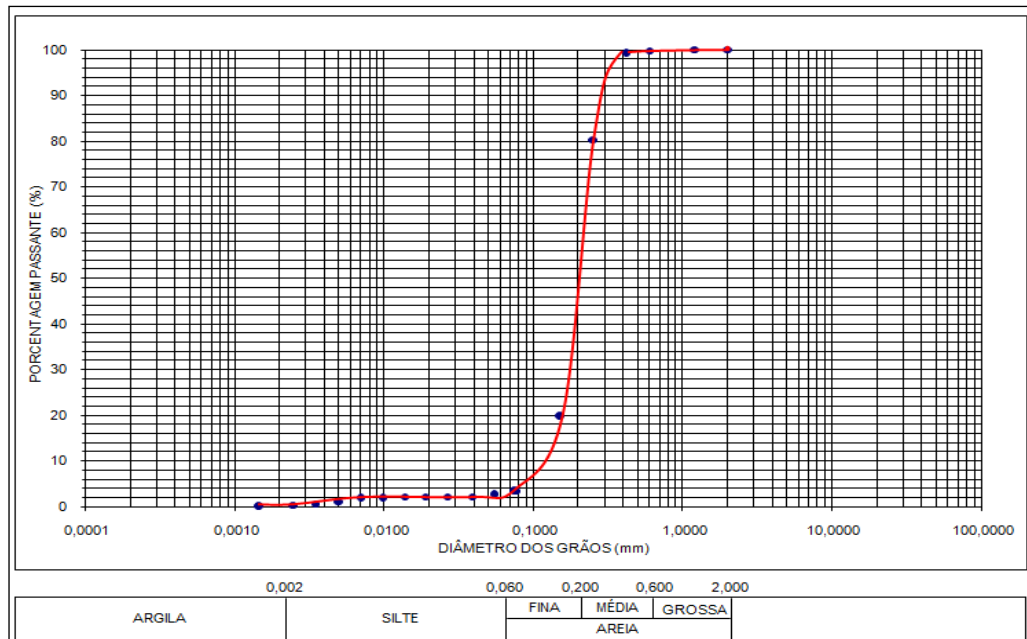
**Onde:**

CC = Coeficiente de Curvatura por Amaral (2005 apud NUNES, 2009)

$D_{30}$  = diâmetro de partículas correspondente aos 30% mais finos na curva granulométrica [mm].

**Para:**

$1 < CC < 3$  bem graduado



**Figura 23 - Curva Granulométrica da CBC de acordo com ABNT NBR 6502:1995**

**Tabela 7 - Caracterização da CBC oriunda da Usina de Iguatemi**

| Características                        | Normas empregadas   | Unidade                     | Valores   |
|--|---|-----------------------------|---|
| Grau de Uniformidade (U)               | -   | -                           | 1,62  |
| D <sub>10</sub>                        | -   | mm                          | 0,13  |
| D <sub>30</sub>                        | -   | mm                          | 0,18  |
| D <sub>60</sub>                        | -   | mm                          | 0,21  |
| Uniformidade                           | -   | -                           | Muito uniforme                                  |
| Coefficiente de Curvatura (CC)         | -   | -                           | 1,19  |
| Distribuição Granulométrica (CC)       | ABNT NBR 7181:1984  | -                           | Bem graduado                                    |
| Classificação Granulométrica           | ABNT NBR 6502:1995  | -                           | Semelhança areia                                |
| Massa Específica                       | ABNT NBR 6508:1984  | g/cm <sup>3</sup>           | 2,64  |
| Teor de Umidade                        | ABNT NBR 6508:1984  | %                           | 0,27  |
| * Área Específica                      | -   | m <sup>2</sup> /kg          | 5356  |
| * Composição mineralógica – Difração X | JCPDS-ICCD:1996   | Quartzo (SiO <sub>2</sub> ) | Altamente cristalino<br>ausência de fase amorfa |
| * Matéria Orgânica Total               | -   | %                           | 3,55  |
| * Carbono Orgânico                     | -   | %                           | 1,97  |
| * Atividade Pozolânica                 | Chapelle por Raverdy <i>et al.</i> (1980)<br>valores mínimos de 330 mg CaO/g  | mg CaO/g                    | 23  |
| *SiO <sub>2</sub>                      | * Alta teor de sílica sob a forma de<br>quartzo atribuído a baixa atividade<br>pozolânica                                   |                             |   |
| ** C                                   | ** Análise semi-quantitativa por<br>espectrometria de fluorescência de<br>raios X com tubo de 3 kW e alvo de<br>ródio (Rh). | mg/kg                       | 486   |
| ** MO                                  |   | mg/kg                       | 8,85  |
| ** CaO                                 |   | mg/kg                       | 1,02  |
| ** MgO                                 |   | mg/kg                       | 0,15  |
| ** K <sub>2</sub> O                    |   | mg/kg                       | 0,37  |
| ** P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>       |   | mg/kg                       | 0,01  |
| ** Fe                                  |   | mg/kg                       | 1375,65   |
| ** Cu                                  |   | mg/kg                       | 29,73   |
| ** Mn                                  |   | mg/kg                       | 70,96   |
| ** Zn                                  |   | mg/kg                       | 16,82   |

Nota: \* valores extraídos de Nunes (2009). \*\* valores extraídos de Souto (2010). Estes trabalhos foram realizados com o mesmo material desta pesquisa.

### 3.1.3.2 Filer Calcário Calcítico

O filer calcário escolhido foi o de origem calcítica, cujas características são apresentadas no Quadro 9. No estado do Paraná, comercialmente se encontra com maior facilidade o filer calcário de origem dolomítica. No entanto, por recomendações já discutidas no item 2.1.4.4 foi escolhido o filer de origem calcítica.

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| <b>Fabricante:</b>          | CAZANGA  |
| <b>Nome:</b>                | CALCÁRIO CALCÍTICO   |
| <b>Função:</b>              | Aplicações na indústria de construção e de alimentação animal                |
| <b>Base química:</b>        | <b>CaO:</b> mínimo de 51,8%  |
|                             | <b>MgO:</b> máximo de 1%   |
|                             | <b>Ca:</b> mínimo de 37%   |
|                             | <b>Mg:</b> máximo de 0,63%   |
| <b>Base granulométrica:</b> | 94% passante em peneira 325 <i>mesh</i> 94% menores que 45 $\mu$ m (0,045mm) |
| <b>Cor:</b>                 | Branca   |

### Quadro 9 - Informações sobre o filer calcário calcítico utilizado

Nota: valores fornecidos pelo fabricante CAZANGA (<http://www.cazanga.com.br>).

#### 3.1.3.3 Aditivo Superplastificante

O aditivo superplastificante utilizado foi GLENIUM 51, classificado como de terceira geração para concreto, possui forma líquida e é livre de cloretos. Este aditivo é geralmente utilizado para concretos de alto desempenho, onde se requer baixo fator água/cimento assim como durabilidade. O aditivo é baseado em uma cadeia de éter policarboxílico modificado que atua como dispersante do material cimentício, proporcionando superplastificação e alta redução de água, tornando o concreto com melhores características de trabalhabilidade sem alteração do tempo de pega. Suas características, fornecidas pelo fabricante, constam no Quadro 10.

|                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| <b>Fabricante:</b>                   | BASF S/A   |
| <b>Nome:</b>                         | GLENIUM 51   |
| <b>Função:</b>                       | Aditivo superplastificante de terceira geração para concreto |
| <b>Base química:</b>                 | Éter policarboxílico   |
| <b>Teor de sólido (%)</b>            | 28,5 – 31,5  |
| <b>PH:</b>                           | 5 - 7  |
| <b>Viscosidade (cps):</b>            | < 150  |
| <b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>):</b> | 1,067 – 1,107  |
| <b>Aspecto:</b>                      | Líquido  |
| <b>Solubilidade:</b>                 | Total na água  |
| <b>Cor:</b>                          | Branco turvo   |

### Quadro 10 - Informações sobre o aditivo superplastificante utilizado

Nota: Ficha técnica da BASF S/A (<http://www.basf-cc.com.br>)

#### 3.1.4 Água

Água utilizada era da rede de abastecimento da cidade de Maringá – PR, a qual possuía concordância com os requisitos da ABNT NBR 15900.

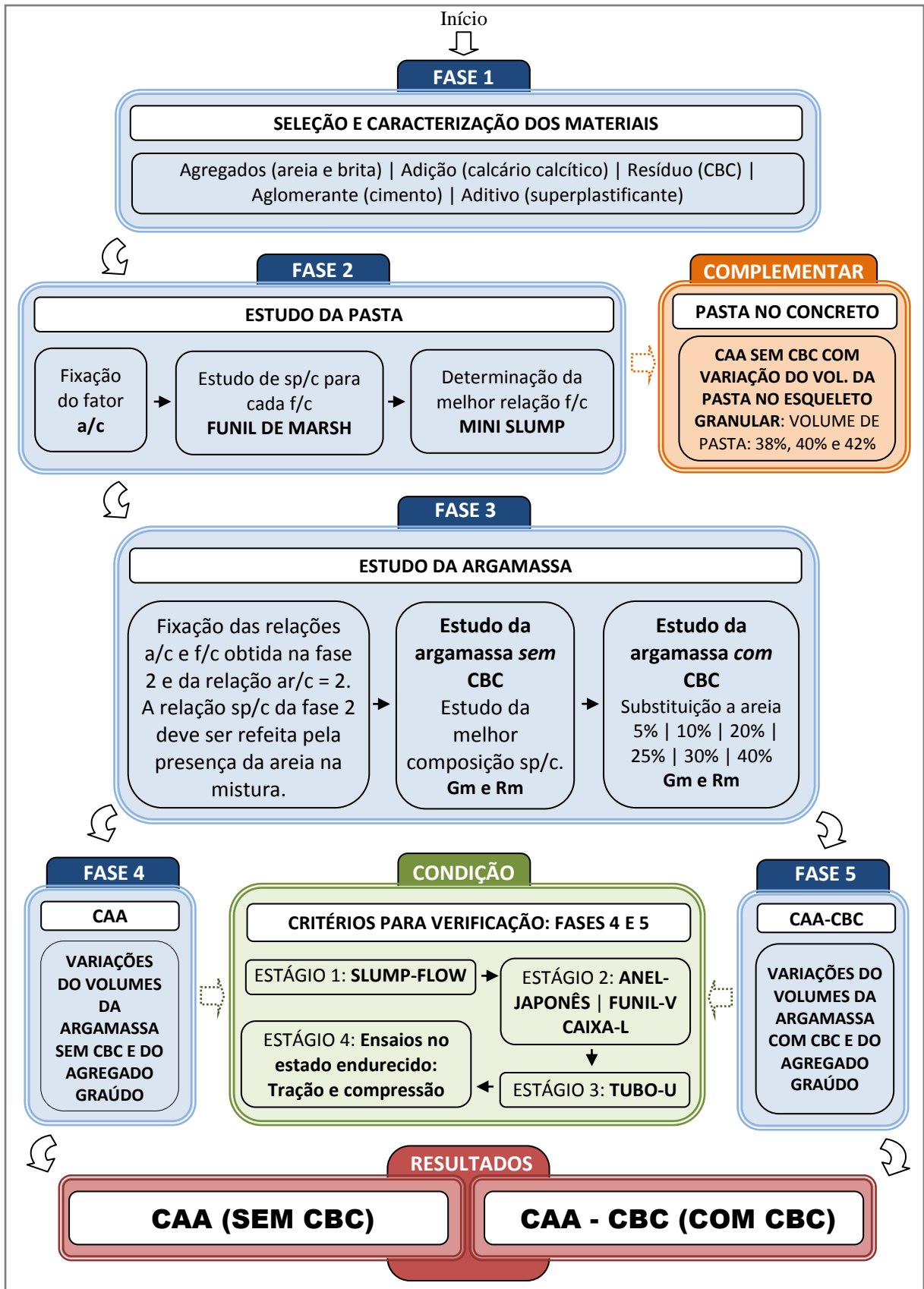
### 3.2 MÉTODO PROPOSTO PARA OBTENÇÃO DO CAA

A estrutura metodológica aplicada nesta pesquisa foi principalmente pautada na metodologia de Gomes (2002), Lisbôa (2004) e Cavalcanti (2006). As outras metodologias expostas no capítulo 2 e os trabalhos já citados, também trouxeram contribuições diretas com a proposta metodológica.

Com relação aos critérios de aprovação e classificação dos concretos como autoadensáveis, nos ensaios realizados, tanto para os concretos com ou sem CBC, foram seguidos os parâmetros da ABNT NBR 15823-1:2010, complementados pelos parâmetros de Gomes e Barros (2009), apresentados no Quadro 11. Nesta pesquisa, para a classificação de um concreto como autoadensável era necessário que o mesmo obtivesse classificação conforme em todos os ensaios realizados, por pelo menos um dos dois critérios do Quadro 11. Onde os critérios da ABNT eram os prioritários. Em particular para o ensaio do Anel-J, caso haja reprovação nos parâmetros da ABNT 15823-1:2010 *PJ 1* e *PJ 2*, o concreto pode ser aprovado neste ensaio, apenas pelo parâmetro complementar recomendado por Gomes e Barros (2009), definido como *Blocking Step - BS<sub>j</sub>* (efeito de bloqueio).

A metodologia elaborada para a obtenção do concreto autoadensável sem cinza (CAA) e para o concreto autoadensável com cinza (CAA-CBC) foi desenvolvida a partir do método apresentado por Lisbôa (2004) e Cavalcanti (2006), sendo estes métodos adaptados de Gomes (2002). Foram criadas cinco fases nesta metodologia (Figura 24). Para a aplicação deste método estudou-se a argamassa (composta por cimento, superplastificante, filer, areia e água) com características necessárias para o CAA e posteriormente a mesma combinação de fatores com a substituição parcial da areia por CBC. Em seguida, foram misturados teores de argamassa ao agregado graúdo até se atingir um concreto com características de CAA com e sem a CBC.

Também foram realizados experimentos complementares com estudo da obtenção do CAA sem CBC pela variação do volume de pasta no esqueleto granular ótimo de areia com brita, baseado no estudo de obtenção do CADAR de Gomes (2002). Esta análise complementar com a pasta, embora não pertencesse ao foco principal da metodologia, foi realizada para a obtenção de experiência e contatos iniciais com os métodos de ensaio de concreto autoadensável e para uma breve análise sobre o CAA. Na ordem cronológica da metodologia, estas avaliações complementares aconteceram após a determinação da pasta ótima.



**Figura 24 - Fluxograma da metodologia.**

Nota: As identificações em azul representam as fases da metodologia. Em laranja o relacionamento do estudo complementar com a metodologia. Em verde os critérios para verificação comum as fases 4 e 5. Em vermelho os resultados esperados pela metodologia.

### 3.2.1 Parâmetros de Verificação das Propriedades Autoadensáveis

Na sequência apresenta-se o Quadro 11 que informa os parâmetros utilizados para verificação do atendimento das características autoadensáveis do concreto, segundo a ABNT NBR 15823-1:2010 e Gomes e Barros (2009). Os procedimentos para realização dos ensaios autoadensáveis, foram descritos no subtópico 2.2.2.2.

| Método de ensaio      | Propriedade Investigada                                 | Parâmetros                              |         |                   |                       |
|-----------------------|---|---|---------|-------------------|-----------------------|
|                       |   | Classe                                  | Unidade | ABNT 15823-1:2010 | Gomes e Barros (2009) |
| TESTE DE ESPALHAMENTO | Espalhamento ( <i>Slump-flow</i> )                      | <i>SF 1</i>                             | mm      | 550 a 650         | 600 a 800             |
|                       |   | <i>SF 2</i>                             |         | 660 a 750         |                       |
|                       |   | <i>SF 3</i>                             |         | 760 a 850         |                       |
|                       | Viscosidade plástica aparente $t_{500}$ sob fluxo livre | <i>VS 1</i>                             | s       | $\leq 2$          | 2 a 7                 |
| <i>VS 2</i>           |   | s                                       | $> 2$   |                   |                       |
| ANEL-J                | Habilidade passante pelo Anel-J                         | <i>PJ 1</i>                             | mm      | 0 a 25            | -                     |
|                       |   | <i>PJ 2</i>                             | mm      | 25 a 50           | -                     |
|                       | Blocking step (efeito do bloqueio)                      | <i>BS<sub>J</sub></i>                   | mm      | -                 | 0-10                  |
| CAIXA-L               | Tempo de escoamento $T_{L20}$                           | <i>T<sub>L20</sub></i>                  | s       | -                 | $\leq 2$              |
|                       | Tempo de escoamento $T_{L40}$                           | <i>T<sub>L40</sub></i>                  | s       | -                 | $\leq 4$              |
|                       | Habilidade passante pela Caixa-L                        | <i>PL 1</i><br>(com duas barras de aço) | (H2/H1) | $\geq 0,8$        | $\geq 0,8$            |
|                       |   | <i>PL 2</i><br>(com três barras de aço) | (H2/H1) | $\geq 0,8$        | $\geq 0,8$            |
| FUNIL-V               | Viscosidade plástica aparente pelo Funil-V              | <i>VF 1</i>                             | s       | $< 9$             | 6 a 15                |
|                       |   | <i>VF 2</i>                             | s       | 9 a 25            |                       |
| TUBO-U                | Resistência à segregação pela análise do Tubo-U         | <i>RS</i>                               | %       | -                 | $\geq 0,9$            |

**Quadro 11 - Faixa de parâmetros para os ensaios de auto-adensamento**

Fonte: Adaptado de Gomes e Barros (2009) e ABNT NBR 15823-1:2010

Nota: Quando a propriedade investigada tiver recomendação tanto da ABNT NBR 15823-1:2010 quanto de Gomes e Barros (2009), segue-se como primeiro critério, o parâmetro da ABNT.

### 3.2.2 Materiais, Procedimentos e Roteiro para a Geração do CAA

Os recursos utilizados para o desenvolvimento do CAA foram: 1 betoneira de 400 litros (Figura 25), 1 carro-de-mão, 1 concha metálica, 1 balança com capacidade de  $100\text{kg} \pm 20\text{g}$ , 20 moldes cilíndricos (10x20)cm (Figura 26), 1 balança de precisão com capacidade de  $5\text{kg} \pm 0,01\text{g}$ , recipientes para medir e coletar os materiais e 2 pessoas para operacionalização.



**Figura 25 – Betoneira de 400 litros usada na preparação do concreto.**

Nota: os materiais ou equipamentos que não aparecem serão apresentados em outras Figuras.

Antes de iniciar a mistura dos materiais na betoneira, realiza-se a medição de umidade ( $H$ ) dos agregados que devem ser secados ao ar livre. Mede-se o  $H_{br}$  com 24h horas de antecedência por meio da ABNT NBR 9939:1987 e o  $H_{ar}$  com 30 minutos de antecedência por meio da ABNT NBR 9775:1987. A sequência de mistura dos materiais na betoneira está descrita abaixo:

1. Lançar água (máximo 1 litro) no interior da betoneira, ligada, com o intuito de umedecer como em um processo de imprimação. Após remover o excesso de água evitando acúmulos nas partes internas;
2. Colocar a areia, a brita e a água de absorção dos agregados na betoneira e misturar por 30 segundos;
3. Em seguida, lançar o cimento e o filer aos agregados e misturar por mais 30 s;
4. Em terceiro lugar adicionar a água correspondente a 90%\* do total e mistura-se por 1,5 minutos;
5. Por último acrescentar o superplastificante e a água restante (10%\*) e misturar por 2 minutos.

Nota: \* estas porcentagens consideram inclusive a água de absorção dos agregados. Portanto, ela deve ser subtraída do total, pois a mesma já foi adicionada na etapa 1.



O roteiro de produção possui tempo total de 5 minutos de operação da betoneira. Entre as etapas 1 e 2 e entre as etapas 2 e 3 a betoneira é desligada por no máximo 15 segundos para adição dos materiais, nos demais intervalos não há interrupções. A quantidade a ser produzida em cada lote segue os critérios descritos nas sequências “A” e “B”. Esta quebra em duas sequências busca a economia e otimização do processo e dos materiais. Ou seja, em caso de reprovação da primeira amostra (sequência “A”) não se realiza a produção da sequência “B”.

**Sequência A** - Produção de 0,020 m<sup>3</sup> (20 litros) de concreto para investigações preliminares:

1. Avaliação pelo Slump Flow,
2. Avaliação pelo Anel-Japonês no Slump,
3. Avaliação na Caixa-L,
4. Avaliação pelo Funil-V.

**Condição:** Aprovações nestes ensaios (sequência A) remete a uma nova produção do traço pela sequência “B”. Reprovações remetem a avaliação do novo traço definido nos critérios das fases de produção de CAA sem e com CBC.

**Sequência B** - Produção de 0,60 m<sup>3</sup> (60 litros) de concreto para avaliar todas as características autoadensáveis e as propriedades mecânicas do concreto:

1. Avaliação pelo Slump Flow,
2. Avaliação pelo Anel-Japonês no Slump,
3. Avaliação na Caixa-L,
4. Avaliação pelo Funil-V,
5. Avaliação pelo Tubo “U”,
6. Produção de 6 corpos de prova (10x20)cm para investigações de tração e compressão aos 28 dias. Os corpos de prova serão moldados sem nenhuma energia de compactação. Será utilizada um prensa de 100 toneladas (Figura 27). Os resultados bem como a condução dos ensaios no estado endurecido serão regidos pelas normas ABNT NBR 5739:2007 (compressão) e ABNT NBR 7222:2011 (compressão diametral - tração).

**Condição:** Aprovação nestes ensaios (sequência “B”) permite a investigação do concreto gerado na sua fase endurecida (item “6”). Desta forma, os corpos de prova produzidos serão levados à câmara úmida para a cura e ensaios de compressão diametral (tração) e compressão axial aos 28 dias.

Na Figura 26, são apresentadas, as fôrmas, o processo de lançamento do CAA nas fôrmas, a concretagem em repouso aguardando a desmoldagem e o aspecto final dos corpos de prova.



(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 26 – Moldagem e desmoldagem dos corpos de prova**

Nota: (a) moldes (10 x 20)cm para os corpos de prova, (b) lançamento contínuo do concreto sem energia de compactação, (c) descanso dos corpos de provas, (d) corpos de prova desmoldados.



(a)



(b)



(c)

**Figura 27 - Prensa hidráulica de 100 toneladas para os ensaios de compressão axial e compressão diametral**

Nota: (a) prensa hidráulica de 100 t, (b) ensaio de compressão ABNT NBR 5739:2007 e (c) ensaio de compressão diametral ABNT NBR 7222:2011.

As informações descritas no item 3.2.3 demonstram as fases realizadas na metodologia desta pesquisa.

### 3.2.3 Detalhamento da Metodologia

As informações detalhadas a seguir seguem a lógica apresentada na Figura 24. A proposta foi estruturada em cinco fases.

#### 3.2.3.1 Seleção e Caracterização dos Materiais – **Fase 1**

No item 3.1 foram apresentados os materiais utilizados neste trabalho. Foram então relacionadas as normas da ABNT utilizadas para caracterizar a brita, a areia, o cimento e a CBC. Também foram utilizadas para caracterizar a CBC informações extraídas do trabalho de Nunes (2009) e Souto (2010). Para caracterizar os materiais industrializados: filer calcário calcítico e o aditivo superplastificante (GLENIUM 51) foram utilizadas informações fornecidas pelos fabricantes.

#### 3.2.3.2 Estudo da Pasta – **Fase 2**

A proposta elaborada para obtenção da melhor pasta para a produção do CAA, objetiva a otimização da proporção de quatro itens fundamentais: a relação água/cimento (a/c), a relação filer/cimento (f/c), a relação superplastificante/cimento (sp/c) e por fim a relação água/finos (a/f). Nesta lógica, experimenta-se esta proposta por meio de dois ensaios: o “Método do funil de Marsh” e o “Ensaio do Mini-cone” pela análise e determinação do ponto de saturação. Todos estes procedimentos foram propostos por Gomes (2002) e descritos no item 2.3.3.

Assim como relacionado por Aïtcin (2000, p. 202), não é recomendado o estudo da relação superplastificante/cimento com uma pasta muito fluida, ou que seja muito densa, pelo fato de que nestas condições os problemas de compatibilidade ficariam ocultos. A lógica deste experimento teve base na concepção do método demonstrado por Aïtcin (2000) e também por Gomes (2002).

Nesta pesquisa, foi utilizado um funil (Figura 28) com as características técnicas descritas pela ABNT NBR 7682:1983, cujo diâmetro do orifício inferior é de 10mm. A determinação do fator a/c teve algumas alterações com relação à proposta de Aïtcin (2000), em virtude da diferença do diâmetro do orifício inferior do funil. Nota-se que no experimento de Aïtcin (2000), a área da vazão do orifício inferior foi de 19,6mm<sup>2</sup> (diâmetro de 5mm), no funil utilizado esta área é de 78,5mm<sup>2</sup> (diâmetro de 10mm) numa proporção de 1:4. Desta maneira,

os tempos de referências propostos por Aïtcin (2000) para a pasta de cimento (água + cimento + superplastificante), foram adaptados nesta proporção onde o tempo mínimo admissível adotado foi de 15s e o tempo máximo admissível de 22,5s. Na Figura 28, pode-se visualizar o funil de Marsh utilizado e os béqueres de escoamento aferidos em 1 litro.



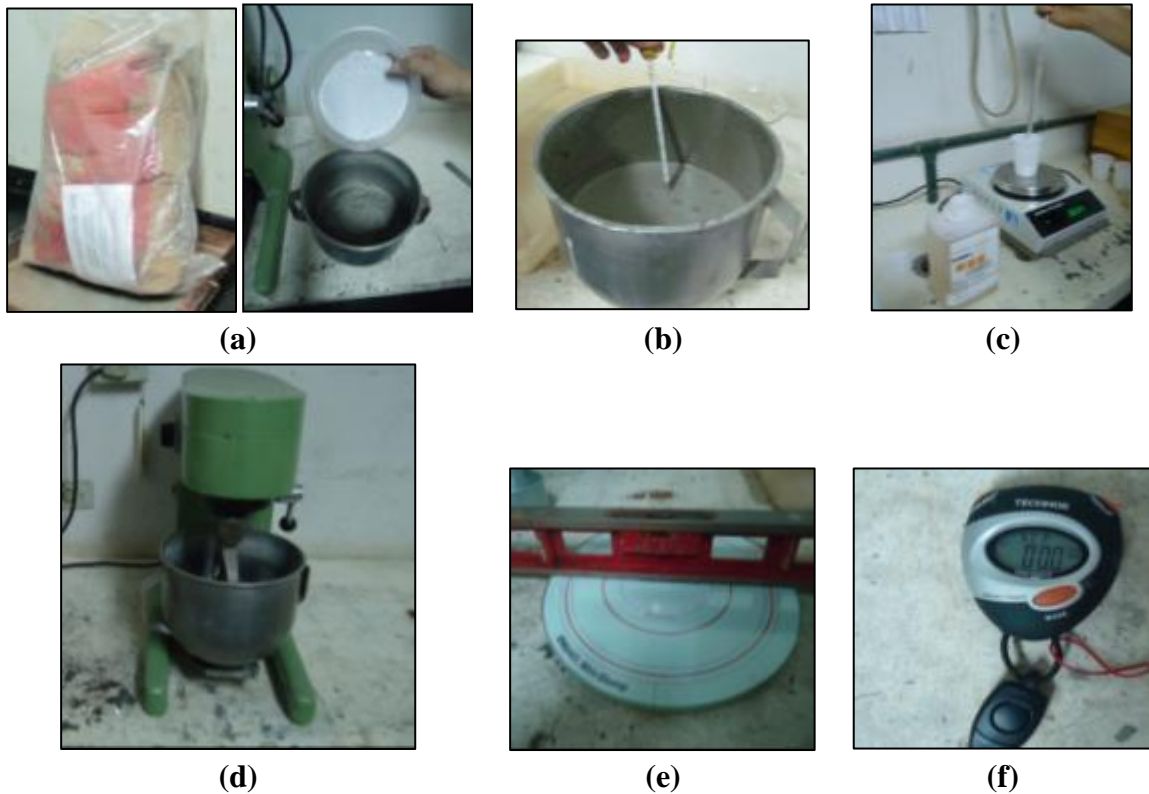
**Figura 28 - Funil de Marsh com suporte e béqueres utilizados**

As dimensões do mini-cone foram fielmente confeccionadas como demonstrado na Figura 16. Na Figura 29 e na Figura 30, podem ser visualizados os demais dispositivos utilizados. A placa de escoamento de vidro foi montada de tal forma que a primeira marcação em vermelho (do centro para a extremidade) representa um anel de diâmetro 115 mm para registro do  $T_{115}$  e, a marcação mais externa representa o diâmetro de 180 mm para orientar o espalhamento final. Esta placa era composta por uma placa de vidro circular de espessura de 5 mm, com diâmetro total de 210 mm, sendo colado um adesivo com as dimensões na face inferior da placa.



**Figura 29 - Mini-cone e placa de vidro utilizados**

Esta etapa da metodologia foi desmembrada em duas sub-etapas diretamente relacionadas: a determinação da relação  $a/c$  e determinação da melhor relação  $sp/c$  para cada faixa de  $f/c$  e consequente obtenção da relação água/finos ( $a/f$ ). Os sacos de cimento e de filer de 50 kg foram embalados com plástico impermeáveis para auxiliar no controle de umidade destes materiais.



**Figura 30 - Dispositivos e materiais utilizados no preparo da pasta**

Nota: (a) cimento CP II E-32 CAUE e o filer calcário calcítico Cazanga. (b) termômetro e a bandeja do misturador. (c) o superplastificante GLENIUM 51 e a balança Mettler PC 2000. (d) o misturador EMIC de duas rotações. (e) o nível e a placa de vidro e (f) cronômetro TECHNOS.

### 3.2.3.2.1 Determinação do fator $a/c$

A relação  $a/c$  ótima foi determinada pelo ensaio do funil de Marsh com parâmetros auxiliares de avaliação pelo ensaio do mini-cone. Para todas as etapas descritas torna-se necessário nivelar e limpar adequadamente os dispositivos e acessórios utilizados. Para determinação do fator  $a/c$  foi adotada a seguinte metodologia de ensaios:

1. Preparar uma amostra de pelos menos 1,2 litros de pasta no misturador mecânico para submeter ao escoamento no Funil de Marsh e no Mini-cone;
2. Para a determinação da relação  $a/c$  ótima foram fixados os valores de  $sp/c$  em 1% e  $f/c$  em 0,5;

3. Para isso utilizou-se os seguintes materiais: 1500g de cimento, 15g de superplastificante (sp/c de 0,01) e 750g do filer calcário calcítico (f/c de 0,5) e água de acordo com o fator a/c adotado;
4. Homogeneizar o cimento e o filer no recipiente do misturador por cerca de 20 segundos com o auxílio de uma espátula;
5. Adotar como ponto de partida uma das faixas experimentais de a/c propostas na Tabela 8. Lembrando que do total da água deverá ser descontada a água contida no superplastificante, que neste caso é de 70%. Os valores para a/c são experimentados na faixa de 0,35 a 0,50\*;
6. Adicionar 80% de água a mistura de cimento e filer no recipiente do misturador e ligar o equipamento durante 60s. Adota-se a velocidade mais lenta do misturador para as etapas de 4 a 9;
7. Parar o misturador e limpar a pasta aderente no recipiente e pá com o uso de uma espátula. Esta operação deve ser realizada em 30s;
8. Ligar novamente o misturador por mais 60s,
9. Realizar novamente a remoção da pasta aderente ao misturador em no máximo 30s;
10. Acrescentar o superplastificante, na relação sp/c 0,01 (15g) com os 20% de água restantes,
11. Misturar a pasta por mais 2 minutos totalizando assim 5 minutos de preparação,
12. Lançar um volume  $V = 1,2$  litros da pasta no funil com orifício inferior fechado,
13. Abrir o orifício e medir quanto tempo levará para escoar um  $v = 1$  litro no bécquer posicionado abaixo do funil previamente marcado e calibrado neste volume,
14. Medir a temperatura da pasta, a qual deve estar na faixa de 20°C a 23°C;
15. Determinar a melhor relação a/c que proporcione o menor tempo de escoamento para o volume de 1 litro de pasta, e que este tempo esteja na faixa de 15 a 22,5 segundos;
16. Os procedimentos 12 e 13 são realizados três vezes com o intuito de obter três medidas em um intervalo máximo de 2 minutos;
17. Utilizar a amostra contida no bécquer para realização do teste de mini-slump;
18. Com o mini-cone posicionado no centro da placa de escoamento depositar a pasta até o preenchimento completo do mini-cone;
19. Levantar o cone de forma suave e padronizada e medir o tempo que a pasta leva para alcançar a marca de 115mm (T115) e o seu espalhamento final na placa de vidro.

\* A determinação da faixa de a/c de 0,35 a 0,50 objetivava o possível desenvolvimento de concretos com resistências superiores a 30 MPa e consequente atendimento equivalente à classe III de Agressividade Ambiental da ABNT NBR 6118:2007.

**Tabela 8 - Quantidade de água a considerar para acréscimo na mistura**

|   | a/c   | f/c | sp/c (%) | Cimento (g) | Filer (g) | Aditivo (g) | Água 80% | Água 20% |
|---|-------|-----|----------|-------------|-----------|-------------|----------|----------|
| 1 | 0,35  | 0,5 | 1        | 1500        | 750       | 15          | 420      | 94,5     |
| 2 | 0,375 | 0,5 | 1        | 1500        | 750       | 15          | 450      | 102      |
| 3 | 0,40  | 0,5 | 1        | 1500        | 750       | 15          | 480      | 109,5    |
| 4 | 0,425 | 0,5 | 1        | 1500        | 750       | 15          | 510      | 117      |
| 5 | 0,45  | 0,5 | 1        | 1500        | 750       | 15          | 540      | 124,5    |
| 6 | 0,475 | 0,5 | 1        | 1500        | 750       | 15          | 570      | 132      |
| 7 | 0,50  | 0,5 | 1        | 1500        | 750       | 15          | 600      | 139,5    |



### 3.2.3.2.2 Determinação da dosagem ótima de sp/c para cada faixa de f/c

Com a determinação do valor inicial de a/c torna-se possível experimentar as proporções de sp/c para cada faixa de f/c. Para todas as etapas descritas torna-se necessário nivelar e limpar adequadamente os dispositivos e acessórios utilizados. Para determinação das relações sp/c e f/c foi adotada a seguinte metodologia de ensaios:

1. Preparar uma amostra de pelos menos 1,2 litros de pasta em um misturador mecânico para submeter ao escoamento no Funil de Marsh;
2. Estabelecer faixas experimentais para relação f/c. Neste trabalho foram adotadas as seguintes relações: 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 e 0,5 em massa. Para cada relação de f/c, experimentar relações de sp/c 0,002, 0,004, 0,006, 0,008, 0,010 e 0,012 em massa. Desta maneira têm-se 30 experimentos. Na Tabela 9 têm-se os valores para um a/c de 0,5 e f/c 0,5;
3. Materiais: cimento, água de acordo com o fator a/c adotado, filer calcário calcítico conforme evolução proposta e seu respectivo fator sp/c adotado. Adotar quantidade de cimento compatível com a capacidade de mistura do equipamento prevendo a entrada dos outros componentes (filer, superplastificante e água);
4. Adotar a água pela relação a/c determinada no item 3.2.3.2.1 deste trabalho;
5. Homogeneizar o cimento e o filer no recipiente do misturador por 20s com espátula;
6. Adicionar 80% da água e ligar o misturador durante 60s. Adota-se a velocidade lenta do misturador para as etapas de 6 a 11;
7. Parar o processo de mistura e limpar a pasta aderente no recipiente e pá do misturador com o uso de uma espátula. Esta operação deve ser realizada em até 30s;
8. Ligar novamente o misturador por mais 60s;
9. Realizar novamente a remoção da pasta aderente ao misturador em no máximo 30s;
10. Acrescentar os 20% da água restante juntamente com o superplastificante;
11. Misturar a pasta por mais 2 minutos totalizando assim 5 minutos de preparação;
12. Lançar um volume  $V = 1,2$  litros da pasta no funil com orifício inferior fechado;
13. Abrir o orifício e medir quanto tempo levará para escoar um volume  $v = 1$  litro no béquer posicionado abaixo do funil previamente marcado neste volume;
14. Os procedimentos 12 e 13 são realizados três vezes com o intuito de obter três medidas;
15. Medir a temperatura da pasta, a qual deve estar na faixa de 20 a 23°C;
16. Utilizar a amostra contida no béquer para realização do teste de mini-slump;
17. Com o mini-cone posicionado no centro da placa de escoamento depositar a pasta até o preenchimento completo do mini-cone;
18. Levantar o cone de forma suave e padronizada e medir o tempo que pasta leva para alcançar a marca de 115mm ( $T_{115}$ ) e o seu espalhamento final na placa de vidro.



**Tabela 9 - Proporções dos materiais para um a/c = 0,5 e f/c = 0,5**

| a/c | f/c | sp/c (%) | Cimento (g) | Filer (g) | Aditivo (g) | Água 80% | Água 20% |       |
|-----|-----|----------|-------------|-----------|-------------|----------|----------|-------|
| 1   | 0,5 | 0,5      | 0,2         | 1500      | 750         | 3        | 600      | 147,9 |
| 2   |     |          | 0,4         | 1500      | 750         | 6        | 600      | 145,8 |
| 3   |     |          | 0,6         | 1500      | 750         | 9        | 600      | 143,7 |
| 4   |     |          | 0,8         | 1500      | 750         | 12       | 600      | 141,6 |
| 5   |     |          | 1,0         | 1500      | 750         | 15       | 600      | 139,5 |
| 6   |     |          | 1,2         | 1500      | 750         | 18       | 600      | 137,4 |

Com os tempos medidos para cada relação sp/c gera-se o gráfico dos valores de sp/c versus o tempo de escoamento em Log(t). Com este gráfico, otimiza-se a quantidade de aditivo para cada proporção de f/c. Esta relação ótima indica o ponto pelo qual a dosagem de superplastificante não provoca nenhuma melhora significativa na fluidez da pasta. Desta maneira, determina-se o ponto de saturação pela relação de sp/c, correspondente a um ângulo interno de  $140^\circ \pm 10^\circ$  em cada linha de variação do f/c (GOMES, 2002).

### 3.2.3.2.3 Estudo complementar da variação do volume de pasta na composição ótima do esqueleto granular

Para o desenvolvimento do estudo complementar do CAA a partir da variação do volume da pasta, foi necessário realizar o estudo do esqueleto granular e posteriores metodologias para os cálculos de dosagem necessários.

#### a) Estudo do Esqueleto Granular

Nesta etapa determina-se a melhor relação da areia com a brita ar/br no estado solto. A melhor combinação será aquela com a maior Massa Unitária (MU) em  $\text{kg/m}^3$  e, conseqüentemente o menor índice de vazio (IV) na combinação dos dois agregados. A proposta foi baseada na metodologia de Gomes (2002) e na ABNT NBR NM 45:2006. Na Figura 31 são demonstrados os materiais e recursos usados nos ensaios.



**Figura 31 - Dispositivos utilizados no preparo da Massa Unitária**

Nota: (a) balança digital de capacidade 100kg e variação de 20g e (b) recipiente cilíndrico de aço de 15 litros com peso de 8kg, concha metálica e régua niveladora.

Na Tabela 10 são apresentadas as faixas utilizadas na variação entre a brita e a areia. Lembrando que o ponto de partida foi de 100% de brita até o final de 100% de areia. As experimentações entre os dois agregados iniciam-se na proporção 100% / 0% (br/ar) para 50% / 50% (br/ar). Após, na segunda sequência inicia-se de 0% / 100% de br/ar até alcançar a condição amostral 40% / 60% (br/ar). A lógica é proposta desta maneira para que seja utilizada a menor quantidade de areia e brita para realização das 11 faixas experimentais.

**Tabela 10 - Faixas experimentais entre areia e brita**

| Sequência experimental | Composição em % |       | Quantidade de brita (kg) | Quantidade de areia (kg) | Acréscimo de brita (kg) | Acréscimo de areia (kg) |
|------------------------|-----------------|-------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                        | Brita           | Areia |                          |                          |                         |                         |
| 1°                     | 100             | 0     | 30,00                    | 0,00                     | 0,00                    | 0,00                    |
| 2°                     | 90              | 10    | 30,00                    | 3,33                     | 0,00                    | 3,33                    |
| 3°                     | 80              | 20    | 30,00                    | 7,50                     | 0,00                    | 4,17                    |
| 4°                     | 70              | 30    | 30,00                    | 12,86                    | 0,00                    | 5,36                    |
| 5°                     | 60              | 40    | 30,00                    | 20,00                    | 0,00                    | 7,14                    |
| 6°                     | 50              | 50    | 30,00                    | 30,00                    | 0,00                    | 10,00                   |
| 11°                    | 40              | 60    | 20,00                    | 30,00                    | 7,14                    | 0,00                    |
| 10°                    | 30              | 70    | 12,86                    | 30,00                    | 5,36                    | 0,00                    |
| 9°                     | 20              | 80    | 7,50                     | 30,00                    | 4,17                    | 0,00                    |
| 8°                     | 10              | 90    | 3,33                     | 30,00                    | 3,33                    | 0,00                    |
| 7°                     | 0               | 100   | 0,00                     | 30,00                    | 0,00                    | 0,00                    |

O procedimento de ensaio realizado para determinar o esqueleto granular teve as seguintes etapas:

1. Preparar duas amostras individuais de 50kg de brita e 50kg de areia,
2. Estas amostras devem estar secas e homogeneizadas por processo de misturas durante 3 minutos sobre superfície seca e limpa,
3. Separar as amostras de brita e areia em duas amostras menores de 30kg e 20kg para cada material totalizando 4 amostras,
4. Iniciar a experimentação proposta para os lotes da 1ª a 6ª faixas conforme Tabela 10,
5. Colocar a amostra sobre uma lona ou superfície seca e limpa,
6. Misturar a composição durante 1 minuto,
7. Com o auxílio de uma concha metálica depositar sem compactar, o material no cilindro. Conferir o nível máximo de preenchimento do cilindro até o limite de sua borda, com uma haste metálica,
8. Pesar a massa de material contida e anotar em uma planilha,
9. Para cada experimentação são realizados três ciclos completos com três leituras de massa,
10. Devolver o material para homogeneização e acrescentar o complemento de material conforme Tabela 10,
11. Descartar o material e selecionar a segunda amostra de cada material,
12. Repetir o procedimento 5 a 10 até completar a 6ª faixa,
13. Iniciar a experimentação proposta para os lotes da 7ª a 11ª faixas conforme Tabela 9,
14. Para este lote serão necessárias a amostra de 20kg de brita e a amostra de 30kg de areia,
15. Repetir o procedimento 6 a 11 até completar a 11ª faixa.

Os cálculos necessários para Massa Unitária (MU) foram realizados para cada faixa experimental de acordo com a Equação 8. Foram utilizados os valores médios obtidos pelas três leituras para a massa de cada composição. Com os resultados obtidos projeta-se um gráfico da relação da MU (eixo das ordenadas) pela variação da areia e ou brita ou ambos no eixo das abscissas.

$$MU = \frac{M}{V_r} \quad (8)$$

**Onde:**

MU = Massa Unitária em kg/m<sup>3</sup>,

M = Massa da composição em kg,

V<sub>r</sub> = Volume do recipiente em m<sup>3</sup>.

Para o cálculo dos Índices de Vazios (IV) utilizam-se a Equação 9 e a Equação 10. Na Equação 9 são calculados o Volume de Sólidos (V<sub>S</sub>) para cada faixa. No segundo momento com o auxílio da Equação 10, calculam-se os valores dos IV. Com os resultados obtidos plota-

se um gráfico da relação do IV (eixo das ordenadas) pela variação da areia e ou brita ou ambos no eixo das abscissas.

$$V_s = \left( \frac{M \times \%_{ar}}{\rho_{ar}} + \frac{M \times \%_{br}}{\rho_{br}} \right) \times 100 \quad (9)$$

**Onde:**

$V_s$  = Volume dos sólidos em  $m^3$ ,

$M$  = Massa da composição em kg,

$\rho_{ar}$  = Massa específica da areia em  $kg/m^3$ ,

$\rho_{br}$  = Massa específica da brita em  $kg/m^3$ ,

$\%_{ar}$  = Percentual de areia na faixa,

$\%_{br}$  = Percentual de brita na faixa.

$$IV = \left( \frac{V_r - V_s}{V_r} \right) \times 100 \quad (10)$$

**Onde:**

$IV$  = Índice de vazios em porcentagem,

$V_r$  = Volume do recipiente (volume total) em  $m^3$ ,

$V_s$  = Volume de sólidos em  $m^3$ .

#### b) Desenvolvimento do CAA

Com os resultados obtidos nos estudos da pasta, em especial a obtenção da quantidade de superplastificante, e a proporção de agregados no esqueleto granular, pode-se determinar a composição dos concretos a serem produzidos e as suas respectivas análises no estado fresco e no estado endurecido.

No entanto, torna-se necessário desenvolver a dosagem da quantidade de pasta a ser empregada na composição do concreto a fim de verificar as suas propriedades almejadas no estado fresco de autoadensibilidade. Assim, como realizado nos estudo de Lisbôa (2004) e Cavalcanti (2006) foram propostas as produções de concretos com três proporções de volume de pasta (38%, 40% e 42%) na sua composição em relação ao volume total (Equação 11).

#### c) Dosagem dos materiais no CAA

Para calcular o quantidade dos materiais no CAA utilizam-se as equações de 11 a 20 e os fatores  $sp/c$  e  $f/c$  determinados no estudo da pasta de cimento. No primeiro momento, com a

Equação 11, determina-se os volumes dos agregados, baseando-se no volume assumido para o volume de pasta ( $V_p$ ) de 38%, 40% e 42% para as respectivas e individuais análises.

$$V_{ar} + V_{br} + V_p = 1m^3 \text{ de concreto} \quad (11)$$

Onde:

$V_{ar}$  = Volume de areia em  $m^3$ ,

$V_p$  = Volume de pasta em  $m^3$ .

$V_{br}$  = Volume de brita em  $m^3$ ,

Com o auxílio da Equação 12, determina-se a massa de cimento (kg) para a produção de  $1 m^3$  de concreto. Todas as demais massas de materiais calculadas ( $M_{br}$ ,  $M_{ar}$  e  $A_{ad}$ ) com a utilização respectiva das equações: 13, 14, 15, 16, 17 e 18 também estão relacionadas com a produção de  $1 m^3$  de concreto.

$$M_c = \frac{\rho_p \times V_p}{1 + a/c + f/c + sp/c} \quad (12)$$

Onde:

$M_c$  = Massa de cimento em kg para  $1 m^3$  de concreto,

$a/c$  = Fator água/cimento,

$f/c$  = Fator filler/cimento,

$\rho_p$  = Massa específica da pasta em  $kg/m^3$ ,

$sp/c$  = Fator superplastificante/cimento

$V_p$  = Volume da pasta em  $m^3$ ,

Na sequência, com o auxílio das Equações 13 e 14, calculam-se as massas da brita e da areia para  $1 m^3$  de concreto. Neste momento elas ainda não são computadas com os pesos corrigidos.

$$M_{br} = \frac{(1 - V_p)}{\frac{ar/br}{\rho_{ar}} + \frac{1}{\rho_{br}}} \quad (13)$$

$$M_{ar} = \frac{ar/br \times (1 - V_p)}{\frac{ar/br}{\rho_{ar}} + \frac{1}{\rho_{br}}} \quad (14)$$

Onde:

$M_{br}$  = Massa da brita em kg,

$\rho_{br}$  = Massa específica da brita em  $kg/m^3$ ,

$M_{ar}$  = Massa da areia em kg,

$ar/br$  = Fator areia/brita,

$\rho_{ar}$  = Massa específica da areia em  $kg/m^3$ ,

$V_p$  = Volume da pasta em  $m^3$ .

**Obs.:** os valores em massa expressos em kg ( $M_{br}$  e  $M_{ar}$ ) representam as quantidades destes materiais para a produção de  $1 m^3$  de concreto.

Para o consumo de água por m<sup>3</sup> na composição aplica-se a Equação 15 para obter a totalidade da adição. Nela são considerados o desconto da água presente no superplastificante e os eventuais acréscimos ou decréscimos pela água existente nos agregados (umidade) versus sua capacidade de absorção. No procedimento experimental, a atribuição acontece em três momentos. No primeiro momento, lança-se a água de absorção total ( $A_{ad01}$ ) dos agregados (Equação 16). No segundo momento emprega-se a Equação 17 ( $A_{ad02}$ ). Por fim, por meio da Equação 18 calcula-se o complemento final ( $A_{ad03}$ ).

$$A_{ad} = \left( (a/c \times M_c) - M_{sp} \left( \frac{A_{sp}}{100} \right) + M_{br} \left( \frac{ABS_{br} - H_{br}}{100} \right) + M_{ar} \left( \frac{ABS_{ar} - H_{ar}}{100} \right) \right) \quad (15)$$

$$A_{ad01} = \left( M_{br} \left( \frac{ABS_{br} - H_{br}}{100} \right) + M_{ar} \left( \frac{ABS_{ar} - H_{ar}}{100} \right) \right) \quad (16)$$

$$A_{ad02} = \left( (a/c \times M_c) - M_{sp} \left( \frac{A_{sp}}{100} \right) \right) \times 0,90 \quad (17)$$

$$A_{ad03} = \left( (a/c \times M_c) - M_{sp} \left( \frac{A_{sp}}{100} \right) \right) \times 0,10 \quad (18)$$

**Onde:**

$A_{ad}$  = Água total adicionada em kg,

$A_{ad01}$  = Primeira parcela de água adicionada em kg,

$A_{ad02}$  = Segunda parcela de água adicionada em kg,

$A_{ad03}$  = Terceira parcela de água adicionada em kg,

$a/c$  = Fator água/cimento,

$M_c$  = Massa de cimento em kg,

$M_{sp}$  = Massa do aditivo em kg,

$A_{sp}$  = Percentual de água no aditivo,

$M_{br}$  = Massa da brita em kg,

$ABS_{br}$  = Absorção da brita em %,

$H_{br}$  = Umidade da brita em %,

$M_{ar}$  = Massa da areia em kg,

$ABS_{ar}$  = Absorção da areia em %,

$H_{ar}$  = Umidade da areia em %.

**Obs.:** os valores em massa expressos em kg representam a quantidade para a produção de 1 m<sup>3</sup> de concreto.

Quando os agregados são utilizados sob a forma natural a atribuição do seu peso líquido deve se basear na Equação 19 para a brita e na Equação 20 para a areia. Desta maneira serão consideradas as eventuais umidades presentes nos materiais.

$$M_{brc} = M_{br} \times \left(1 + \frac{H_{br}}{100}\right) \quad (19)$$

$$M_{arc} = M_{ar} \times \left(1 + \frac{H_{ar}}{100}\right) \quad (20)$$

**Onde:**

$M_{brc}$  = Massa da brita corrigida em kg,

$M_{arc}$  = Massa da areia corrigida em kg,

$M_{br}$  = Massa da brita em kg,

$M_{ar}$  = Massa da areia em kg,

$H_{br}$  = Umidade da brita em %.

$H_{ar}$  = Umidade da areia em %.

**Obs.:** os valores em massa expressos em kg ( $M_{brc}$ ,  $M_{br}$ ,  $M_{arc}$  e  $M_{ar}$ ) representam a quantidade para a produção de 1 m<sup>3</sup> de concreto.

#### d) Produção do CAA

Como já foi descrito, as três proporções de pasta a serem experimentadas são 38%, 40% e 42%, as quais serão avaliadas de forma individual e sequencial. As informações inerentes aos materiais, procedimentos e roteiro de produção seguem o proposto no item 3.2.2. A composição inicial da pasta que constitui o CAA será orientada pelo estudo da pasta de cimento (3.2.3.2).

#### 3.2.3.3 Estudo da Argamassa – **Fase 3**

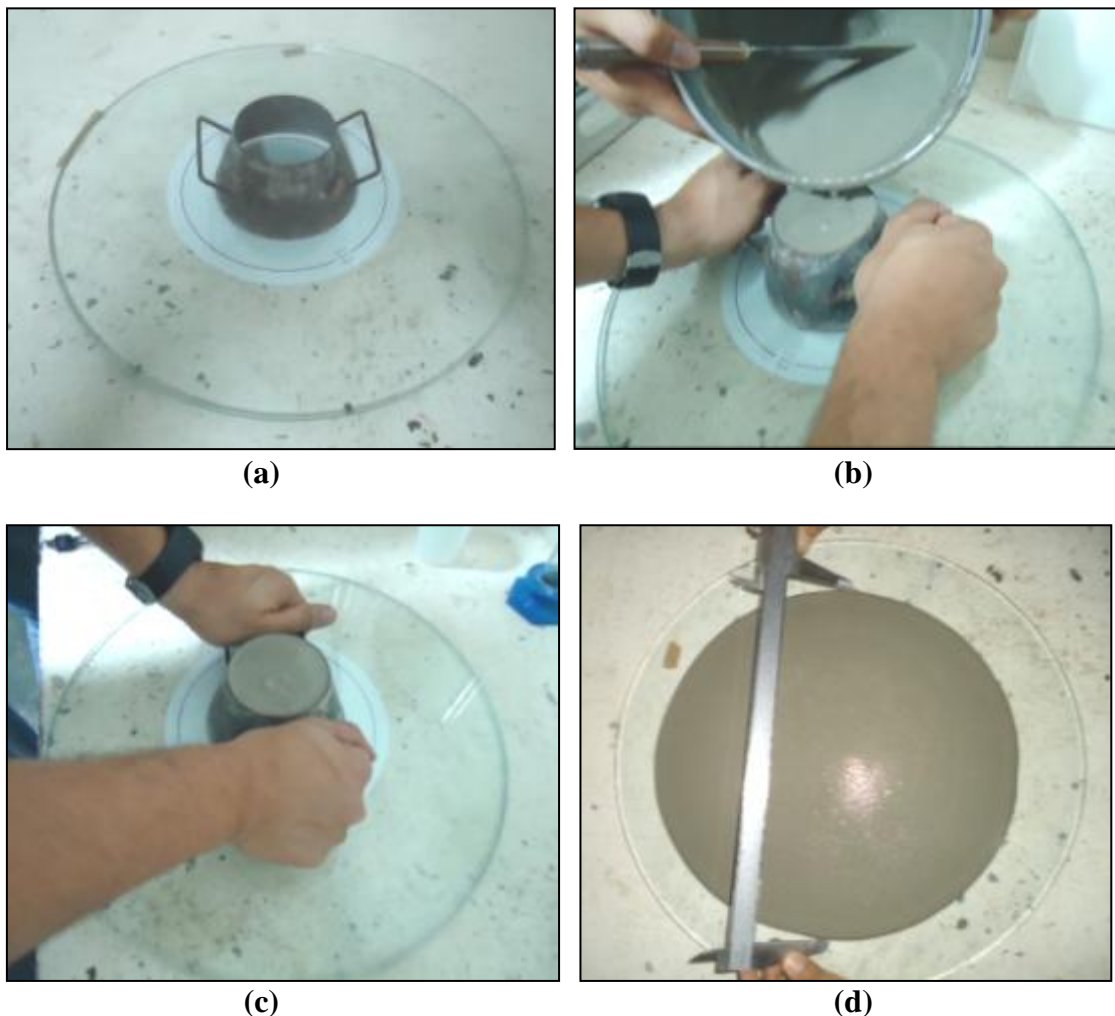
Nesta proposta o estudo da argamassa é fundamental ao desenvolvimento experimental. O ponto inicial baseia-se na experiência obtida no desenvolvimento da pasta na fase 2.

Para obtenção da melhor composição da argamassa a ser empregada no concreto, faz-se estudo da otimização da pasta determinada na fase 2 com o acréscimo de areia. Desta forma, os fatores a/c, f/c e a/f são fornecidos pela composição da pasta. Assim, como realizado por Lisbôa (2004), a metodologia fixa os valores de ar/c = 2 (areia por cimento) e busca a variação da relação sp/c. Avalia-se novamente o teor de superplastificante pela entrada da areia na mistura para compor a argamassa em virtude da fluidez exigida no ensaio do Tronco de Cone na Mesa de Consistência. Para este estudo são utilizados os ensaios de determinação do espalhamento relativo ( $G_m$ ) e do tempo de escoamento relativo ( $R_m$ ) apresentados 2.3.1.1.

No segundo momento, para a determinação da argamassa com CBC adota-se o critério de substituição em massa da areia pela CBC (5%, 10%, 20%, 25%, 30% e 40%). Para cada faixa desta substituição estuda-se primeiramente o fator sp/c determinado na argamassa sem CBC,

em caso de insucesso também varia-se a relação de sp/c para cada faixa de substituição. Para este estudo também são utilizados os ensaios de  $R_m$  e  $G_m$ .

Nos ensaios de  $G_m$  e  $R_m$  foram utilizados um mini-cone de base inferior de 125mm, base superior de 80mm e altura de 63mm (Figura 32). A placa de vidro tinha diâmetro máximo de 420mm. Ambos substituem respectivamente o mini-cone e a placa que foram utilizados no estudo da pasta. Os demais aparatos, materiais e dispositivos foram os mesmos utilizados e apresentados no estudo da pasta 3.2.3.2 Os valores ótimos objetivados para os parâmetros investigados foram de  $G_m = 5 \pm 0,5$  e  $R_m = 1 \pm 0,1$ , com percentual de variação admissível de  $\pm 10\%$ .



**Figura 32 – Esquematização para o ensaio do Tronco de Cone na Mesa de Consistência**

Nota: (a) mini-cone e placa de vidro nivelados, (b) lançamento da argamassa (c) nivelamento e levantamento uniforme do cone e (d) medição e aspecto final após espalhamento



### 3.2.3.3.1 Dosagem dos materiais na argamassa

Para calcular a quantidade dos materiais na argamassa, utilizam-se as relações a/c e f/c determinadas no estudo da pasta. Junta-se a isto a determinação da areia pelo fator ar/c fixado em 2 (LISBÔA, 2004). Para a argamassa com CBC este fator passa a ser  $a_{\text{miúdo}/c} = 2$  (agregado miúdo/cimento). Analisam-se as relações sp/c de 0,003, 0,004, 0,005, 0,006, 0,007 para determinar a quantidade de superplastificante na argamassa. Também podem ser estudadas variações intermediárias de sp/c para ajustes mais precisos de dosagem. No entanto, a dosagem inicial corresponde ao fator sp/c determinado na pasta para o direcionamento do acréscimo ou decréscimo de superplastificante na argamassa. Também observa-se a importância de dimensionar a quantidade de cimento pela capacidade total do misturador.

### 3.2.3.3.2 Determinação da dosagem ótima de superplastificante para argamassa

Fixando-se os parâmetros descritos em 3.2.1.5.1, estudam-se as variações de sp/c (0,003 a 0,007) primeiramente na argamassa sem CBC. Para todas as etapas descritas torna-se necessário nivelar e limpar adequadamente os dispositivos e acessórios utilizados. Os procedimentos para a experimentação da argamassa sem CBC foram os seguintes:

1. Quantificar a areia, a água e o filer pelos fatores ar/c, a/c e f/c em função da quantidade de cimento (700g\*);
2. Variar o superplastificante\*\* em função da trabalhabilidade exigida nos testes de  $R_m$  e  $G_m$ . Primeiramente adotar o valor relacionado no estudo da pasta. Para cada faixa desta realizar a experimentação de 3 a 16;
3. Materiais: cimento, água, filer calcário calcítico, areia e superplastificante,
4. Homogeneizar o cimento, a areia e o filer no recipiente do misturador por 20s com espátula;
5. Adicionar 80% da água e ligar o misturador durante 60s. Adotar a velocidade lenta do misturador para as etapas de 5 a 10. Parar o processo de mistura e limpar a argamassa aderente no recipiente e pá do misturador com o uso de uma espátula. Esta operação deve ser realizada em até 30s;
6. Ligar novamente o misturador por mais 60s;
7. Realizar novamente a remoção da argamassa aderente ao misturador em no máximo em 30s;
8. Acrescentar os 20% da água restante juntamente com o superplastificante;
9. Misturar a argamassa por mais 2 minutos totalizando assim 5 minutos de preparação;
10. Com o mini-cone posicionado no centro da placa de escoamento depositar a argamassa até o preenchimento completo do mini-cone e nivelar retirando o excesso;
11. Levantar o mini-cone em um movimento suave e padronizado (máximo de 3 segundos). Registrar o tempo que a argamassa leva até estabilizar, bem como a leitura de dois diâmetros de espalhamento máximo. As duas medidas registradas devem ser em milímetros e perpendiculares entre si;

12. Com um recipiente cilíndrico calibrado ( $\pm 0,50\text{dm}^3$ ) depositar a argamassa, nivelar e pesar o conteúdo para cálculo da Massa Específica da argamassa (massa/volume). A informação do volume do recipiente é fundamental ao cálculo.
13. Para a necessidade de nova experimentação descarta-se o material e inicia-se novamente pela etapa 1.

\* valor adotado em função da capacidade do misturador.

\*\* sugere-se no primeiro momento as seguintes variações de sp/c: 0,003, 0,004, 0,005, 0,006, 0,007 em massa baseadas na experiência com a pasta.

Para a argamassa com CBC o roteiro de produção é similar com pequenas alterações.

1. Quantificar a areia, a água e o filer pelos fatores ar/c, a/c e f/c em função da quantidade de cimento (700g\*);
2. Substituir a areia por CBC sequencialmente nos percentuais em massa de: 5%, 10%, 20%, 25%, 30% e 40%. Para cada faixa desta realiza-se a experimentação de 3 a 16;
3. Variar o superplastificante em função da trabalhabilidade exigida nos testes de  $R_m$  e  $G_m$ . Primeiramente adota-se o valor relacionado no estudo da argamassa sem CBC. Para cada faixa desta realiza-se a experimentação de 4 a 16;
4. Materiais: cimento, água, filer calcário calcítico, areia, superplastificante e CBC;
5. Homogeneizar o cimento, a areia, o filer e a CBC no recipiente do misturador por 20s com espátula;
6. Adicionar 80% da água e ligar o misturador durante 60s. Adota-se a velocidade lenta do misturador para as etapas de 6 a 11;
7. Parar o processo de mistura e limpar a argamassa aderente no recipiente e pá do misturador com o uso de uma espátula. Esta operação deve ser realizada em até 30s;
8. Ligar novamente o misturador por mais 60s;
9. Realizar novamente a remoção da argamassa aderente ao misturador em no máximo em 30s;
10. Acrescentar os 20% da água restante juntamente com o superplastificante;
11. Misturar a argamassa por mais 2 minutos totalizando assim 5 minutos de preparação;
12. Com o mini-cone posicionado no centro da placa de escoamento depositar a argamassa até o preenchimento completo do mini-cone e nivelar retirando o excesso;
13. Levantar o mini-cone em um movimento suave e padronizado no máximo de 3 segundos. Registrar o tempo que a argamassa leva até estabilizar, bem como a leitura de dois diâmetros de espalhamento máximo. As duas medidas registradas devem ser em milímetros e perpendiculares entre si;
14. Com um recipiente cilíndrico calibrado ( $\pm 0,50\text{dm}^3$ ) depositar a argamassa, nivelar e pesar o conteúdo para cálculo da Massa Específica da argamassa (massa/volume). A informação do volume do recipiente é fundamental ao cálculo;
15. Para a necessidade de nova experimentação descarta-se o material e inicia-se novamente pela etapa 1.

\* valor adotado em função da capacidade do misturador.

### 3.2.3.4 Desenvolvimento do CAA – **Fase 4**

No estudo anterior da argamassa foram determinados os fatores, a/c, ar/c, f/c, sp/c e também o percentual de substituição da areia pela CBC. Desta forma, o próximo desenvolvimento busca dimensionar o volume desta argamassa na constituição do concreto a ser avaliado em razão do volume de brita, considerando no primeiro momento a geração do concreto com argamassa sem CBC.

#### 3.2.3.4.1 Dosagem dos materiais no CAA

Baseados na proposta de Gomes (2002) são apresentadas as Equações 21, 22 e 23 para o dimensionamento da massa de cimento ( $M_c$ ) e da massa de brita ( $M_{br}$ ). Os fatores ar/c, sp/c e f/c são utilizados no dimensionamento respectivo da areia (sem correção) do superplastificante e do filer. Para a experimentação do volume de argamassa ( $V_{arg}$ ) no concreto assumem-se as seguintes variações: mínimo 50% e máximo de 70%.

$$V_{br} + V_{arg} = 1m^3 \text{ de concreto} \quad (21)$$

Onde:

$V_{br}$  = Volume de brita em  $m^3$ ,

$V_{arg}$  = Volume de argamassa em  $m^3$ .

Com o auxílio da Equação 22, determina-se a massa de cimento (kg) a ser empenhada em 1  $m^3$  de concreto.

$$M_c = \frac{\rho_{arg} \times V_{arg}}{1 + a/c + f/c + sp/c + ar/c} \quad (22)$$

Onde:

$M_c$  = Massa de cimento em kg para 1  $m^3$ ,

$\rho_{arg}$  = Massa específica da argamassa em  $kg/m^3$ ,

a/c = Fator água/cimento,

f/c = Fator filer/cimento,

sp/c = Fator superplastificante/cimento,

ar/c = Fator areia/cimento.

\*Quando o dimensionamento contiver a CBC este fator passa a ser atribuído como agregado miúdo/cimento ( $a_{miúdo}/c$ ).

Na sequência, com o auxílio das Equações 23 calculam-se a massa da brita para 1  $m^3$  de concreto. Neste momento elas ainda não são computadas com os pesos corrigidos.

$$M_{br} = (1 - V_{arg}) \times \rho_{br} \quad (23)$$

**Onde:**

$M_{br}$  = Massa da brita em kg para 1 m<sup>3</sup> de concreto,

$V_{arg}$  = Volume da argamassa em m<sup>3</sup>,

$\rho_{br}$  = Massa específica da brita em kg/m<sup>3</sup>.

A adição de água e a correção da massa dos agregados em virtude de sua utilização no estado natural seguiram o dimensionamento proposto nas Equações: 15, 16, 17, 18, 19 e 20. Em virtude da busca da trabalhabilidade desejada nos testes autoadensáveis, poderão ser realizadas correções experimentais da dosagem de superplastificante e da água durante a produção do concreto.

#### 3.2.3.4.2 Produção do CAA

Toda a condução desta etapa está de acordo com a proposta 3.2.2. Conforme 3.2.3.4.1 adotou-se a variação do volume da argamassa ( $V_{arg}$ ) nos valores de: 50%, 60% e 70% em relação ao volume de concreto de 1 m<sup>3</sup>. Sendo assim, tem-se a garantia que teremos no máximo 50% do seu volume sendo constituído por brita (ver Equação 21). A composição da argamassa será de acordo com a argamassa ótima desenvolvida no estudo da argamassa. A dosagem dos materiais poderá ser alterada durante o estudo experimental das propriedades autoadensáveis dos concretos

#### 3.2.3.5 Desenvolvimento do CAA-CBC – **Fase 5**

Na etapa anterior (subcapítulo 3.2.3.4) foram definidos os parâmetros para a obtenção do CAA sem CBC. Neste momento, direcionam-se o trabalho na busca do CAA-CBC pelas informações dos fatores sp/c, f/c, agregado miúdo/cimento ( $a_{miúdo}/c$ ), a/c e  $V_{arg}$ .

##### 3.2.3.5.1 Dosagem dos materiais no CAA-CBC

Lançam-se os cálculos da  $M_{br}$  e  $M_c$  pelas Equações 21, 22 (observando condição para  $a_{miúdo}$  na equação) e 23 juntamente com a aplicação das relações f/c, sp/c,  $a_{miúdo}/c$  para o cálculo respectivo da massa do filler, do superplastificante e da areia.

Em particular para o dimensionamento da areia e da CBC para cada 1 m<sup>3</sup> de concreto aplicam-se as Equações 24, 25 e 26.

$$M_{miúdo} = a_{miúdo} / c \times M_c \quad (24)$$

**Onde:**

$M_{miúdo}$  = Massa do agregado miúdo em kg (massa da areia + massa da CBC),

$a_{miúdo}/c$  = Fator agregado miúdo/cimento,

$M_c$  = Massa do cimento em kg.

**Obs.:** os valores em massa expressos em kg ( $M_{miúdo}$  e  $M_c$ ) representam as quantidades destes materiais para a produção de 1 m<sup>3</sup> de concreto.

$$M_{ar} = M_{miúdo} \times \frac{\%_{areia}}{100} \quad (25)$$

**Onde:**

$M_{ar}$  = Massa areia em kg,

$M_{miúdo}$  = Massa do agregado miúdo em kg,

$\%_{areia}$  = percentual de areia na massa do agregado miúdo.

**Obs.:** os valores em massa expressos em kg ( $M_{miúdo}$  e  $M_{ar}$ ) representam as quantidades destes materiais para a produção de 1 m<sup>3</sup> de concreto.

$$M_{CBC} = M_{miúdo} \times \frac{\%_{CBC}}{100} \quad (26)$$

**Onde:**

$M_{CBC}$  = Massa da CBC em kg para 1 m<sup>3</sup> de concreto,

$M_{miúdo}$  = Massa do agregado miúdo em kg,

$\%_{CBC}$  = percentual de substituição de areia por CBC na massa do agregado miúdo.

**Obs.:** os valores em massa expressos em kg ( $M_{miúdo}$  e  $M_{CBC}$ ) representam as quantidades destes materiais para a produção de 1 m<sup>3</sup> de concreto.

A adição de água e a correção da massa dos agregados (areia e brita) em virtude de sua utilização no estado natural seguiram o dimensionamento proposto nas Equações: 15, 16, 17, 18, 19 e 20. Em virtude da busca da trabalhabilidade desejada nos testes autoadensáveis, poderão ser realizadas correções experimentais da dosagem de superplastificante e da água durante o processo de produção.

#### *3.2.3.5.2 Produção do CAA-CBC*

Aplicam-se as condições de produção apresentada no item 3.2.2. Elas são similares ao item 3.2.3.4, considerando que o  $V_{arg}$  a ser aplicado foi o mesmo definido com sucesso na obtenção do CAA sem CBC. A composição da argamassa empregada no início dos desenvolvimentos será baseada no estudo do item 3.2.3.3. A dosagem dos materiais poderá ser alterada durante o estudo experimental das propriedades autoadensáveis dos concretos com CBC.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A realização experimental que possibilitou o desenvolvimento do concreto autoadensável sem CBC e do concreto autoadensável com CBC, foram desenvolvidas conforme o fluxograma da metodologia apresentado na Figura 24. Os estudos inerentes a seleção e caracterização dos materiais serão apresentados na sequência.

### 4.1 MATERIAIS UTILIZADOS NA COMPOSIÇÃO DO CAA – *Fase 1*

Nos estudos de caracterização apresentados, os quais constituem a Fase 1 da metodologia do trabalho, foram apresentados as características dos materiais a serem empregados na produção do CAA (ver item 3.1). Assim, faz-se comentários a respeito dos agregados, do filer calcário calcítico e da CBC.

#### 4.1.1 Agregado Miúdo

A areia empregada na mistura (Figura 33a) possui diâmetro máximo característico de 0,6mm (ABNT NBR NM 248:2003). Pela classificação da ABNT NBR 7211:2009 (Tabela 3), que avalia se o agregado está contido na zona utilizável a ótima, observa-se que das oito faixas comparadas duas não se enquadram na condição de aceitável. Pela análise completa da Tabela 3, nota-se que os grãos de areia que não ocuparam estas faixas de acúmulo se encontraram na faixa posterior de 0,15mm caracterizando-a como uma areia com presença de grãos finos.



(b)



(c)

**Figura 33 – Armazenamento e disponibilização para a produção dos materiais secos**

Nota: (a) areia utilizada. (b) brita A utilizada e (c) disponibilização dos materiais para a produção dos traços (de cima para baixo e da esquerda para direita: cimento, brita “B”, filer calcário, areia e CBC).

#### 4.1.2 Agregado Graúdo

Foram utilizadas na pesquisa duas categorias de brita denominadas de brita “A” e brita “B”. A brita “A” (Figura 33 b) possui diâmetro máximo característico de 19mm já a brita “B” apresentou 12,5mm (ABNT NBR NM 248:2003). Pelas recomendações da EFNARC (2002) sob a tutela da norma EN 12620, a dimensão máxima característica apresentada se enquadraria na recomendação de no máximo 16 a 20mm.



Pelos critérios de classificação da ABNT NBR 7211:2009, classifica-se a brita “A” com dimensão característica entre 9,5 e 25mm (Tabela 6). Isto é enfatizado pelo fato que das 6 faixas de avaliação de retido acumulado apenas 1 faixa não se enquadrou nas condições desta categoria. Esta faixa ocorreu na peneira de 12,5mm, onde nela ficaram acumulados 93,7% do material, sendo que o recomendado pela Norma seria de 65%. Desta maneira, temos uma alta concentração de britas com dimensão maior que 12,5mm. Da mesma forma, o retido acumulado para a faixa de 19mm foi de apenas 5,6% de material, onde o limite máximo seria de 15%.

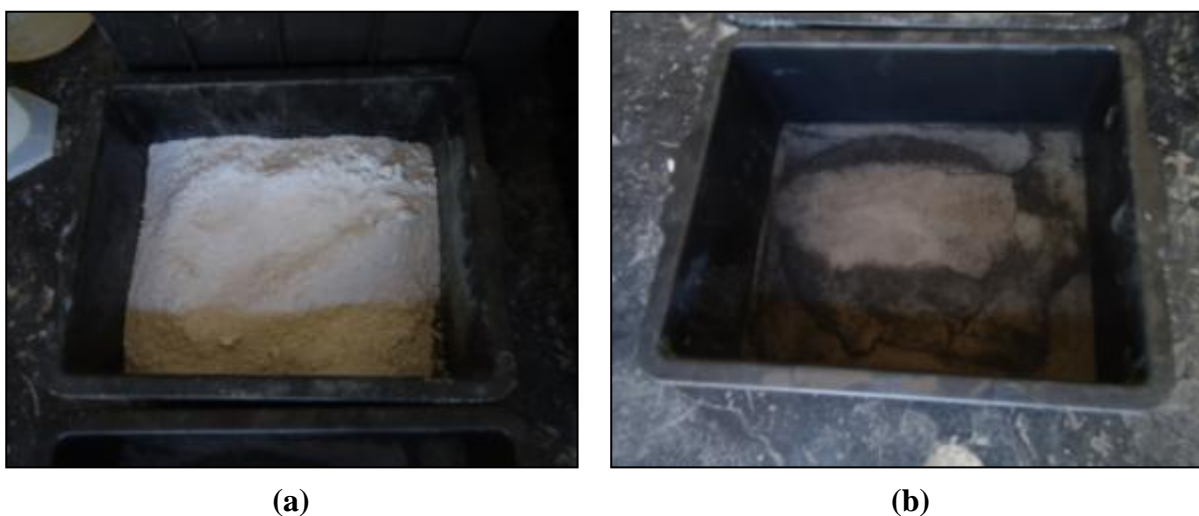
A distribuição granulométrica da brita “B” apresentou comportamento diferente do apresentado pela brita “A”, onde todos os valores retido acumulados se enquadraram nas faixas admissíveis determinadas pela ABNT NBR 7211:2009 para a categoria de 9,5 a 25mm. Não foi verificado a presença de britas com dimensão maior que 19mm.

#### **4.1.3 Filer Calcário Calcítico**

A dimensão máxima característica do filer calcário calcítico (Figura 34a) fornecida pelo fabricante BAZANGA, traz a informação que 94% do material é passante em peneira de 325 *mesh*. Desta forma, 94% desses grãos são menores que 45 $\mu$ m (0,045mm). Recomendações como as da EFNARC (2002), dizem que os finos tais como o filer devem ter dimensões menores que 0,125mm para a composição do esqueleto granular. Para Gomes (2002), esta recomendação é de diâmetros máximo menores que 0,100mm. Logo este filer estaria aprovado para a experimentação.

#### 4.1.4 Cinza do Bagaço de Cana-de-açúcar (CBC)

Os resultados sobre a caracterização da CBC (Figura 34b) levaram a informação que a mesma possui numa escala de comparação direta com a areia, uma indicação granulométrica entre areia média a fina (ABNT NBR 6502:1995). Também verificou-se que 99,9% de todo o material teve dimensão inferior a 0,6mm, sendo que 80% do material ficou entre as peneiras 0,150mm e 0,6mm. Como material pozolânico, Nunes (2009) realizou análises na CBC e a classificou como sem atividade pozolânica.



**Figura 34 – Adição mineral e CBC**

Nota: (a) filer calcário calcítico. (b) cinza do bagaço da cana-de-açúcar.

## 4.2 ESTUDOS DA PASTA – *Fase 2*

### 4.2.1 Determinação da Pasta

As temperaturas das pastas após o processo de mistura foram medidas e ficaram na faixa de 20°C a 23°C. A sala de pesquisa era climatizada e teve sua temperatura ambiente controlada e na faixa de 22°C ± 5. A umidade relativa do ar se manteve na faixa de 60% ± 15.

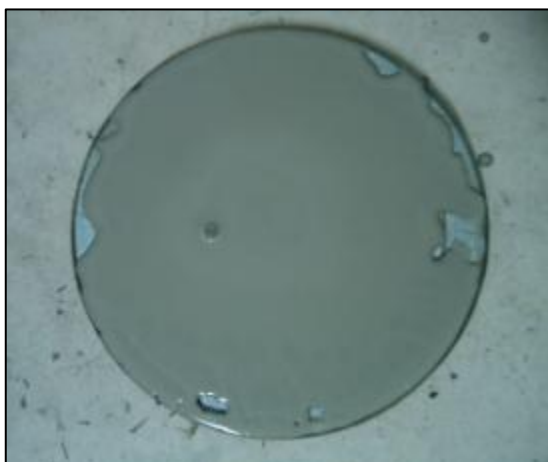
#### 4.2.1.1 Estudo do Fator a/c

Pela orientação do procedimento descrito no item 3.2.1.2.2, gerou-se a Tabela 11.

**Tabela 11 - Estudo do fator a/c**

| COMPOSIÇÃO DA PASTA |      |          |         |             |           |             |               |               | RESULTADOS DOS ENSAIOS<br>(média de três leituras) |                      |                             |     |
|---------------------|------|----------|---------|-------------|-----------|-------------|---------------|---------------|--|----------------------|-----------------------------|-----|
| a/c                 | f/c  | sp/c (%) | a/(f+c) | Cimento (g) | Filer (g) | Aditivo (g) | Água 80% (ml) | Água 20% (ml) | Tempo Cone Marsh (s)                               | T <sub>115</sub> (s) | Mini-slump Espalhamen. (mm) |     |
| 1                   | 0,40 | 0,5      | 1       | 0,27        | 1500      | 750         | 15            | 480,0         | 109,5  | 41,29                | 0,99                        | 192 |
| 2                   | 0,43 | 0,5      | 1       | 0,28        | 1500      | 750         | 15            | 510           | 117  | 24,43                | -                           | 189 |
| 3                   | 0,45 | 0,5      | 1       | 0,30        | 1500      | 750         | 15            | 540           | 124,5  | 18,17                | -                           | 220 |
| 4                   | 0,48 | 0,5      | 1       | 0,32        | 1500      | 750         | 15            | 570           | 132  | 14,98                | -                           | 192 |
| 5                   | 0,50 | 0,5      | 1       | 0,33        | 1500      | 750         | 15            | 600,0         | 139,5  | 13,68                | -                           | 190 |

No procedimento para determinação do valor inicial de a/c adaptado de Aïtcin (2000), elegeu-se o fator a/c = 0,45 como ponto de partida da próxima etapa de experimentação. O fator determinante a esta escolha foi o tempo de escoamento que se deu dentro da faixa estipulada do procedimento que era de 15s a 22,5s. Notou-se que com exceção da faixa de a/c=0,4 que o T<sub>115</sub> não foi computado pela alta velocidade de escoamento. Posteriormente na etapa da variação do f/c para cada sp/c verificou-se que este fenômeno aconteceu pelo excesso de sp na composição, o qual estava muito acima do ponto de saturação determinado. Na Figura 35, visualiza-se a placa com um dos três escoamentos da mistura eleita.



**Figura 35 - Pasta piloto do fator  $a/c=0,45$**

Os espalhamentos monitorados não foram levados em consideração para a escolha, pela ausência nítida do controle de coesão. Geravam-se espalhamentos desuniformes e que variavam demais entre as três leituras realizadas com a faixa de  $sp/c$  de 1% na pasta. Objetivou-se também com a escolha do  $a/c = 0,45$  o menor  $a/c$  que estivesse dentro da faixa determinada para o estudo.

#### 4.2.1.2 Determinação da Dosagem Ótima de $sp/c$ para Cada Faixa de $f/c$

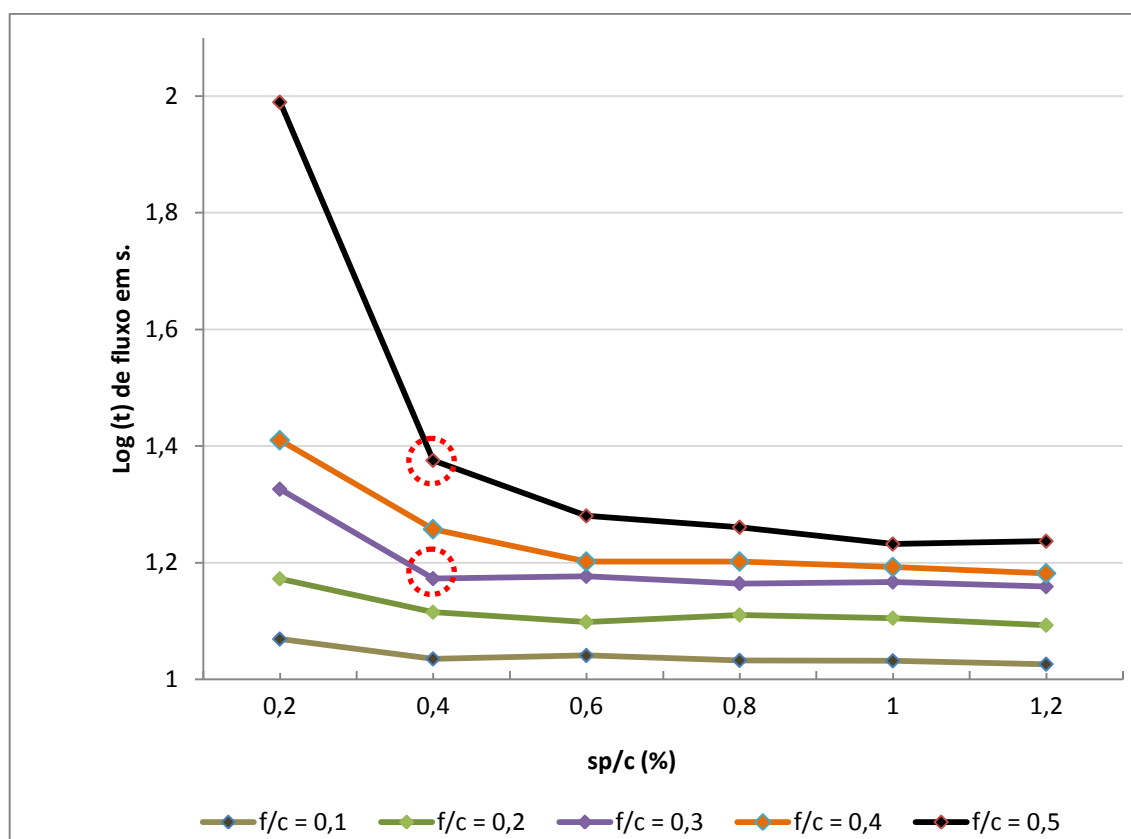
Orientados inicialmente pela faixa obtida de  $a/c$  para o estudo da pasta, gerou-se a Tabela 12, nela foram totalizadas trinta experimentações.

Tabela 12 - Informações do estudo da pasta

| COMPOSIÇÃO DA PASTA |      |             |            |                    |              |                 |                     |                     | ENSAIOS<br>(média de três leituras) |                         |                           | Gomes<br>(2002)                 |              |
|---------------------|------|-------------|------------|--------------------|--------------|-----------------|---------------------|---------------------|-------------------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------------|--------------|
| a/c                 | f/c  | sp/c<br>(%) | a/(f+c)    | Cim<br>ento<br>(g) | Filer<br>(g) | Aditi<br>vo (g) | Água<br>80%<br>(ml) | Água<br>20%<br>(ml) | Cone<br>Marsh<br>(s)                | T <sub>115</sub><br>(s) | Espalha-<br>mento<br>(mm) | Ângulos<br>no<br>gráfico<br>(°) |              |
| 1                   | 0,45 | 0,2         | 0,41       | 1900               | 190          | 3,8             | 684                 | 168,3               | 11,72                               | -                       | 143,7                     | -                               |              |
| 2                   |      | <b>0,4</b>  |            | <b>1900</b>        | <b>190</b>   | <b>7,6</b>      | <b>684</b>          | <b>165,7</b>        | <b>10,84</b>                        | -                       | <b>185,0</b>              | <b>168,7</b>                    |              |
| 3                   |      | 0,6         |            | 1900               | 190          | 11,4            | 684                 | 163,0               | 10,99                               | 0,58                    | 178,7                     | 184,1                           |              |
| 4                   |      | 0,8         |            | 1900               | 190          | 15,2            | 684                 | 160,4               | 10,78                               | 0,81                    | 196,3                     | 177,8                           |              |
| 5                   |      | 1,0         |            | 1900               | 190          | 19              | 684                 | 157,7               | 10,76                               | 0,47                    | 201,3                     | 181,5                           |              |
| 6                   |      | 1,2         |            | 1900               | 190          | 22,8            | 684                 | 155,0               | 10,62                               | 0,67                    | 195,3                     | -                               |              |
| 7                   |      | 0,2         | 0,2        | 0,38               | 1800         | 360             | 3,6                 | 648                 | 159,5                               | 14,87                   | 1,15                      | 130,3                           | -            |
| 8                   |      |             | <b>0,4</b> |                    | <b>1800</b>  | <b>360</b>      | <b>7,2</b>          | <b>648</b>          | <b>157,0</b>                        | <b>13,03</b>            | <b>1</b>                  | <b>173,0</b>                    | <b>168,8</b> |
| 9                   |      |             | 0,6        |                    | 1800         | 360             | 10,8                | 648                 | 154,4                               | 12,54                   | 0,47                      | 192,3                           | 171,8        |
| 10                  |      |             | 0,8        |                    | 1800         | 360             | 14,4                | 648                 | 151,9                               | 12,89                   | 0,51                      | 189,7                           | 185,0        |
| 11                  |      |             | 1,0        |                    | 1800         | 360             | 18                  | 648                 | 149,4                               | 12,73                   | 0,53                      | 198,7                           | 181,8        |
| 12                  |      |             | 1,2        |                    | 1800         | 360             | 21,6                | 648                 | 146,9                               | 12,38                   | 0,41                      | 198,3                           | -            |
| 13                  |      | 0,3         | 0,2        | 0,35               | 1700         | 510             | 3,4                 | 612                 | 150,6                               | 21,19                   | 2,83                      | 120,3                           | -            |
| 14                  |      |             | <b>0,4</b> |                    | <b>1700</b>  | <b>510</b>      | <b>6,8</b>          | <b>612</b>          | <b>148,2</b>                        | <b>14,88</b>            | <b>0,53</b>               | <b>166,0</b>                    | <b>141,4</b> |
| 15                  |      |             | 0,6        |                    | 1700         | 510             | 10,2                | 612                 | 145,9                               | 15,02                   | 0,52                      | 179,7                           | 184,6        |
| 16                  |      |             | 0,8        |                    | 1700         | 510             | 13,6                | 612                 | 143,5                               | 14,60                   | 0,51                      | 209,3                           | 175,7        |
| 17                  |      |             | 1,0        |                    | 1700         | 510             | 17                  | 612                 | 141,1                               | 14,68                   | 0,88                      | 189,3                           | 183,0        |
| 18                  |      |             | 1,2        |                    | 1700         | 510             | 20,4                | 612                 | 138,7                               | 14,42                   | 0,57                      | 206,3                           | -            |
| 19                  |      | 0,4         | 0,2        | 0,32               | 1600         | 640             | 3,2                 | 576                 | 141,8                               | 25,70                   | -                         | 96,3                            | -            |
| 20                  |      |             | 0,4        |                    | 1600         | 640             | 6,4                 | 576                 | 139,5                               | 18,09                   | 1,07                      | 153,0                           | 158,2        |
| 21                  |      |             | <b>0,6</b> |                    | <b>1600</b>  | <b>640</b>      | <b>9,6</b>          | <b>576</b>          | <b>137,3</b>                        | <b>15,92</b>            | <b>0,66</b>               | <b>178,7</b>                    | <b>164,4</b> |
| 22                  |      |             | 0,8        |                    | 1600         | 640             | 12,8                | 576                 | 135,0                               | 15,92                   | 0,72                      | 183,3                           | 182,8        |
| 23                  |      |             | 1,0        |                    | 1600         | 640             | 16                  | 576                 | 132,8                               | 15,58                   | 1                         | 190,3                           | 180,4        |
| 24                  |      |             | 1,2        |                    | 1600         | 640             | 19,2                | 576                 | 130,6                               | 15,20                   | 0,46                      | 193,7                           | -            |
| 25                  |      | 0,5         | 0,2        | 0,30               | 1500         | 750             | 3                   | 540                 | 132,9                               | 97,60                   | -                         | 67,0                            | -            |
| 26                  |      |             | 0,4        |                    | 1500         | 750             | 6                   | 540                 | 130,8                               | 23,73                   | 1,54                      | 124,7                           | 133,5        |
| 27                  |      |             | <b>0,6</b> |                    | <b>1500</b>  | <b>750</b>      | <b>9</b>            | <b>540</b>          | <b>128,7</b>                        | <b>19,06</b>            | <b>0,98</b>               | <b>163,7</b>                    | <b>160,1</b> |
| 28                  |      |             | 0,8        |                    | 1500         | 750             | 12                  | 540                 | 126,6                               | 18,23                   | 0,58                      | 170,0                           | 182,7        |
| 29                  |      |             | 1,0        |                    | 1500         | 750             | 15                  | 540                 | 124,5                               | 17,06                   | 0,63                      | 194,3                           | 170,4        |
| 30                  |      |             | 1,2        |                    | 1500         | 750             | 18                  | 540                 | 122,4                               | 17,25                   | 0,53                      | 192,3                           | -            |

Nota: As marcações em **negrito** e *itálico* representam a melhor combinação de materiais em cada faixa de f/c de acordo com os critérios de Gomes (2002).

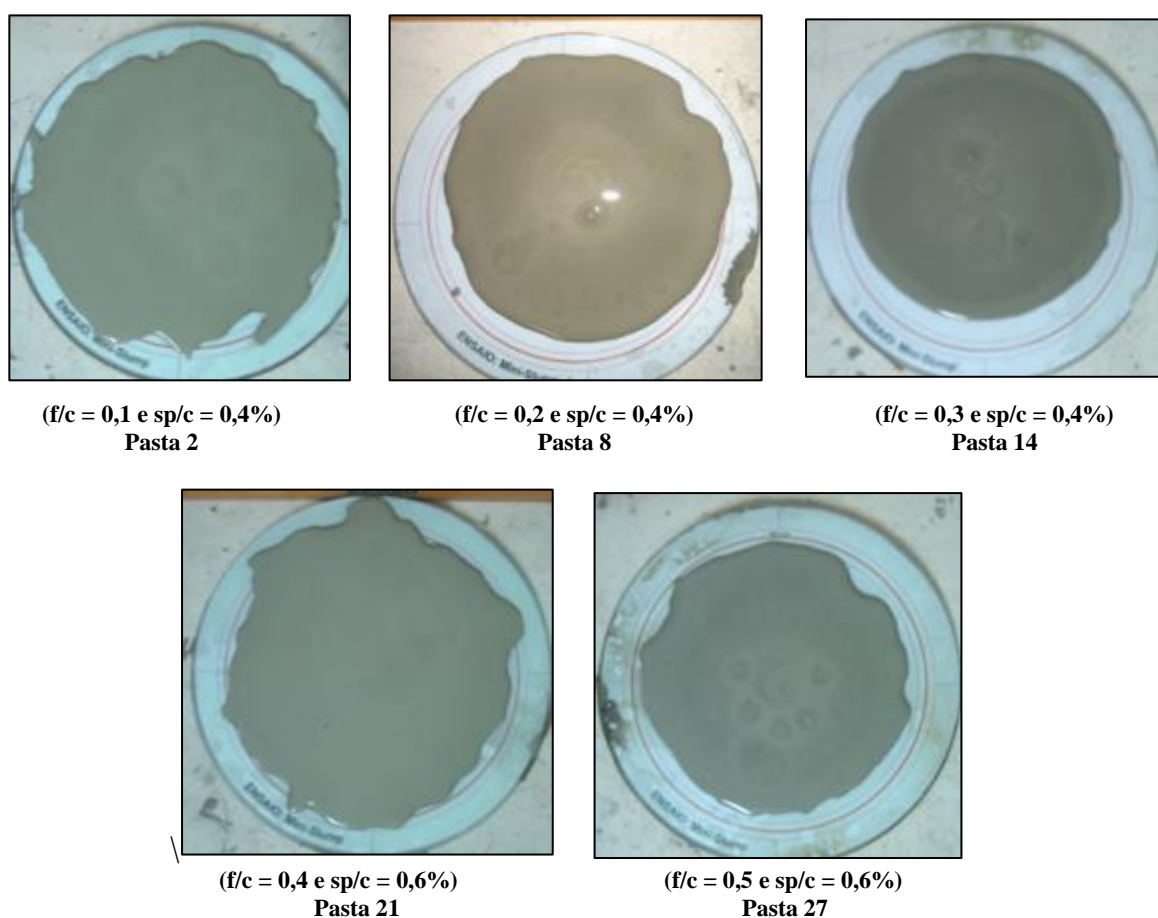
Na Figura 36, são expostos os gráficos da relação logarítmica do tempo (s) pela variação de  $sp/c$ .



**Figura 36 - Gráfico do tempo de fluxo (Log.) versus a variação de  $sp/c$  para cada faixa de  $f/c$**

Nota: Os pontos marcados em vermelho se enquadraram na faixa  $140^{\circ} \pm 10$  da proposta original.

Na Tabela 12, as faixas experimentais, 2, 8, 14, 21 e 27 foram destacadas como as melhores pastas. Elas representaram, respectivamente, as melhores faixas para as combinações de  $f/c$ : 0,1, 0,2, 0,3, 0,4 e 0,5. O critério desta definição foi pela avaliação do ângulo interno obtido no gráfico, onde se elegeu as faixas de ângulos que estavam mais próximas da indicação  $140^{\circ} \pm 10$ . Na Figura 37, tem-se o ensaio do mini-slump para as composições citadas. Com relação à projeção dos ângulos internos apenas a pasta 14 ( $f/c = 0,3$  e  $sp/c = 0,004$ ) alcançou os parâmetros recomendados. Para análise do espalhamento, as pastas: 2, 8 e 21 tiveram êxito na proposta de atingir a faixa de  $(180 \pm 10)$ mm. No entanto, visualmente (Figura 37) observa-se a falta de homogeneidade no espalhamento. No quesito de avaliação do  $T_{115}$  o qual deve ser  $(2 < T_{115} < 3,5)$ s nenhum das faixas se enquadraram. Este fato está diretamente relacionado com a velocidade de escoamento ocasionada pela elevada fluidez e deficiência no controle da coesão.



**Figura 37- Ensaio do mini-slump para as pastas com melhores resultados**

De uma maneira geral, o resultado das trinta combinações iniciais não permitiu o atendimento simultâneo dos três quesitos avaliados nos ensaios com as pastas: o espalhamento, o  $T_{115}$  e o ângulo interno. Os resultados até então indicavam que o consumo de sp/c (%) estaria na faixa de sp/c de 0,4% e 0,6%.

Objetivando melhorar a homogeneidade e a coesão entre os elementos da pasta, resolveu-se avaliar melhor as pastas com maior quantidade de filer. Com isso, foram realizados novos ensaios com as relações f/c de 0,4 e 0,5, com variação da relação sp/c de 0; 0,1; 0,2; 0,4; 0,6 e 0,8, e fator a/c fixado em 0,5. Na Tabela 13 estão os resultados das doze novas composições de pastas geradas.

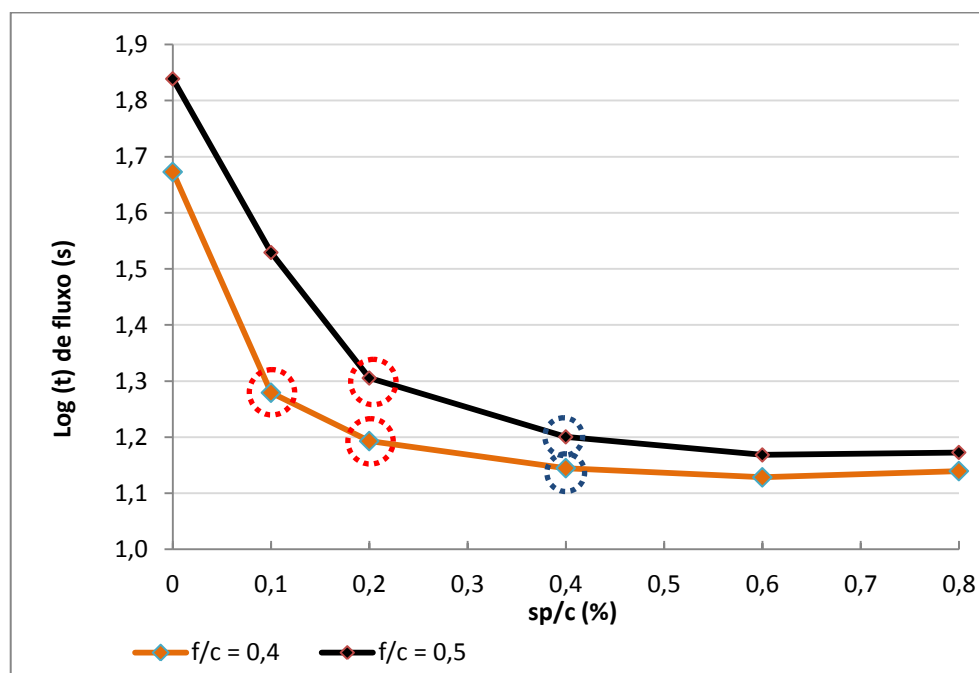
**Tabela 13 - Informações do novo estudo da pasta com a/c = 0,5**

| COMPOSIÇÃO DA PASTA |     |             |         |                |              |                |                     |                     | ENSAIOS<br>(média de três leituras) |                         |                      | Gomes<br>(2002)                 |
|---------------------|-----|-------------|---------|----------------|--------------|----------------|---------------------|---------------------|-------------------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------------|
| a/c                 | f/c | sp/c<br>(%) | a/(f+c) | Cimento<br>(g) | Filer<br>(g) | Aditivo<br>(g) | Água<br>80%<br>(ml) | Água<br>20%<br>(ml) | Cone<br>Marsh<br>(s)                | T <sub>115</sub><br>(s) | Espalhamento<br>(mm) | Ângulos<br>no<br>gráfico<br>(°) |
| 31                  | 0,5 | 0,4         | 0,36    | 1600           | 640          | 0              | 640                 | 160                 | 47,09                               | -                       | 74,0                 | -                               |
| 32                  |     |             |         | 1600           | 640          | 1,6            | 640                 | 159                 | 19,02                               | -                       | 97,0                 | 145,0                           |
| 33                  |     |             |         | 1600           | 640          | 3,2            | 640                 | 158                 | 15,60                               | 0,42                    | 141,3                | 152,8                           |
| <b>34</b>           |     |             |         | <b>1600</b>    | <b>640</b>   | <b>6,4</b>     | <b>640</b>          | <b>156</b>          | <b>13,96</b>                        | <b>0,89</b>             | <b>177,7</b>         | <b>171,1</b>                    |
| 35                  |     |             |         | 1600           | 640          | 9,6            | 640                 | 153                 | 13,44                               | 0,42                    | 210,0                | 172,1                           |
| 36                  |     |             |         | 1600           | 640          | 12,8           | 640                 | 151                 | 13,79                               | 0,32                    | 193,7                | -                               |
| 37                  | 0,5 | 0,5         | 0,33    | 1500           | 750          | 0              | 600                 | 150                 | 69,00                               | -                       | 94,3                 | -                               |
| 38                  |     |             |         | 1500           | 750          | 1,5            | 600                 | 149                 | 33,83                               | -                       | 87,0                 | 165,1                           |
| 39                  |     |             |         | 1500           | 750          | 3              | 600                 | 148                 | 20,20                               | 4,54                    | 117,7                | 141,7                           |
| <b>40</b>           |     |             |         | <b>1500</b>    | <b>750</b>   | <b>6</b>       | <b>600</b>          | <b>146</b>          | <b>15,87</b>                        | <b>0,89</b>             | <b>170,7</b>         | <b>161,5</b>                    |
| 41                  |     |             |         | 1500           | 750          | 9              | 600                 | 144                 | 14,73                               | 0,28                    | 186,3                | 169,5                           |
| 42                  |     |             |         | 1500           | 750          | 12             | 600                 | 142                 | 14,89                               | 0,21                    | 196,7                | -                               |

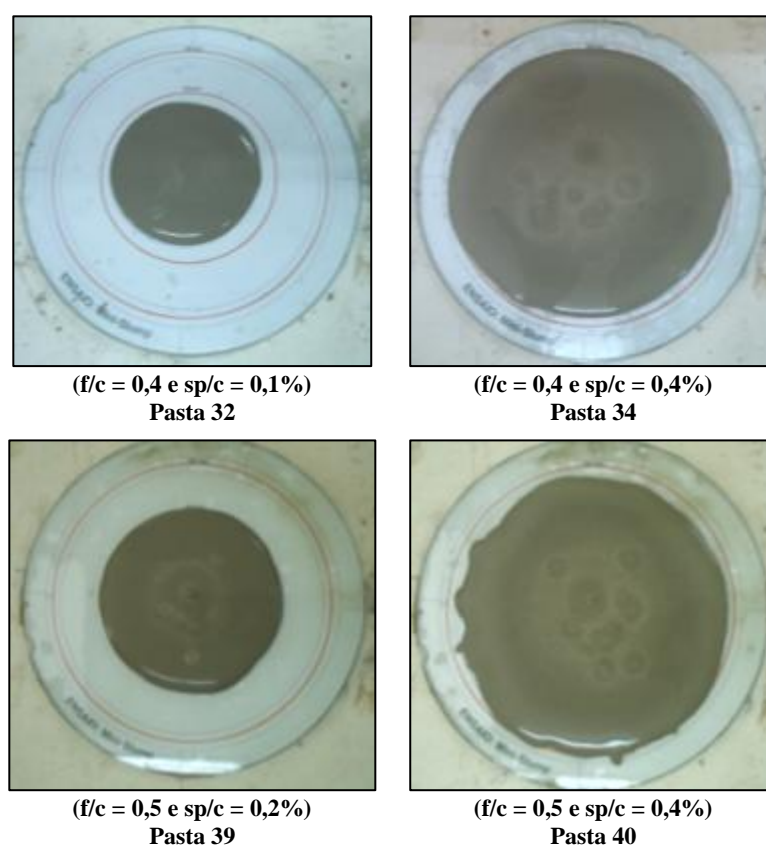
Nota: As marcações em **negrito** e *itálico* representam a melhor combinação de materiais para cada f/c.

Avaliando como primeiro critério o ângulo interno da evolução da linha do gráfico (Figura 38), as melhores pastas seriam a 32 para f/c = 0,4 e a 39 para a relação f/c = 0,5. No entanto, os seus respectivos espalhamentos de 97,0 e 117,7mm não atingiram os valores esperados. Portanto, com base em Aïtcin (2000), foram eleitos os pontos com dosagens sp/c que permitissem o espalhamento desejado (pastas 34 e 40). Tais pontos, embora exijam maiores dosagens de sp/c, ainda assim, estariam melhores qualificados no quesito espalhamento e com menores dosagens se comparados com as combinações tidas como ótimas equivalentes nos primeiros testes (Tabela 12), as pastas 21 e 27 (sp/c: 0,6%).





**Figura 38 - Tempo de fluxo (log.) versus a variação sp/c para f/c (0,4 e 0,5) e a/c 0,5**  
 Nota: Os pontos em vermelho se enquadraram na faixa  $140^{\circ} \pm 10$  da proposta. Em azul os eleitos.



**Figura 39 - Novos espalhamentos da pasta na placa de vidro para as melhores combinações de cada relação f/c**

As condições apresentadas pela pasta 34 (Figura 39) que também podem ser visualizadas na Figura 40 apresentaram características de uma coesão controlada com distribuição homogênea. Esta mistura apresentou um ótimo aspecto de união entre as partículas sem formação de fases distintas entre elas que poderiam caracterizar segregação.



**Figura 40 - Novas ilustrações da pasta 34.**

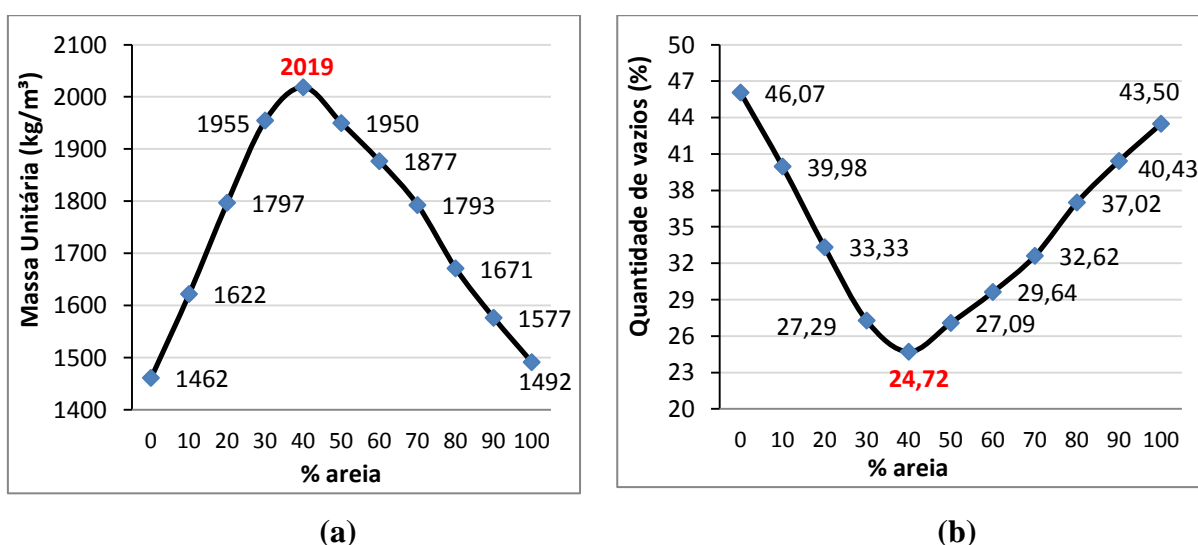
Desta forma, a combinação aprovada para a experimentação das proporções da pasta no CAA foi a 34. Nela foram determinados os fatores  $a/c = 0,5$ ;  $f/c = 0,4$ ;  $sp/c = 0,004$  e  $a/f = 0,33$ , os quais servirão de referência para desenvolvimentos da fase 3.

## 4.2.2 Estudo Complementar da Variação do Volume de Pasta na Composição Ótima do Esqueleto granular

Para a realização deste estudo complementar e preliminar, como já foi apresentado no item 3.2.3.2.1, realiza-se o estudo da composição ótima da areia com a brita. Neste momento, como tratava-se de estudos paralelos foi utilizada a brita “A”. Embora a classificação granulométrica (4.1.2) indicasse que a brita “B” possuía melhores indicações de uso para o CAA, optou-se por esta brita pois a mesma possuía maior disponibilidade comercial na região.

### 4.2.2.1 Estudo da Composição Ótima do Esqueleto Granular

No estudo do esqueleto granular a melhor composição obtida foi a relação ar/br = 0,67. Ela indicou que 60% dos agregados devem ser constituídos por brita (brita A) e 40% por areia. Esta combinação possuiu o menor índice de vazios (IV = 24,7%) e a maior massa unitária (MU = 2019 kg/m<sup>3</sup>). Os valores obtidos nos ensaios estão apresentados na Figura 41.



**Figura 41 - Gráficos da composição ar/br**

Nota: (a) evolução da massa unitária em kg/m<sup>3</sup> e (b) evolução do índice de vazios em %.

Na Figura 42, a imagem apresenta uma das três medições com a proporção ar/br = 0,67.



Foram produzidos cerca de 0,01m<sup>3</sup> para cada traço de concreto da 1 ao 6. A intenção era apenas produzir uma quantidade mínima para realização do *Slump Flow*. Neste momento, foram iniciados os primeiros testes com o concreto, desta forma esta quantidade mínima diferente até da sequência A (subtópico 3.2.2) foi para o estudo e conhecimento prévio do Ensaio de Espalhamento. Para os ensaios dos concretos 7 e 8, foram produzidos para cada uma das amostras 0,020 m<sup>3</sup>, pois objetivava-se também a realização dos testes com a Caixa-L e Anel-J e Funil-V, já de acordo com sequência A do item 3.2.2.

Na Tabela 15, são demonstradas as composições dos oito traços de concreto desenvolvidos. Na parte superior da Tabela são informadas as etapas de realização dos ensaios para um melhor entendimento da análise.

**Tabela 15 - Composição das 8 faixas de concretos ensaiados**

| COMPOSIÇÕES                             | Etapa 1 |       | Etapa 2 |       |       |       | Etapa 3 |       |
|---|---------|-------|---------|-------|-------|-------|---------|-------|
|   | 1       | 2     | 3       | 4     | 5     | 6     | 7       | 8     |
| Volume produzido (m <sup>3</sup> )      | 0,01    | 0,01  | 0,01    | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,02    | 0,02  |
| Umidade da areia (H <sub>ar</sub> ) (%) | 0,35    | 0,35  | 2,85    | 2,85  | 2,85  | 2,85  | 1,20    | 1,20  |
| Umidade da brita (H <sub>br</sub> ) (%) | 1,34    | 1,34  | 1,34    | 1,34  | 1,34  | 1,34  | 1,34    | 1,34  |
| Volume pasta (m <sup>3</sup> )          | 0,38    | 0,40  | 0,38    | 0,38  | 0,38  | 0,40  | 0,40    | 0,42  |
| Fator a/c                               | 0,50    | 0,50  | 0,50    | 0,40  | 0,50  | 0,50  | 0,45    | 0,45  |
| Areia (%)                               | 40      | 40    | 45      | 45    | 50    | 45    | 45      | 45    |
| Brita (%)                               | 60      | 60    | 55      | 55    | 50    | 55    | 55      | 55    |
| Cimento (kg)                            | 3,88    | 4,09  | 3,88    | 4,10  | 3,88  | 4,09  | 8,39    | 8,81  |
| Filer (kg)                              | 1,55    | 1,63  | 1,55    | 1,64  | 1,55  | 1,63  | 3,36    | 3,52  |
| Areia (M <sub>ar</sub> ) (kg)           | 6,65    | 6,44  | 7,47    | 7,47  | 8,29  | 7,23  | 14,46   | 13,98 |
| Areia (M <sub>arc</sub> ) (kg)          | 6,67    | 6,46  | 7,68    | 7,68  | 8,53  | 7,44  | 14,63   | 14,15 |
| Brita (M <sub>br</sub> ) (kg)           | 9,98    | 9,65  | 9,13    | 9,13  | 8,29  | 8,84  | 17,68   | 17,09 |
| Brita (M <sub>br</sub> ) (kg)           | 10,11   | 9,78  | 9,25    | 9,25  | 8,40  | 8,96  | 17,91   | 17,31 |
| Água calculada pelo a/c (L)             | 1,94    | 2,04  | 1,94    | 1,64  | 1,94  | 2,04  | 3,78    | 3,97  |
| Água (L) - total corrigido              | 2,16    | 2,25  | 2,04    | 1,74  | 2,07  | 2,32  | 4,03    | 4,21  |
| Primeira - Água (kg) – absorção         | 0,230   | 0,223 | 0,113   | 0,113 | 0,144 | 0,286 | 0,279   | 0,270 |
| Segunda - Água (kg) - 90%               | 1,714   | 1,806 | 1,726   | 1,453 | 1,723 | 1,800 | 3,350   | 3,520 |
| Terceira - Água (kg) - 10%              | 0,216   | 0,225 | 0,204   | 0,174 | 0,207 | 0,232 | 0,403   | 0,421 |
| Superplastificante (g)                  | 15,53   | 16,34 | 15,53   | 16,39 | 15,53 | 16,34 | 33,57   | 35,25 |

Nota: As composições: 3, 4, 5 e 6 foram produzidas com percentuais de água acima dos indicados pela correção realizada pelas Equações 15, 16 e 17.

As correções automáticas de dosagem de água no concreto foram realizadas de acordo com as Equações: 16, 17 e 18. No entanto, como informado na Nota da Tabela 15, as adições das

quatro faixas (3, 4, 5 e 6) foram realizadas acima dos seus respectivos valores de cálculo por erro operacional durante a produção do CAA. Logo, esta água excedente foi incorporada como se fosse água oriunda do fator  $a/c$ , de tal forma que os valores declarados para  $a/c$  na Tabela 11, na realidade devem ser aproximadamente:  $a/c = 0,53$  (concreto 3),  $a/c = 0,43$  (concreto 4),  $a/c = 0,54$  (concreto 5) e  $a/c = 0,59$  (concreto 6).

As informações sobre o *Slump Flow Test* realizadas para os concretos produzidos são apresentadas na Tabela 16.

**Tabela 16 - Faixas experimentais de concreto no ensaio de espalhamento**

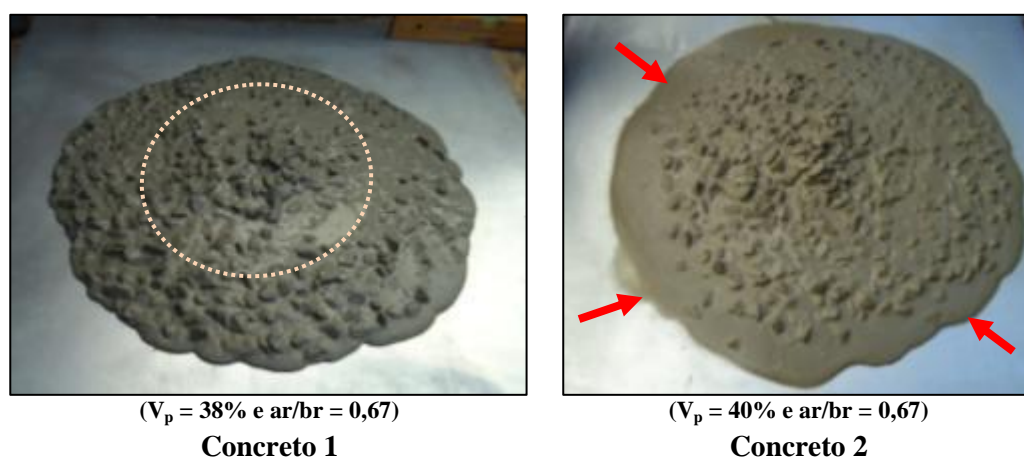
| CONCRETOS | <i>Slump Flow Test</i> (valores médios) |                   | <i>Enquadramento pelos critérios do Quadro 11</i> |                   |                       |                   |
|-----------|---|-------------------|---|-------------------|-----------------------|-------------------|
|           | $T_{500}$ (s)                           | Espalhamento (mm) | ABNT 15823-1:2010                                 |                   | Gomes e Barros (2009) |                   |
|           |   |                   | $T_{500}$ (s)                                     | Espalhamento (mm) | $T_{500}$ (s)         | Espalhamento (mm) |
| 1         | 1,8                                     | 615               | VS 1  | SF 1              | não atendido          | ok                |
| 2         | 2,5                                     | 676               | VS 2  | SF 2              | ok                    | ok                |
| 3         | 1,9                                     | 660               | VS 1  | SF 2              | não atendido          | ok                |
| 4         | 7,6                                     | 500               | VS 2  | não atendido      | não atendido          | não atendido      |
| 5         | 2,4                                     | 620               | VS 2  | SF 3              | ok                    | ok                |
| 6         | 2,0                                     | 770               | VS 2  | SF 3              | ok                    | ok                |
| 7         | 3,2                                     | 678               | VS 2  | SF 2              | ok                    | ok                |
| 8         | 2,8                                     | 705               | VS 2  | SF 2              | ok                    | ok                |

De uma maneira geral, verifica-se que os parâmetros avaliados foram atendimento de uma forma mais completa pelos quesitos da ABNT NBR 15823-1:2010. De tal maneira que apenas o concreto 4 não obteve classificação nas três faixas admissíveis para o espalhamento. Nos critérios definidos por Gomes e Barros (2009), três traços (1, 3 e 4) não atenderam os requisitos na faixa de tempo admissível para  $T_{500}$ . E ainda por estes mesmos autores relata-se que o espalhamento obtido no concreto 4 também não teve um valor dentro da faixa admissível. Porém, os critérios de segregação, uniformidade de distribuição, coesão, não são verificados por estes parâmetros. Para isso, a sequência de informações apresenta ilustrações e novas informações a respeito destas amostras, baseadas principalmente nos testes de espalhamento.

As realizações experimentais aconteceram de forma sucessiva de acordo com as avaliações antecedentes, onde a elaboração das etapas seguintes era condicionada aos resultados anteriores. Para a produção dos concretos 1 e 2, foram levadas em consideração os fatores

desenvolvidos na etapa de avaliação da pasta e do esqueleto granular (a/c, a/f, ar/br, sp/c, f/c). Esta variação foi projetada para os volumes de pasta ( $V_p$ ) de 38%, 40% e 42%. No entanto, pelos fatos observados já na consistência do volume de pasta 38% e 40%, verificaram-se problemas que aparentemente indicavam o excesso de brita e a falta de areia, de tal maneira que a faixa de  $V_p = 42\%$  não foi experimentada nesse momento.

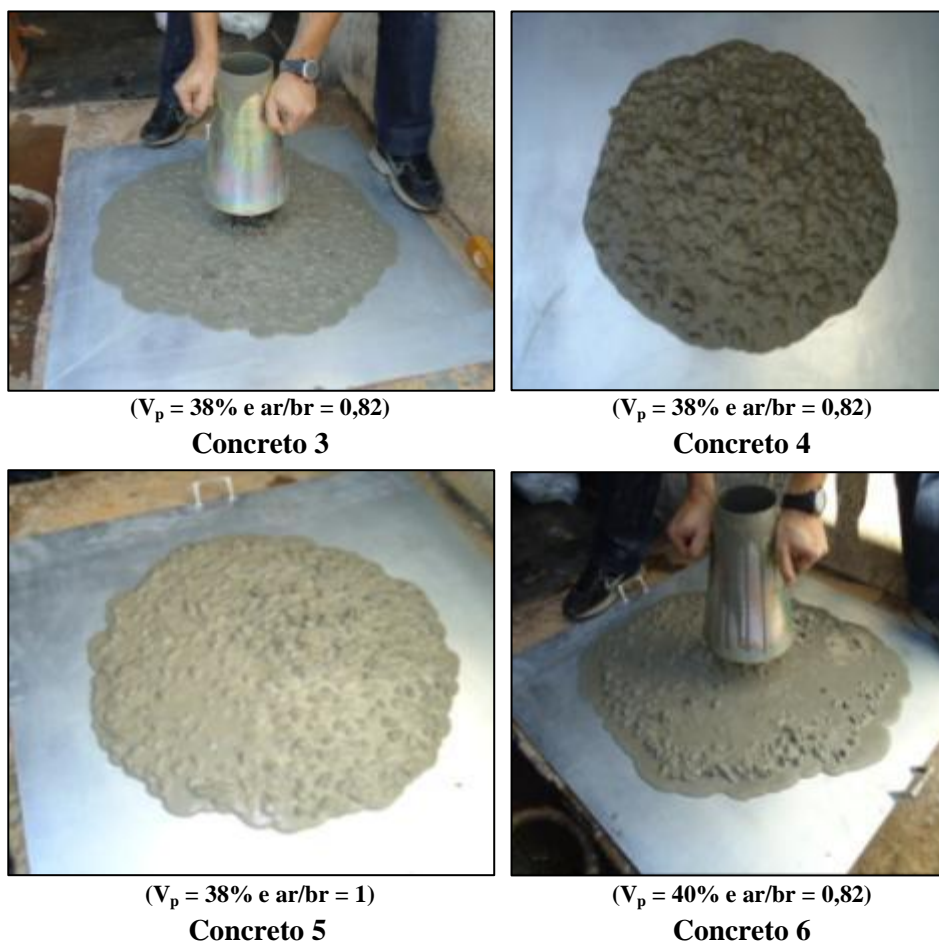
Nas primeiras verificações pelo *Slump Flow Test* foram notados excesso de brita na mistura pelo acúmulo no centro da placa de aço após estabilizado o movimento, para o concreto 1 com  $V_p$  38% (Figura 43). Para o concreto 2, que possuía apenas o volume de pasta maior que o concreto 1, sendo  $V_p = 40\%$ , além deste mesmo problema, ocorreu a segregação entre a pasta e a brita com a formação de uma camada exterior distinta de cerca de 3 cm em volta do concreto (Figura 43).



**Figura 43 - Espalhamento dos concretos 1 e 2**

Para estes dois concretos, a baixa quantidade de areia, 40% na relação  $ar/br = 0,67$ , implicava no baixo teor de argamassa, impactando no efeito do espalhamento do concreto. Identificou-se que esta segregação e consequente baixo rendimento de rolagem do agregado gráudo estaria associado ao baixo teor de argamassa que o envolvia. Com as condições observadas na etapa 1, projetaram-se as novas composições da etapa 2. A proposta nesta etapa foi trabalhar com uma relação  $ar/br$  de 0,82, com mais areia em relação a anterior ( $ar/br = 0,67$ ). A nova relação,  $ar/br = 0,82$ , que era de 45% areia e 55% de brita também possuía uma elevada MU (entre 1950 e 2019  $kg/m^3$ ). Na Figura 44 são apresentados os espalhamentos dos concretos 3, 4, 5 e 6.





**Figura 44 - Espalhamento dos concretos: 3, 4, 5 e 6**

O comportamento das composições 3, 5 e 6, mostrou que além da separação entre fases do material, ocorreu um descontrolado espalhamento, caracterizando falta de coesão (Figura 45). Este fato foi comprovado pela análise posterior dos dados experimentais onde constatou-se que na realidade os fatores  $a/c$  eram maiores que os calculados, sendo  $a/c = 0,53$  para o concreto 3,  $a/c = 0,54$  para o concreto 5,  $a/c = 0,59$  para o concreto 6. Desta forma, a argamassa que envolvia o agregado graúdo possuía uma elevada relação  $a/c$  considerando que a relação  $sp/c$  era de 0,4%. Para a amostra 4, embora o  $a/c$  praticado tenha sido maior que o projetado na Tabela 15, ele era de apenas 0,43, neste caso verificou-se um baixo espalhamento e conseqüente acúmulo de brita no centro.





**Figura 45 - Amostra do concreto 4**

Nota: observa-se a separação entre materiais e o excesso de água.

Com a avaliação das etapas 1 e 2, o desenvolvimento proposto para a etapa 3 objetivou além do Ensaio do Espalhamento no Cone de Abrams, as avaliações do Anel-J ( $BS_1$ ) da Caixa-L e do Funil-V. A Figura 46 traz ilustrações dos concretos 7 e 8.



( $V_p = 40\%$  e  $ar/br = 0,82$ )

**Concreto 7**

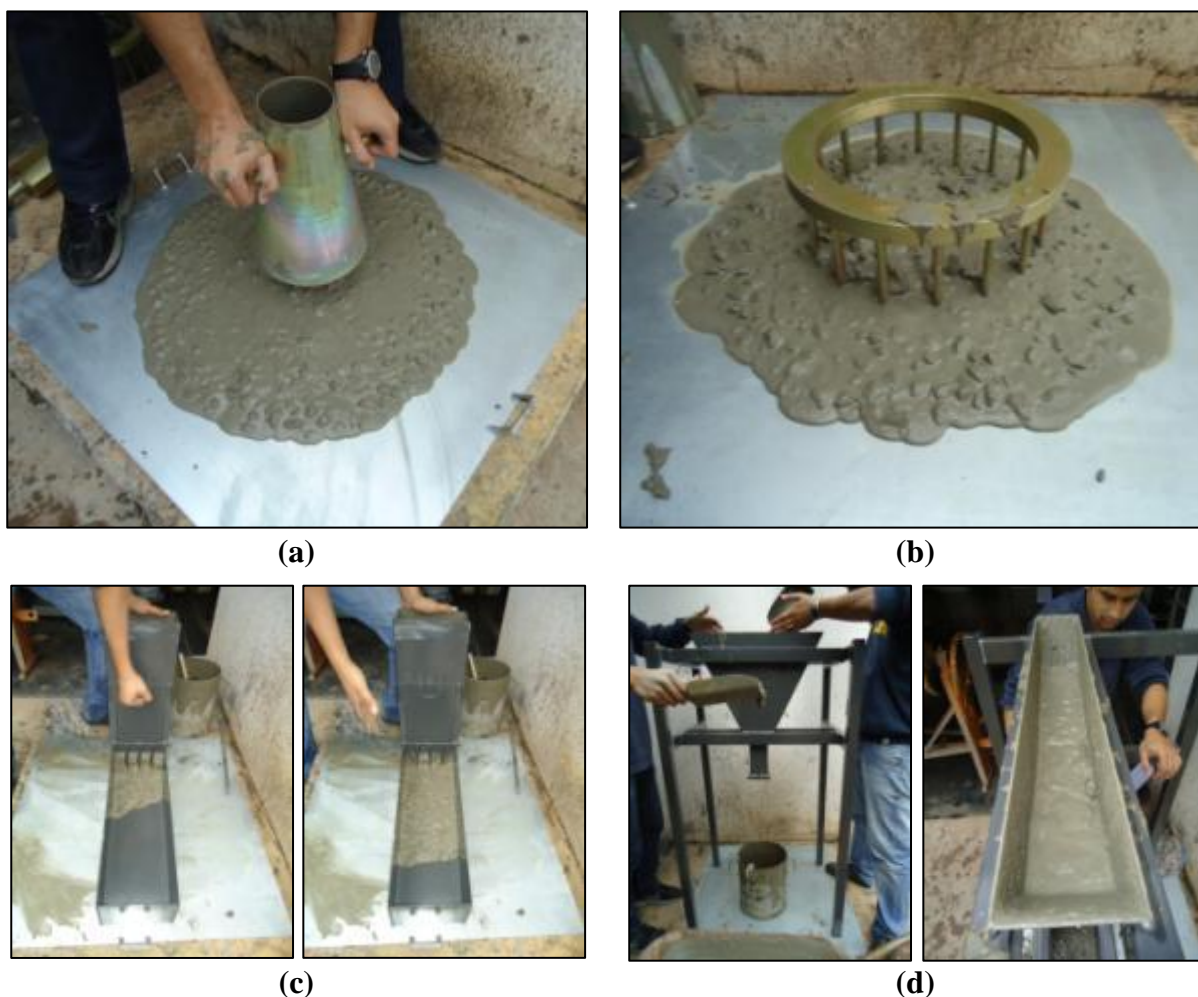


( $V_p = 42\%$  e  $ar/br = 0,82$ )

**Concreto 8**

**Figura 46 - Espalhamento dos concretos: 7 e 8.**

Na composição 8, verificou-se formação do anel de pasta em torno dos agregados, caracterizando segregação com um possível excedente do volume de pasta, neste caso era de  $V_p = 42\%$ . Este problema não foi verificado no concreto 7 com  $V_p = 40\%$  e mesma relação a/c (0,45), conseqüentemente, objetivou-se experimentá-lo nos demais testes dos critérios da sequência A (3.2.2) que podem ser visualizados na Figura 47. A massa específica do concreto 7 foi de 2423 kg/m<sup>3</sup>.



**Figura 47 - Ensaio de adensabilidade do concreto 7**

Nota: (a) *Slump Flow Test*, (b) Teste do Anel-Japonês, (c) Caixa-L e (d) Funil-V.

As medições do Anel-J ( $BS_j$ ) conforme a metodologia, obteve a média de afastamento de 14mm, superior em 4mm ao limite máximo estipulado. Da mesma forma, também observou acúmulo de brita no interior e excesso de argamassa nas bordas. Para os testes da Caixa-L e do Funil-V verificou-se segregação entre a argamassa e o agregado graúdo, de tal maneira que nos dois testes o material não escoou completamente, impossibilitando as medições determinadas em cada método.

Os concretos gerados neste estudo complementar, não proporcionavam resultados satisfatórios para a obtenção do CAA perante o atendimento dos parâmetros de autoadensibilidade. Além disso, foram identificados nesse momento, problemas relacionados ao tamanho e forma do agregado graúdo pela execução prática dos ensaios da Caixa-L e do Funil-V. Verificou-se que a brita utilizada além de possuir uma quantidade considerável de pedras próximos do maior diâmetro admissível de 20mm, também possuía forma lamelar

dificultando o movimento de rolagem no escoamento do concreto. Notaram-se também pela separação da argamassa da brita nítidos efeitos da elevada segregação. Juntam-se ainda a estes problemas os aspectos notados pela falta de coesão e baixa viscosidades dos concretos ensaiados. Desta maneira, este estudo complementar proporcionou informações importantes para o direcionamento da metodologia central.

### 4.3 ESTUDO DA ARGAMASSA – *Fase 3*

Primeiramente foram avaliadas argamassas sem a CBC no Ensaio do Tronco de Cone na Mesa de Consistência e posteriormente foram estudadas as argamassas com CBC. Assim, como já estabelecido no item 3.2.3.3, os critérios de verificação da condição ótima de dosagem de superplastificante nas argamassas foram de  $G_m = 5 \pm 0,5$  para o espalhamento relativo e  $R_m = 1 \pm 0,1$  para o escoamento relativo. Os controles da temperatura, bem como da umidade relativa do ar, seguiram os propostos no estudo da pasta. Durante a produção das amostras de todas as argamassas, verificou-se que as suas temperaturas ficaram na faixa de  $22^\circ\text{C} \pm 5$  com umidade relativa do ar de  $60\% \pm 15$ .

#### 4.3.1 Estudo da Argamassa

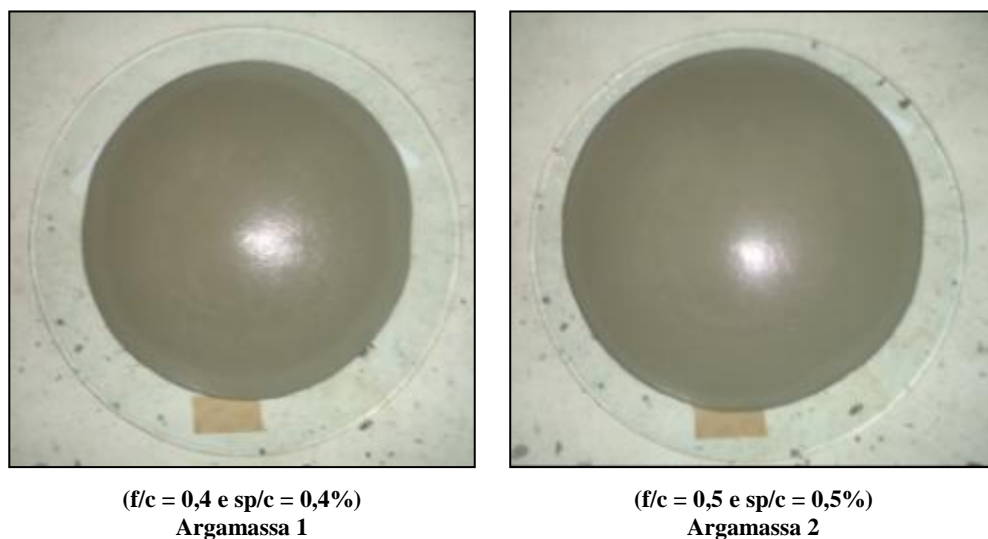
Alguns fatores determinados no estudo da pasta serviram de premissas para o estudo da argamassa. Na composição da argamassa 1 (Tabela 17) os fatores utilizados foram retirados da pasta ótima (pasta 34). Os resultados obtidos para a argamassa 1, foram satisfatórios e expressaram os índices requeridos de  $G_m$  e  $R_m$ . No entanto, foi realizado o estudo desta composição também com uma dosagem maior de filer e superplastificante (argamassa 02) com o intuito de verificar a tendência de deformação da argamassa. Os resultados e as composições das duas argamassas são apresentados na Tabela 17.

**Tabela 17 – Composição e resultados para argamassas sem CBC**

| COMPOSIÇÃO DA ARGAMASSA |            |            |            |             |            |            |             |               |               | RESULTADOS DOS ENSAIOS |             |              |             |                                    |             |
|-------------------------|------------|------------|------------|-------------|------------|------------|-------------|---------------|---------------|------------------------|-------------|--------------|-------------|------------------------------------|-------------|
| a/c                     | f/c        | sp/c (%)   | ar/c       | Cimento (g) | Filer (g)  | Areia (g)  | Aditivo (g) | Água 80% (ml) | Água 20% (ml) | $G_m$                  | Tempo (s)   | $R_m$        | Esp. (mm)   | M. específica (kg/m <sup>3</sup> ) |             |
| <i>1</i>                | <i>0,5</i> | <i>0,4</i> | <i>0,4</i> | <i>2</i>    | <i>700</i> | <i>280</i> | <i>1400</i> | <i>2,8</i>    | <i>278,4</i>  | <i>69,6</i>            | <i>5,27</i> | <i>10,77</i> | <i>0,93</i> | <i>313</i>                         | <i>2271</i> |
| 2                       | 0,5        | 0,5        | 0,5        | 2           | 700        | 350        | 1400        | 3,5           | 278,0         | 69,5                   | 6,62        | 11,82        | 0,85        | 345                                | 2191        |

Nota: As marcações em **negrito** e *italico* representam a melhor combinação de materiais para argamassa sem CBC.

Visualmente as duas argamassas apresentaram uma consistência desejada (Figura 48). Ambas espalharam de forma homogênea, no entanto somente a argamassa 1 apresentou os parâmetros desejados de  $G_m$  e  $R_m$ .



**Figura 48 – Espalhamento pelo ensaio do Tronco de Cone na Mesa de Consistência**

Neste estudo preliminar foram fixados os seguintes fatores:  $a/c = 0,5$ ,  $f/c = 0,4$ ,  $sp/c = 0,4\%$  e  $ar/c = 2$  (argamassa 1). Estes servirão de base para a estruturação do estudo do concreto autoadensável sem CBC na fase 4. Verificou-se que o acréscimo de areia na razão  $ar/c = 2$  na pasta ótima proporciona uma argamassa com potencial para compor o traço de um concreto com propriedades autoadensáveis.

#### **4.3.2 Estudo da Argamassa com CBC**

Os fatores obtidos na pasta ótima também serviram de parâmetros para o desenvolvimento da argamassa com CBC. Nesta etapa, além do acréscimo do fator  $ar/c = 2$  também se tinham as substituições em massa da areia pela CBC. As taxas de substituição experimentadas foram: 5%, 10%, 20%, 25%, 30% e 40%. Na Tabela 18 são apresentadas estas composições e os resultados gerados pelo Ensaio do Tronco de Cone na Mesa de Consistência. Ao todo, nesta etapa foram avaliadas 25 argamassas numeradas de 3 a 27.

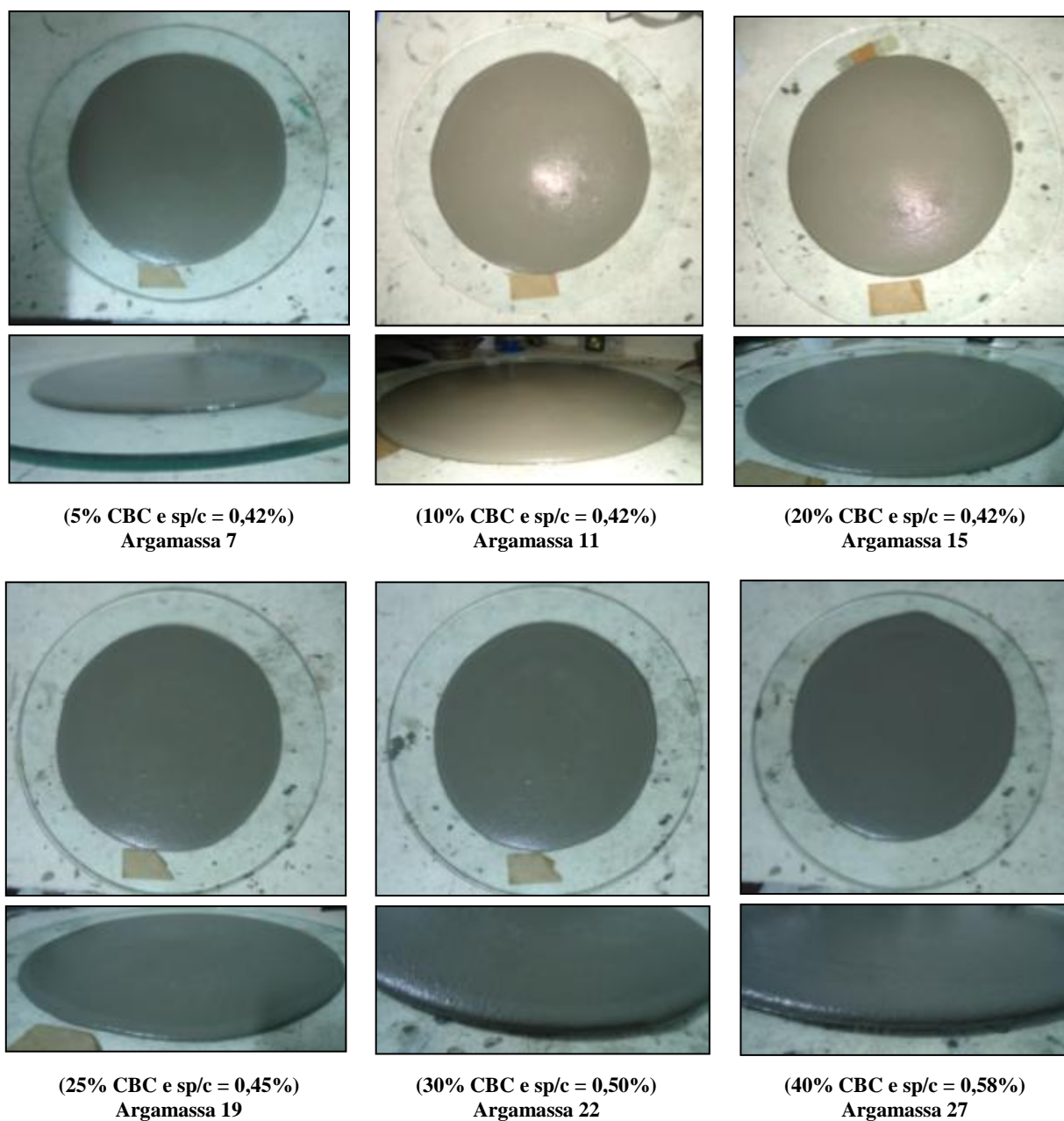
Tabela 18 – Composição e resultados para argamassas com CBC

| COMPOSIÇÃO DA ARGAMASSA |     |          |      |             |           |             |             |            |             |               |               | RESULTADOS DOS ENSAIOS |             |                |             |                                    |             |
|-------------------------|-----|----------|------|-------------|-----------|-------------|-------------|------------|-------------|---------------|---------------|------------------------|-------------|----------------|-------------|------------------------------------|-------------|
| a/c                     | f/c | sp/c (%) | ar/c | % CBC       | CBC (g)   | Cimento (g) | Fileira (g) | Areia (g)  | Aditivo (g) | Água 80% (ml) | Água 20% (ml) | G <sub>m</sub>         | Tempo (s)   | R <sub>m</sub> | Esp. (mm)   | M. específica (kg/m <sup>3</sup> ) |             |
| 3                       | 0,5 | 0,4      | 2    | 5           | 70        | 700         | 280         | 1330       | 2,10        | 280,0         | 70,0          | 1,03                   | 2,84        | 3,52           | 178         | 2145                               |             |
| 4                       |     |          |      | 5           | 70        | 700         | 280         | 1330       | 2,45        | 279,8         | 69,9          | 3,24                   | 6,45        | 1,55           | 258         | 2180                               |             |
| 5                       |     |          |      | 5           | 70        | 700         | 280         | 1330       | 2,80        | 279,6         | 69,9          | 3,41                   | 7,8         | 1,28           | 263         | 2195                               |             |
| 6                       |     |          |      | 5           | 70        | 700         | 280         | 1330       | 3,15        | 279,4         | 69,9          | 5,86                   | 10,6        | 0,94           | 328         | 2214                               |             |
| 7                       |     |          |      | <b>0,42</b> | <b>5</b>  | <b>70</b>   | <b>700</b>  | <b>280</b> | <b>1330</b> | <b>2,94</b>   | <b>279,5</b>  | <b>69,9</b>            | <b>4,95</b> | <b>10,6</b>    | <b>0,95</b> | <b>305</b>                         | <b>2201</b> |
| 8                       |     |          |      | 0,35        | 10        | 140         | 700         | 280        | 1260        | 2,45          | 279,7         | 69,9                   | 3,53        | 5,86           | 1,71        | 266                                | 2158        |
| 9                       |     |          |      | 0,40        | 10        | 140         | 700         | 280        | 1260        | 2,80          | 279,5         | 69,9                   | 4,76        | 8,37           | 1,19        | 300                                | 2222        |
| 10                      |     |          |      | 0,45        | 10        | 140         | 700         | 280        | 1260        | 3,15          | 279,3         | 69,8                   | 5,23        | 11,2           | 0,89        | 312                                | 2192        |
| 11                      |     |          |      | <b>0,42</b> | <b>10</b> | <b>140</b>  | <b>700</b>  | <b>280</b> | <b>1260</b> | <b>2,94</b>   | <b>279,5</b>  | <b>69,9</b>            | <b>5,11</b> | <b>10,3</b>    | <b>0,96</b> | <b>309</b>                         | <b>2200</b> |
| 12                      |     |          |      | 0,35        | 20        | 280         | 700         | 280        | 1120        | 2,45          | 279,6         | 69,9                   | 3,08        | 6,24           | 1,60        | 253                                | 2168        |
| 13                      |     |          |      | 0,40        | 20        | 280         | 700         | 280        | 1120        | 2,80          | 279,4         | 69,9                   | 3,49        | 8,88           | 1,13        | 265                                | 2181        |
| 14                      |     |          |      | 0,45        | 20        | 280         | 700         | 280        | 1120        | 3,15          | 279,2         | 69,8                   | 5,80        | 11,5           | 0,87        | 326                                | 2202        |
| 15                      |     |          |      | <b>0,42</b> | <b>20</b> | <b>280</b>  | <b>700</b>  | <b>280</b> | <b>1120</b> | <b>2,94</b>   | <b>279,3</b>  | <b>69,8</b>            | <b>4,57</b> | <b>10,8</b>    | <b>0,92</b> | <b>295</b>                         | <b>2180</b> |
| 16                      |     |          |      | 0,35        | 25        | 350         | 700         | 280        | 1050        | 2,45          | 279,6         | 69,9                   | 2,76        | 7,5            | 1,33        | 243                                | 2116        |
| 17                      |     |          |      | 0,40        | 25        | 350         | 700         | 280        | 1050        | 2,80          | 279,4         | 69,8                   | 3,23        | 9,1            | 1,10        | 257                                | 2120        |
| 18                      |     |          |      | 0,42        | 25        | 350         | 700         | 280        | 1050        | 2,94          | 279,3         | 69,8                   | 3,68        | 9,58           | 1,04        | 271                                | 2108        |
| 19                      |     |          |      | <b>0,45</b> | <b>25</b> | <b>350</b>  | <b>700</b>  | <b>280</b> | <b>1050</b> | <b>3,15</b>   | <b>279,2</b>  | <b>69,8</b>            | <b>4,78</b> | <b>10,0</b>    | <b>1,00</b> | <b>301</b>                         | <b>2194</b> |
| 20                      |     |          |      | 0,40        | 30        | 420         | 700         | 280        | 980         | 2,80          | 279,3         | 69,8                   | 3,03        | 7,23           | 1,38        | 251                                | 2150        |
| 21                      |     |          |      | 0,45        | 30        | 420         | 700         | 280        | 980         | 3,15          | 279,1         | 69,8                   | 3,82        | 9,57           | 1,04        | 275                                | 2149        |
| 22                      |     |          |      | <b>0,50</b> | <b>30</b> | <b>420</b>  | <b>700</b>  | <b>280</b> | <b>980</b>  | <b>3,50</b>   | <b>278,9</b>  | <b>69,7</b>            | <b>4,68</b> | <b>10,5</b>    | <b>0,95</b> | <b>298</b>                         | <b>2109</b> |
| 23                      |     |          |      | 0,45        | 40        | 560         | 700         | 280        | 840         | 3,15          | 279,0         | 69,7                   | 1,09        | 5,5            | 1,82        | 181                                | 1998        |
| 24                      |     |          |      | 0,50        | 40        | 560         | 700         | 280        | 840         | 3,50          | 278,8         | 69,7                   | 2,64        | 8,47           | 1,18        | 239                                | 2047        |
| 25                      |     |          |      | 0,55        | 40        | 560         | 700         | 280        | 840         | 3,85          | 278,6         | 69,6                   | 3,10        | 9,89           | 1,01        | 253                                | 2073        |
| 26                      |     |          |      | 0,60        | 40        | 560         | 700         | 280        | 840         | 4,20          | 278,4         | 69,6                   | 5,45        | 11,4           | 0,88        | 318                                | 2119        |
| 27                      |     |          |      | <b>0,58</b> | <b>40</b> | <b>560</b>  | <b>700</b>  | <b>280</b> | <b>840</b>  | <b>4,06</b>   | <b>278,5</b>  | <b>69,6</b>            | <b>5,03</b> | <b>10,2</b>    | <b>0,98</b> | <b>307</b>                         | <b>2116</b> |

Nota: As marcações em **negrito** e *itálico* representam a melhor combinação de materiais pelos testes de G<sub>m</sub> e R<sub>m</sub> em cada taxa de substituição de areia por CBC.

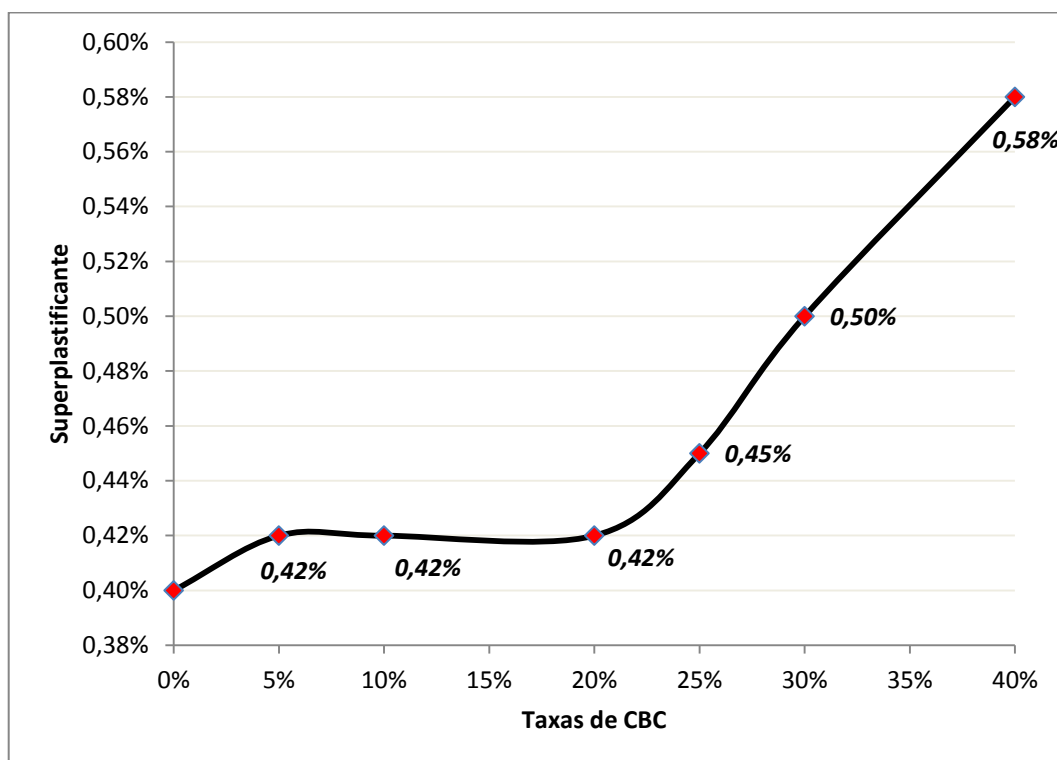
A Figura 49 ilustra o espalhamento das argamassas 7, 11, 15, 19, 22 e 27. Estas argamassas foram as que apresentaram melhores resultados dentro de cada taxa de substituição de areia por CBC.





**Figura 49 – Espalhamento para as argamassas com melhores resultados para cada taxa de substituição da areia por CBC**

Na Figura 50, assim como na Tabela 18, observa-se que a CBC, utilizada como agregado miúdo em substituição parcial da areia, altera a reologia de argamassas com características autoadensáveis, necessitando de maior quantidade de aditivo químico para manter a mesma consistência e fluidez conforme se aumentam as taxas de substituição.



**Figura 50 – Evolução do ponto de saturação pelo aumento da taxa de CBC em substituição a areia**

Nesta etapa, foram desenvolvidas argamassas com CBC com potenciais para produção de CAA. Para cada taxa de substituição de areia por CBC foi estudada a dosagem ótima de superplastificante (sp/c). Na experimentação proposta na fase 5 (item 4.6), relativa ao desenvolvimento do CAA-CBC, serão primeiramente estudadas as argamassas com as taxas de substituição até 20%. Esta lógica foi determinada pela menor exigência de superplastificante para obtenção da fluidez desejada. Realçando as eventuais possibilidades de novas adições experimentais de superplastificante para obtenção das propriedades autoadensáveis esperadas no concreto.



#### 4.4 DESENVOLVIMENTO DO CAA – **Fase 4**

No item 4.3.1 foi desenvolvida a composição da argamassa para o estudo experimental do concreto autoadensável sem CBC. Neste concreto foi utilizada a brita “B” caracterizada no item 4.1.2. O desafio nesta etapa é determinar o percentual ótimo do volume de argamassa ( $V_{arg}$ ) e o consequente volume de brita ( $V_{br}$ ) que proporcionem ao concreto estudado características de concreto autoadensável.

##### 4.4.1 Estudo do Estado Fresco

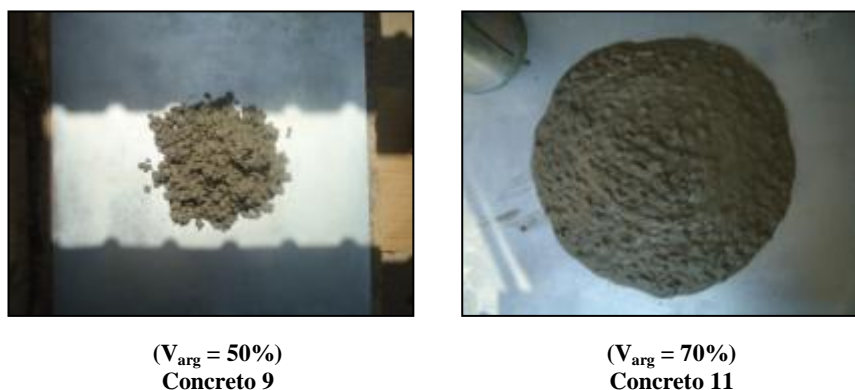
Nesta etapa, conforme a Tabela 19, foram propostas a experimentação de três faixas iniciais de variação de  $V_{arg}$ ; 50%, 60% e 70%, de tal maneira que geraram-se os traços unitários para os concretos 9, 10 e 11. A temperatura ambiente ficou na faixa de  $22^{\circ}\text{C} \pm 5$  e a umidade relativa do ar ficou na faixa  $60\% \pm 15$  durante a realização de todos os ensaios.

**Tabela 19 – Traço unitário dos concretos com  $V_{arg}$ : 50%, 60% e 70%**

| CONCRETOS          | 9     | 10    | 11    |
|--------------------|-------|-------|-------|
| Volume argamassa   | 50%   | 60%   | 70%   |
| Cimento            | 1     | 1     | 1     |
| Filer              | 0,40  | 0,40  | 0,40  |
| Areia ( $M_{ar}$ ) | 2     | 2     | 2     |
| Brita ( $M_{br}$ ) | 4,95  | 3,30  | 2,12  |
| Água               | 0,5   | 0,5   | 0,5   |
| Superplastificante | 0,004 | 0,004 | 0,004 |

Nota: Os três traços unitários estão baseados na composição da argamassa 1.

Os critérios de investigação nesta etapa foram baseados no ensaio de espalhamento. O concreto 9 (Figura 51) obteve um espalhamento completamente fora dos aspectos esperados de fluidez. Sua consistência apresentava de forma nítida baixo volume de argamassa, isto até mesmo para um concreto que não tenha exigências autoadensáveis. Desta forma, pelo baixo desempenho do  $V_{arg} = 50\%$ , que teve espalhamento de apenas 380mm, objetivou-se na sequência a experimentação do concreto que possuía o maior volume de argamassa, ou seja o concreto 11. Este já apresentou espalhamento de 515mm (Figura 51).



**Figura 51 – Concretos 9 e 11 na placa de espalhamento**

Após estas experimentações iniciais foi possível detectar que embora os resultados ainda não fossem satisfatórios para o espalhamento, que o desenvolvimento do CAA nestas características e com estes materiais dependeria do limite superior de argamassa estipulado ( $V_{arg} = 70\%$ ). Portanto, almejando-se as propriedades autoadensáveis, nesta condição foram projetadas duas novas composições para a investigação proposta (Tabela 20).

**Tabela 20 – Traço unitário dos concretos 11 e 12**

| CONCRETOS          | 11    | 12    |
|--------------------|-------|-------|
| Volume argamassa   | 70%   | 70%   |
| Cimento            | 1     | 1     |
| Filer              | 0,40  | 0,40  |
| Areia (Mar)        | 2     | 2     |
| Brita (Mbr)        | 2,12  | 2,12  |
| Água               | 0,5   | 0,5   |
| Superplastificante | 0,004 | 0,005 |

Na realidade, conforme visualizado na Tabela 20, foi produzido e ensaiado novamente uma amostra do concreto 11 conforme os fatores originais estabelecidos na argamassa 1. O outro concreto produzido nesta etapa, o concreto 12, possuía maior quantidade de superplastificante com o intuito de melhorar a fluidez. Os valores experimentais das propriedades autoadensáveis são apresentados na Tabela 21. Todos estes valores referem-se à sequência “B” de produção conforme item 3.2.1.6.2 e os seus respectivos espalhamentos podem ser visualizados na Figura 52.

**Tabela 21 – Resultados dos ensaios autoadensáveis dos concretos 11 e 12**

| Método de ensaio   | Propriedade Investigada  | Unidade           | Concreto 11 |      |                     | Concreto 12 |      |                     |
|--------------------|--|-------------------|-------------|------|---------------------|-------------|------|---------------------|
|                    |  |                   | Valores     | A    | B                   | Valores     | A    | B                   |
| ESPALHAMENTO       | Espalhamento ( <i>Slump-flow</i> )                                 | mm                | <b>590</b>  | SF 1 | <i>não atendido</i> | <b>686</b>  | SF 2 | <i>ok</i>           |
|                    | Viscosidade plástica aparente $t_{500}$ sob fluxo livre            | s                 | <b>1,8</b>  | VS 1 | <i>não atendido</i> | <b>2,1</b>  | VS 2 | <i>ok</i>           |
| ANEL-J             | Habilidade passante pelo Anel-J                                    | mm                | -           | -    | -                   | -           | -    | -                   |
|                    | Blocking step (efeito do bloqueio)                                 | mm                | -           | -    | -                   | <b>8,5</b>  | -    | <i>ok</i>           |
| CAIXA-L            | Tempo de escoamento $T_{L20}$                                      | s                 | -           | -    | -                   | <b>0,8</b>  | -    | <i>ok</i>           |
|                    | Tempo de escoamento $T_{L40}$                                      | s                 | -           | -    | -                   | <b>1,6</b>  | -    | <i>ok</i>           |
|                    | Habilidade passante pela Caixa-L                                   | (H2/H1)           | -           | -    | -                   | <b>0,82</b> | PL 2 | <i>ok</i>           |
| FUNIL-V            | Viscosidade plástica aparente pelo Funil-V                         | s                 | <b>5,4</b>  | VF 1 | <i>não atendido</i> | <b>7,1</b>  | VF 1 | <i>ok</i>           |
| TUBO-U             | Resistência à segregação pela análise do Tubo-U (RS 1, RS 2, RS 3) | %                 | -           | -    | -                   | <b>0,4</b>  | -    | <i>não atendido</i> |
|                    |  |                   | -           | -    | -                   | <b>0,34</b> | -    | <i>não atendido</i> |
|                    |  |                   | -           | -    | -                   | -           | -    | -                   |
| MASSA ESPECÍFICA A | Massa específica normal sem compactação                            | kg/m <sup>3</sup> | <b>2397</b> |      |                     | <b>2396</b> |      |                     |
| CONSUMO CIMENTO    | Consumo de cimento por m <sup>3</sup> de concreto                  | Kg/m <sup>3</sup> | <b>398</b>  |      |                     | <b>398</b>  |      |                     |

Nota: As colunas com a letra “A” classificam os valores experimentais de acordo com a NBR 15823-1:2010. As classificações da coluna “B” referem-se aos critérios relacionados por Gomes e Barros (2009). Os campos com o traço (-) indicam que não ocorreram experimentações ou não existem classificações pertinentes.



(sp/c = 0,4%)  
Concreto 11



(sp/c = 0,5%)  
Concreto 12

**Figura 52 – Repetição do concreto 11 e concreto 12 na placa de espalhamento**

Após a análise e realização dos testes, percebeu-se que a dosagem de superplastificante ótima ( $sp/c = 0,4\%$ ) determinada na argamassa não surtia o mesmo efeito de fluidez e espalhamentos esperados no concreto que o possibilitasse classificá-lo como autoadensável. A aplicação da dosagem  $sp/c = 0,5\%$  (concreto 12) proporcionou melhores resultados nos ensaios de: espalhamento, no Funil-V e na Caixa-L (Tabela 21). Porém, o resultado de sua resistência à segregação ficou abaixo do esperado no teste do Tubo-U. Contudo, os resultados visuais dos aspectos de coesão, viscosidade, espalhamento uniforme na placa, indicavam que os resultados do concreto 12 estariam próximos dos desejáveis pelos critérios de autoadensabilidade da ABNT NBR 15823-1:2010. Portanto, novamente repetiram os testes com uma nova produção do concreto 12 e uma nova composição de concreto, o de número 13 (Tabela 22). Os resultados dos parâmetros autoadensáveis são apresentados na Tabela 23.

**Tabela 22 – Traço unitário dos concretos 12 e 13**

| CONCRETOS          | 12    | 13     |
|--------------------|-------|--------|
| Volume argamassa   | 70%   | 70%    |
| Cimento            | 1     | 1      |
| Filer              | 0,40  | 0,40   |
| Areia (Mar)        | 2     | 2      |
| Brita (Mbr)        | 2,12  | 2,12   |
| Água               | 0,42* | 0,45*  |
| Superplastificante | 0,005 | 0,0055 |

Nota: \* para ambos os concretos (12 e 13) o fator  $a/c$  projetado era de 0,5, no entanto, controlava-se o lançamento de água durante a produção do concreto. Logo, as quantidades informadas na Tabela representam os fatores  $a/c$  reais utilizados em cada concreto. Neste caso utilizou-se menor quantidade de água em relação à água calculada pelo fator  $a/c$  inicial.

**Tabela 23 – Resultados dos ensaios autoadensáveis do novo concreto 12 e do concreto 13**

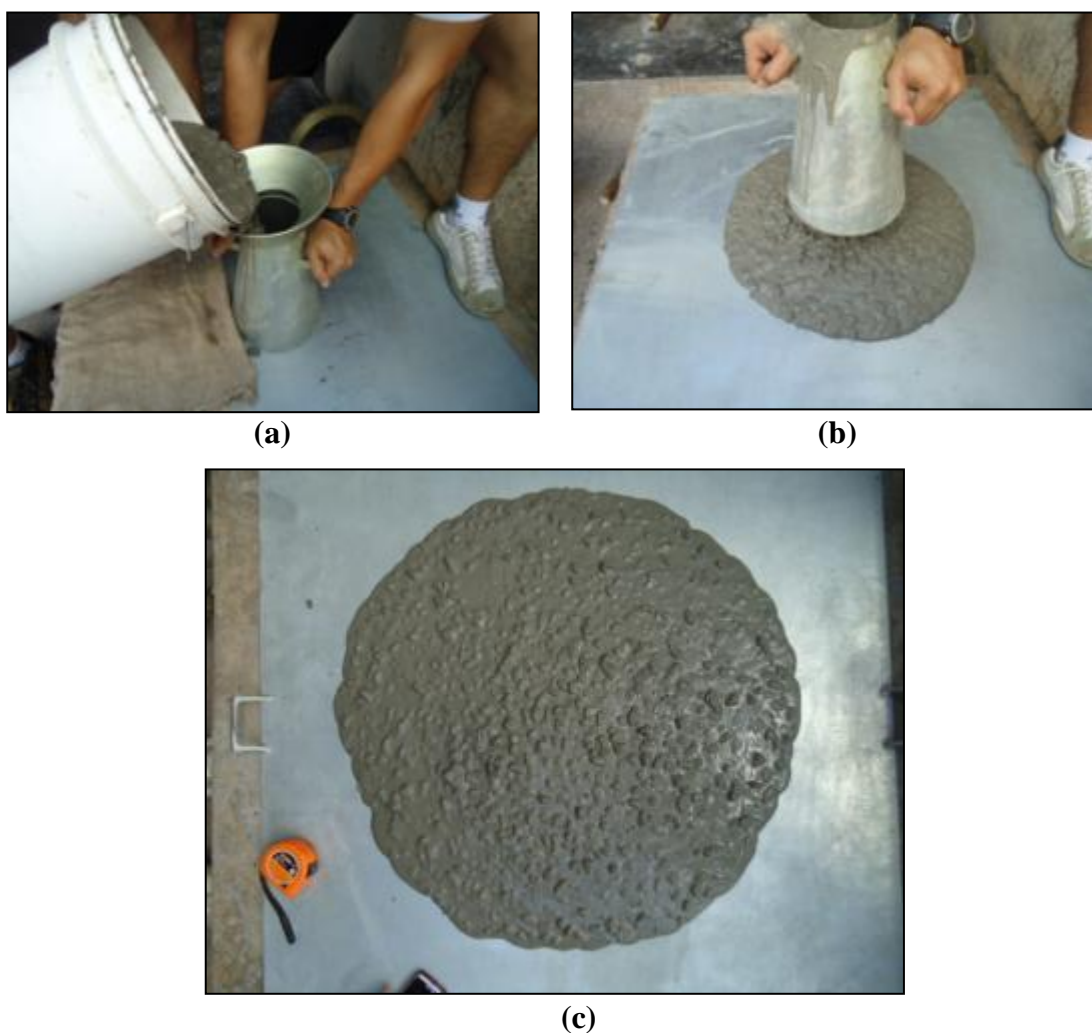
| Método de ensaio | Propriedade Investigada   | Unidade           | Concreto 12  |              |              | Concreto 13 |              |              |
|------------------|---|-------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|
|                  |   |                   | Valores      | A            | B            | Valores     | A            | B            |
| ESPALHAMENTO     | Espalhamento ( <i>Slump-flow</i> )                                  | Mm                | <b>677,5</b> | SF 2         | ok           | <b>745</b>  | SF 2         | ok           |
|                  | Viscosidade plástica aparente $t_{500}$ sob fluxo livre             | S                 | <b>2,0</b>   | VS 2         | ok           | <b>1,0</b>  | VS 1         | não atendido |
| ANEL-J           | Habilidade passante pelo Anel-J                                     | Mm                | -            | -            | -            | <b>125</b>  | não atendido | -            |
|                  | Blocking step (efeito do bloqueio)                                  | Mm                | <b>9,5</b>   | -            | ok           | <b>9,5</b>  | -            | ok           |
| CAIXA-L          | Tempo de escoamento $T_{L20}$                                       | S                 | <b>0,3</b>   | -            | ok           | <b>0,2</b>  | -            | ok           |
|                  | Tempo de escoamento $T_{L40}$                                       | S                 | <b>0,8</b>   | -            | ok           | <b>0,8</b>  | -            | ok           |
|                  | Habilidade passante pela Caixa-L                                    | (H2/H1)           | <b>0,68</b>  | não atendido | não atendido | <b>0,91</b> | PL 2         | ok           |
| FUNIL-V          | Viscosidade plástica aparente pelo Funil-V                          | S                 | <b>6,0</b>   | VF 1         | ok           | <b>5,3</b>  | VF 1         | não atendido |
| TUBO-U           | Resistência à segregação pela análise do Tubo-U (RS 1, RS 2 e RS 3) | %                 | <b>0,80</b>  | -            | não atendido | <b>0,92</b> | -            | ok (RS)      |
|                  |   |                   | <b>0,64</b>  | -            | não atendido | <b>0,94</b> | -            | ok           |
|                  |   |                   | <b>2,37</b>  | -            | não atendido | <b>0,93</b> | -            | ok           |
| MASSA ESPECÍFICA | Massa específica normal sem compactação                             | kg/m <sup>3</sup> | <b>2399</b>  |              |              | <b>2393</b> |              |              |
| CONSUMO CIMENTO  | Consumo de cimento por m <sup>3</sup> de concreto                   | Kg/m <sup>3</sup> | <b>404</b>   |              |              | <b>401</b>  |              |              |

Nota: As colunas com a letra “A” classificam os valores experimentais de acordo com a NBR 15823-1:2010. As classificações da coluna “B” referem-se aos critérios relacionados por Gomes e Barros (2009). Os campos com o traço (-) indicam que não ocorreram experimentações ou não existem classificações pertinentes.

Os concretos 12 e 13 apresentaram resultados parcialmente satisfatórios nas suas propriedades autoadensáveis. O concreto 12 teve reprovações diretas na habilidade passante pelo parâmetro PL (Caixa-L), bem como reprovações na resistência à segregação em todas as faixas RS medidas. O concreto 13 obteve resultados mais satisfatórios nos ensaios autoadensáveis. Apenas os quesitos de viscosidade plástica aparente VS no espalhamento e no Funil-V

tiveram reprovação nos parâmetros de Gomes e Barros (2009) e a habilidade passante PJ no Anel-J teve reprovação pela ABNT NBR 15823-1:210, os demais quesitos (Tabela 23) tiveram aprovações.

Na sequência, as Figuras 53, 54 e 55 apresentam uma esquematização ilustrativa do concreto 13 durante os ensaios de: espalhamento, Anel-J e Tubo-U.



**Figura 53 – Ensaio de espalhamento do concreto 13**

Nota: (a) lançamento contínuo e sem compactação do concreto (b) ilustração durante o movimento suave e uniforme de levantamento do cone de Abrams e (c) espalhamento final do concreto.

Embora o  $t_{500}$  (VS) para o concreto 13 não alcançou o desempenho proposto por Gomes e Barros (2009), o mesmo obteve aprovação pela ABNT NBR 15823-1:2010 enquadrando-se na faixa *VS 1*. Outro fator relevante a esta variação é o fato que para esta medição utiliza-se um cronômetro manual, o qual está sujeito a pequenas variações no seu manuseio. Na avaliação pelo Anel-J, embora o quesito de habilidade passante PJ não ter se enquadrado nas



faixas admissíveis da ABNT NBR 15823-1:2010, o teste de BS<sub>j</sub> complementar teve resultado positivo. Na Figura 54, pode-se visualizar que a consistência, o aspecto final e o próprio desempenho no espalhamento foram satisfatórios, inclusive com o tempo de espalhamento na marca de 500mm ( $t_{500j}$ ) = 1,74s. Na sequência a Figura 55 ilustrando o ensaio com o Tubo-U.



**Figura 54 – Ensaio do Anel-J para o concreto 13**

Nota: (a) lançamento do concreto (b) envolvimento do concreto nas barras durante o levantamento do cone de Abrams (c) aspecto do concreto após estabilização do movimento (d) vista lateral e (e) medição externa do parâmetro BS<sub>j</sub> e (f) medição do espalhamento (PJ).



**Figura 55 – Ensaio do Tubo-U para o concreto 13**

Nota: (a) lançamento contínuo do concreto (b) envolvimento do aparato aguardando pré-cura do concreto (c) Tubo-U aberto com o concreto semi-endurecido (d) processo de marcação e extração da amostra de 100mm (e) amostras retiradas para lavagem e (f) lavagem das amostras sobre peneira de 5mm de abertura.

Como pode ser visualizado na Figura 55, embora o concreto não tenha conseguido preenchimento completo na subida (5.c - face oposta ao lançamento), todas as faixas R.S. obtiveram resultados satisfatórios. Conclui-se que o mesmo apresenta como resistência à segregação o fator R.S. de 0,92 (GOMES, 2002).



A classificação do concreto 13, pelos Anexo A.1 e A.2 da ABNT NBR 15823-1:2010, permite dizer que o concreto obtido pode se enquadrar em uma categoria de concreto autoadensável adequado para a maioria das aplicações correntes operacionalizadas pelo lançamento do ponto mais alto de concretagem. O anexo A.2 ainda informa que este CAA dependerá de controles de exsudação e segregação durante a sua operacionalização. Como exemplo de aplicação à norma destaca as seguintes recomendações para este CAA: lajes, paredes-diafragma, pilares-parede, indústria de pré-moldados e para concreto aparente.

#### 4.4.2 Estudo do Estado Endurecido

Os concretos 12 e 13 foram submetidos aos ensaios de compressão (ABNT NBR 5739:2007) e tração por compressão diametral (ABNT NBR 7222:2011). Os resultados são apresentados na Tabela 24.

**Tabela 24 – Resistência à compressão e tração por compressão diametral aos 28 dias**

| Concretos      | Resistência à compressão ( $f_{ck}$ ) (MPa) | Resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ) (MPa) | Resistência à tração ( $f_{t,D}$ ) (MPa) | Resistência característica à tração ( $f_{t,D}$ ) (MPa) |
|----------------|---|--|--|---|
| 12             | 41,14                                       | 37,67  | 3,00                                     | 2,96  |
| 13             | 40,78                                       | 38,56  | 2,87                                     | 2,401   |
| <i>Varição</i> | <i>0,88%</i>                                | <i>2,36%</i>   | <i>4,33%</i>                             | <i>18,89%</i>   |

A pequena diferença, na dosagem de superplastificante e água no traço do concreto 12 para o concreto 13 (ver Tabela 22) também proporcionou uma pequena diferença na resistência característica à compressão, apenas 0,89 MPa (-2,36%). A diferença de 0,56 MPa na resistência característica à compressão diametral, embora maior, representou apenas 18,89% de variação entre os concretos. A Figura 56 mostra um corpo de prova do concreto 13 rompido à compressão diametral, nela é possível notar o espalhamento uniforme da brita e o envolvimento da argamassa sobre estes agregados.



**Figura 56 – Ensaio de compressão diametral do concreto 13**

Nota: (a) rompimento pelo ensaio ABNT NBR 7222 e (b) estrutura interna do concreto 13.

Perante a classificação da ABNT NBR 8953:1992 ambos os concretos pertencem ao grupo I e classe C35, ou seja, possuem resistências características à compressão maiores que 35 MPa e menores que 40 MPa. Com a determinação da resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ) e pelo auxílio da ABNT NBR 6118:2007 gerou-se a Tabela 25 para análise da resistência à tração.

**Tabela 25 – Análise da resistência à tração pela ABNT NBR 6118:2007**

| Concretos | ABNT NBR 7222:2011                                      | ABNT NBR 6118:2007   |  |
|-----------|---|--|--|
|           | Resistência característica à tração ( $f_{t,D}$ ) (MPa) | Resistência à tração média esperada ( $f_{ct,m}$ ) (MPa)<br>$f_{ct,m} = 0,3f_{ck}^{2/3}$ | Resistência à tração característica esperada ( $f_{ctk,inf}$ ) (MPa)<br>$f_{ctk,inf} = 0,7 f_{ct,m}$ |
| 12        | 2,96  | 3,37   | 2,360  |
| 13        | 2,401   | 3,42   | 2,397  |

Conforme a Tabela 25, realça-se que a resistência característica à tração obtida para os concretos 12 e 13 localizam-se dentro da faixa admissível esperada, sendo maiores que os valores calculados para  $f_{ctk,inf}$ .

## 4.5 DESENVOLVIMENTO DO CAA-CBC – **Fase 5**

Com o desenvolvimento das argamassas na etapa 4.3.2 foi proposto o estudo experimental do concreto autoadensável com a CBC. Assim como já foi informado no item 4.3.2, neste trabalho objetivou-se o desenvolvimento do concreto com argamassas com taxas de substituição de areia por CBC até 20%. O volume de argamassa ( $V_{arg}$ ) utilizado nos desenvolvimentos dos CAA-CBC foi retirado da experiência do item 4.4, ou seja,  $V_{arg} = 70\%$ . Também foi empregada a brita “B” caracterizada no item 4.1.2. Os resultados dos parâmetros autoadensáveis investigados e apresentados foram gerados da sequência “B” de produção conforme item 3.2.2. A temperatura ambiente durante a realização de todos os ensaios ficou na faixa de  $22^{\circ}\text{C} \pm 5$  e a umidade relativa do ar ficou na faixa  $60\% \pm 15$ .

### 4.5.1 Estudo do Estado Fresco

De início foi proposto o desenvolvimento do concreto com a maior taxa de substituição de areia por CBC, dentro da proposta experimental. A argamassa 15 com taxa de substituição de 20% foi a escolhida para a primeira tentativa experimental de obtenção do CAA-CBC. Com a adoção do volume de argamassa  $V_{arg} = 70\%$  gerou-se o concreto 14, cujo traço unitário é apresentado na Tabela 26.

**Tabela 26 – Traço unitário do concreto 14**

| CONCRETOS          | 14     |
|--------------------|--------|
| Volume argamassa   | 70%    |
| Cimento            | 1      |
| Filer              | 0,40   |
| Areia (Mar)        | 1,60   |
| CBC                | 0,40   |
| Brita (Mbr)        | 2,21   |
| Água               | 0,67*  |
| Superplastificante | 0,0042 |

Nota: \* o fator a/c projetado era de 0,5, no entanto, controlava-se o lançamento de água durante a produção do concreto. Logo, as quantidades informadas na Tabela representam os fatores a/c reais utilizados em cada concreto. Neste caso, utilizou-se mais água que a calculada pelo fator inicial.

Durante a produção do concreto 14 na sequência “A” de acordo com o item 3.2.2, notou-se uma baixa fluidez e conseqüente falta de trabalhabilidade com o fator projetado a/c = 0,5.

Desta maneira, como informado na Tabela 26, o fator a/c foi ajustado experimentalmente na busca de uma maior trabalhabilidade e capacidade de espalhamento. Neste momento não se buscava variar as demais condições da argamassa desenvolvida no estudo preliminar, como o fator sp/c. Os resultados das propriedades autoadensáveis do concreto 14 são apresentados na Tabela 27.

**Tabela 27 – Resultados dos ensaios autoadensáveis do concreto 14**

| Método de ensaio | Propriedade Investigada   | Unidade           | Concreto 14         |                     |                     |
|------------------|---|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                  |   |                   | Valores             | A                   | B                   |
| ESPALHAM<br>ENTO | Espalhamento ( <i>Slump-flow</i> )                                  | mm                | <b>645</b>          | <i>SF1</i>          | <i>ok</i>           |
|                  | Viscosidade plástica aparente $t_{500}$ sob fluxo livre             | s                 | <b>3,0</b>          | VS 2                | <i>ok</i>           |
| ANEL-J           | Habilidade passante pelo Anel-J                                     | mm                | -                   | -                   | -                   |
|                  | Blocking step (efeito do bloqueio)                                  | mm                | <b>11</b>           | -                   | <i>não atendido</i> |
| CAIXA-L          | Tempo de escoamento $T_{L20}$                                       | s                 | <b>1,9</b>          | -                   | <i>ok</i>           |
|                  | Tempo de escoamento $T_{L40}$                                       | s                 | <b>5,9</b>          | -                   | <i>não atendido</i> |
|                  | Habilidade passante pela Caixa-L                                    | (H2/H1)           | <i>não atendido</i> | <i>não atendido</i> | <i>não atendido</i> |
| FUNIL-V          | Viscosidade plástica aparente pelo Funil-V                          | s                 | -                   | -                   | -                   |
| TUBO-U           | Resistência à segregação pela análise do Tubo-U (RS 1, RS 2 e RS 3) | %                 | -                   | -                   | -                   |
|                  |   |                   | -                   | -                   | -                   |
|                  |   |                   | -                   | -                   | -                   |
| MASSA ESPECÍFICA | Massa específica normal sem compactação                             | kg/m <sup>3</sup> | <b>2409</b>         |                     |                     |
| CONSUMO CIMENTO  | Consumo de cimento por m <sup>3</sup> de concreto                   | Kg/m <sup>3</sup> | <b>383</b>          |                     |                     |

Nota: As colunas com a letra “A” classificam os valores experimentais de acordo com a NBR 15823-1:2010. As classificações da coluna “B” referem-se aos critérios relacionados por Gomes e Barros (2009). Os campos com o traço (-) indicam que não ocorreram experimentações ou não existem classificações pertinentes.

Na Figura 57 visualiza-se o espalhamento do concreto 14.



**Figura 57 – Ensaio de espalhamento concreto 14**

Embora o concreto 14 tenha atingido índices esperados no quesito espalhamento, o mesmo não alcançou resultados na habilidade passante, tanto nos ensaios da Caixa-L como no Anel-J (BS<sub>j</sub>). Inclusive a baixa capacidade passante entre as armaduras da Caixa-L impossibilitou a medição do parâmetro PL (H2/H1) pelo bloqueio das britas na armadura e não preenchimento do material no compartimento horizontal da caixa.

Objetivando a manutenção da maior taxa de CBC dentro do estipulado foi produzido o concreto 15 (Tabela 28). Nele, além do controle de lançamento de água também foi controlado o lançamento de superplastificante, de tal maneira que fossem alcançados os melhores resultados de fluidez e viscosidade plástica no estudo preliminar pela sequência “A” de produção.

**Tabela 28 – Traço unitário do concreto 15**

| CONCRETOS          | 15      |
|--------------------|---------|
| Volume argamassa   | 70%     |
| Cimento            | 1       |
| Filer              | 0,40    |
| Areia (Mar)        | 1,60    |
| CBC                | 0,40    |
| Brita (Mbr)        | 2,21    |
| Água               | 0,50    |
| Superplastificante | 0,0055* |

Nota: \* o superplastificante projetado era de 0,0042.

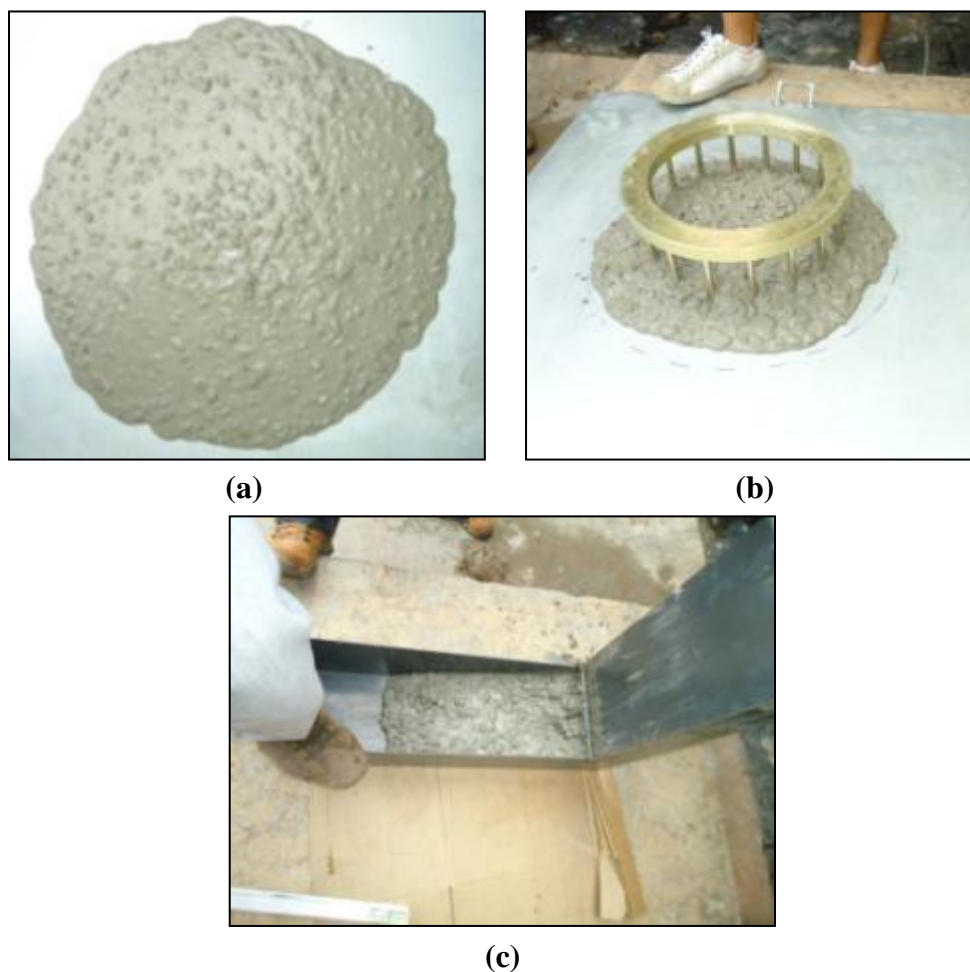
Os resultados dos parâmetros autoadensáveis investigados para o concreto 15 são apresentados na Tabela 29.

**Tabela 29 – Resultados dos ensaios autoadensáveis do concreto 15**

| Método de ensaio | Propriedade Investigada   | Unidade           | Concreto 15 |      |              |
|------------------|---|-------------------|-------------|------|--------------|
|                  |   |                   | Valores     | A    | B            |
| ESPALHAMEN<br>TO | Espalhamento ( <i>Slump-flow</i> )                                  | mm                | <b>685</b>  | SF 2 | ok           |
|                  | Viscosidade plástica aparente $t_{500}$ sob fluxo livre             | s                 | <b>2,8</b>  | VS 2 | ok           |
| ANEL-J           | Habilidade passante pelo Anel-J                                     | mm                | -           | -    | -            |
|                  | Blocking step (efeito do bloqueio)                                  | mm                | <b>19</b>   | -    | não atendido |
| CAIXA-L          | Tempo de escoamento $T_{L20}$                                       | s                 | -           | -    | -            |
|                  | Tempo de escoamento $T_{L40}$                                       | s                 | -           | -    | -            |
|                  | Habilidade passante pela Caixa-L                                    | (H2/H1)           | -           | -    | -            |
| FUNIL-V          | Viscosidade plástica aparente pelo Funil-V                          | s                 | -           | -    | -            |
| TUBO-U           | Resistência à segregação pela análise do Tubo-U (RS 1, RS 2 e RS 3) | %                 | -           | -    | -            |
|                  |   |                   | -           | -    | -            |
|                  |   |                   | -           | -    | -            |
| MASSA ESPECÍFICA | Massa específica normal sem compactação                             | kg/m <sup>3</sup> | <b>2392</b> |      |              |
| CONSUMO CIMENTO  | Consumo de cimento por m <sup>3</sup> de concreto                   | Kg/m <sup>3</sup> | <b>391</b>  |      |              |

Nota: As colunas com a letra “A” classificam os valores experimentais de acordo com a NBR 15823-1:2010. As classificações da coluna “B” referem-se aos critérios relacionados por Gomes e Barros (2009). Os campos com o traço (-) indicam que não ocorreram experimentações ou não existem classificações pertinentes.

Após a realização dos ensaios verificou-se que as reprovações do concreto 14 inerentes à habilidade passante na Caixa-L e no Anel-J também ocorreram no concreto 15. O Ganho obtido no espalhamento do concreto pela adoção da relação sp/c maior do que no concreto 14, não foi o suficiente para proporcionar uma melhor habilidade passante entre obstáculos. Novamente não foi possível realizar o ensaio da Caixa-L pelas baixas fluidez e capacidade passante do concreto. A Figura 58 mostra o aspecto do concreto 15 nos testes do espalhamento, do Anel-J e da Caixa-L.



**Figura 58 – Aspecto do concreto 15 no *Slump Flow Test*, no Anel-J e na Caixa-L**

Nota: (a) espalhamento do concreto (b) espalhamento no Anel-J inferior a 500mm e (c) espalhamento incompleto na Caixa-L.

O resultado no ensaio de espalhamento proporcionava resultados satisfatórios, no entanto o concreto apresentava propriedades de alta coesão e baixa fluidez quando submetidos aos ensaios da Caixa-L e do Anel-J. Nestes mesmos ensaios notava-se segregação entre a brita e a argamassa presentes no interior da caixa e no interior do anel, em relação à parte externa da caixa (horizontal) e a parte externa do anel. Notava-se então que o material gerado não tinha capacidade de se mover por entre obstáculos garantindo a sua homogeneidade e resistência à segregação.

Estas informações motivaram o estudo do CAA-CBC com taxas menores de substituição. A elevada coesão poderia estar associada à presença da CBC pelo mesmo comportamento observado na argamassa, onde o acréscimo de CBC requereria um acréscimo de superplastificante para manutenção da fluidez da mistura. Como a CBC utilizada possuía granulometria menor do que a areia, a redução da taxa de CBC poderia proporcionar um



esqueleto granulométrico mais próximo do CAA que não possuía CBC permitindo uma maior compreensão das propriedades autoadensáveis. Embora a taxa de CBC de 15% na argamassa não tenha sido estudada na etapa preliminar, foi possível estender também para esta taxa a informação do consumo de  $sp/c = 0,42\%$  haja visto que as taxas de 10% e de 20% apresentaram esta proporção de superplastificante. Porém as investigações foram iniciadas com a relação  $sp/c$  utilizada no desenvolvimento do concreto 15. Os próximos traços de concreto foram projetados com as taxas de substituição de areia por CBC de 15% e 10%, cujos traços unitários são apresentados na Tabela 30.

**Tabela 30 – Traços unitários dos concretos 16, 17 e 18**

| CONCRETOS          | 16     | 17     | 18     |
|--------------------|--------|--------|--------|
| Volume argamassa   | 70%    | 70%    | 70%    |
| Cimento            | 1      | 1      | 1      |
| Filer              | 0,40   | 0,40   | 0,40   |
| Areia (Mar)        | 1,70   | 1,70   | 1,80   |
| CBC                | 0,30   | 0,30   | 0,20   |
| Brita (Mbr)        | 2,21   | 2,21   | 2,21   |
| Água               | 0,50   | 0,50   | 0,50   |
| Superplastificante | 0,0055 | 0,0057 | 0,0055 |

A Figura 59 mostra o aspecto dos concretos 16, 17 e 18 nos respectivos ensaios de espalhamentos.



**Figura 59 – Ensaios de espalhamento para os concretos 16, 17 e 18**

Os resultados das propriedades autoadensáveis para os concretos 16, 17 e 18 são apresentados na Tabela 31. Neste momento, pela experiência dos traços anteriores foram produzidos quantidades para o estudo proposto na sequência “A” do procedimento experimental, ou seja, concreto suficiente para os ensaios: espalhamento, Anel-J, Caixa-L e Funil-V.



**Tabela 31 – Resultados dos ensaios autoadensáveis dos concretos 16, 17 e 18**

| Método de ensaio | Propriedade Investigada  | Unidade           | Concreto 16 |                     |                     | Concreto 17 |                     |                     | Concreto 18 |             |           |
|------------------|--|-------------------|-------------|---------------------|---------------------|-------------|---------------------|---------------------|-------------|-------------|-----------|
|                  |  |                   | Valores     | A                   | B                   | Valores     | A                   | B                   | Valores     | A           | B         |
| ESPALHAMENTO     | Espalhamento ( <i>Slump-flow</i> )                                 | mm                | <b>675</b>  | <i>SF 2</i>         | <i>ok</i>           | <b>690</b>  | <i>SF 2</i>         | <i>ok</i>           | <b>675</b>  | <i>SF 2</i> | <i>ok</i> |
|                  | Viscosidade plástica aparente $t_{500}$ sob fluxo livre            | s                 | <b>2,4</b>  | <i>VS 2</i>         | <i>ok</i>           | <b>2,8</b>  | <i>VS 2</i>         | <i>ok</i>           | <b>4,3</b>  | <i>VS 2</i> | <i>ok</i> |
| ANEL-J           | Habilidade passante pelo Anel-J                                    | mm                | -           | -                   | -                   | -           | -                   | -                   | -           | -           | -         |
|                  | Blocking step (efeito do bloqueio)                                 | mm                | <b>11,8</b> | -                   | <i>não atendido</i> | -           | -                   | -                   | <b>4,8</b>  | -           | <i>ok</i> |
| CAIXA-L          | Tempo de escoamento $T_{L20}$                                      | s                 | <b>1,6</b>  | -                   | <i>ok</i>           | <b>0,5</b>  | -                   | <i>ok</i>           | <b>0,6</b>  | -           | <i>ok</i> |
|                  | Tempo de escoamento $T_{L40}$                                      | s                 | <b>3,2</b>  | -                   | <i>ok</i>           | <b>1,6</b>  | -                   | <i>ok</i>           | <b>0,8</b>  | -           | <i>ok</i> |
|                  | Habilidade passante pela Caixa-L                                   | (H2/H1)           | <b>0,71</b> | <i>não atendido</i> | <i>não atendido</i> | <b>0,78</b> | <i>não atendido</i> | <i>não atendido</i> | <b>0,80</b> | <i>PL 2</i> | <i>ok</i> |
| FUNIL-V          | Viscosidade plástica aparente pelo Funil-V                         | s                 | <b>9,2</b>  | <i>VF 2</i>         | <i>ok</i>           | <b>9,4</b>  | <i>VF 2</i>         | <i>ok</i>           | <b>9,7</b>  | <i>VF 2</i> | <i>ok</i> |
| TUBO-U           | Resistência a segregação pela análise do Tubo-U (RS 1, RS 2, RS 3) | %                 | -           | -                   | -                   | -           | -                   | -                   | -           | -           | -         |
|                  |  |                   | -           | -                   | -                   | -           | -                   | -                   | -           | -           | -         |
|                  |  |                   | -           | -                   | -                   | -           | -                   | -                   | -           | -           | -         |
| MASSA ESPECÍFICA | Massa específica normal sem compactação                            | kg/m <sup>3</sup> | <b>2392</b> |                     |                     | <b>2396</b> |                     |                     | <b>2433</b> |             |           |
| CONSUMO CIMENTO  | Consumo de cimento por m <sup>3</sup> de concreto                  | Kg/m <sup>3</sup> | <b>391</b>  |                     |                     | <b>392</b>  |                     |                     | <b>398</b>  |             |           |

Nota: As colunas com a letra “A” classificam os valores experimentais de acordo com a NBR 15823-1:2010. As classificações da coluna “B” referem-se aos critérios relacionados por Gomes e Barros (2009). Os campos com o traço (-) indicam que não ocorreram experimentações ou não existem classificações pertinentes.

Durante a geração dos concretos 16, 17 e 18 objetivava-se a produção do concreto com a taxa de substituição de 15%, que neste momento representava a maior taxa. No entanto, embora os índices nos ensaios com a Caixa-L tenham evoluído satisfatoriamente, bem como os índices com o Funil-V para os concretos com a taxa de 15%, foi com os ensaios do concreto 18 (taxa de 10%), que os parâmetros autoadensáveis investigados foram atendidos. Foi a primeira vez

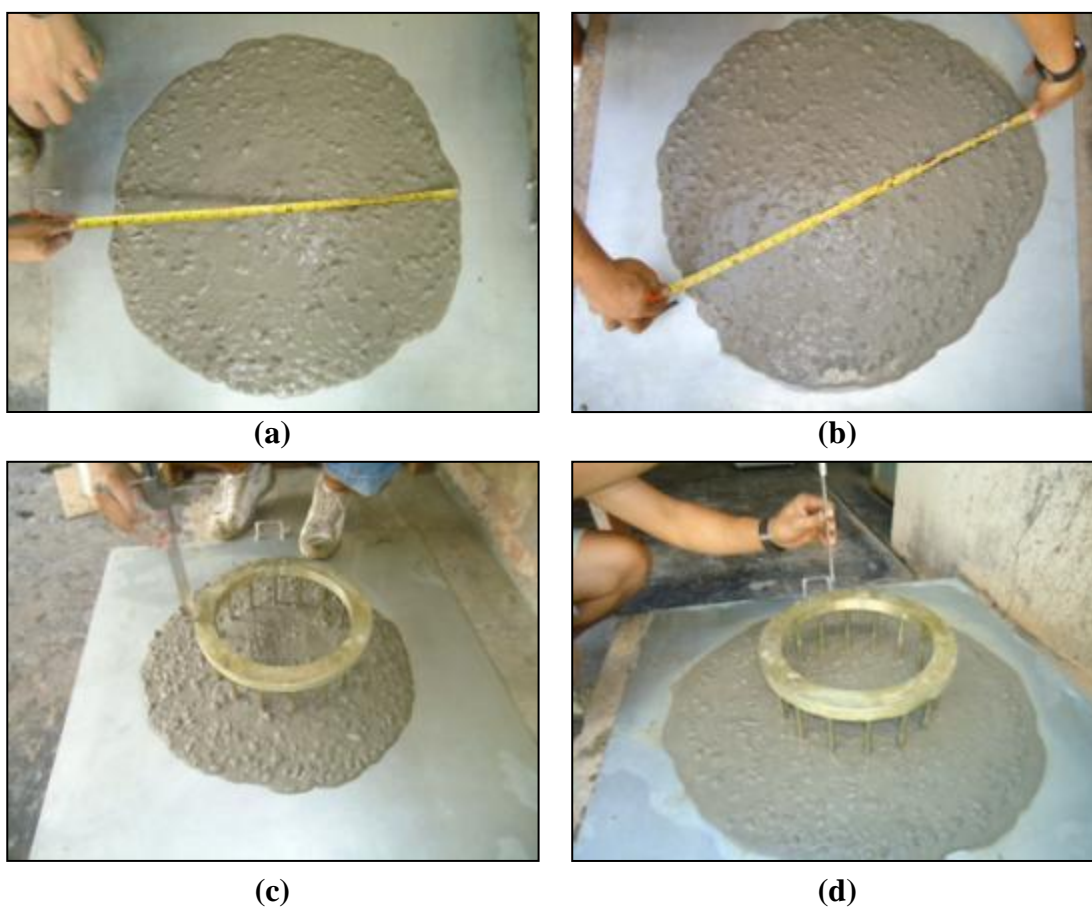
que o concreto com CBC alcançou índices satisfatórios em todos os parâmetros investigados, inclusive na Caixa-L. A quantidade produzida de concreto de acordo com a sequência “A” da metodologia não permitia a realização dos ensaios com o Tubo-U, logo foram propostos novos desenvolvimentos com sequência “B”. Repetiram mais duas vezes o concreto 18, no entanto controlando o lançamento de água e superplastificante na mistura da segunda amostra. Os traços unitários da repetição do concreto 18 e o novo concreto 19 são apresentados na Tabela 32.

**Tabela 32 – Traços unitários da repetição do traço 18 e o novo traço 19**

| CONCRETOS          | 18     | 19       |
|--------------------|--------|----------|
| Volume argamassa   | 70%    | 70%      |
| Cimento            | 1      | 1        |
| Filer              | 0,40   | 0,40     |
| Areia (Mar)        | 1,80   | 1,80     |
| CBC                | 0,20   | 0,20     |
| Brita (Mbr)        | 2,21   | 2,21     |
| Água               | 0,50   | 0,45*    |
| Superplastificante | 0,0055 | 0,0055** |

Nota: \* a água projetada era de 0,50, no entanto controlava-se o seu lançamento durante a produção do concreto, logo a quantidade informada na Tabela representa a quantidade real de água utilizada. \*\* na prática foi necessária a mesma quantidade lançada para o concreto 18.

A Figura 60 mostra os resultados no espalhamento da nova produção do concreto 18 e do concreto 19.



**Figura 60 – Ensaio de espalhamento e Anel-J para os concretos 18 e 19**

Nota: (a) espalhamento do concreto 18 (b) espalhamento do concreto 19 (c) espalhamento no Anel-J para concreto 18 e (d) espalhamento no Anel-J para concreto 19.

Os resultados dos índices autoadensáveis medidos são apresentados na Tabela 33.

**Tabela 33 – Resultados dos ensaios autoadensáveis dos concretos 18 e 19**

| Método de ensaio | Propriedade Investigada  | Unidade           | Concreto 18 |                     |                     | Concreto 19  |             |                     |
|------------------|--|-------------------|-------------|---------------------|---------------------|--------------|-------------|---------------------|
|                  |  |                   | Valores     | A                   | B                   | Valores      | A           | B                   |
| ESPALHAMENTO     | Espalhamento ( <i>Slump-flow</i> )                                 | mm                | <b>665</b>  | <i>SF 2</i>         | <i>ok</i>           | <b>701,5</b> | <i>SF 2</i> | <i>ok</i>           |
|                  | Viscosidade plástica aparente $t_{500}$ sob fluxo livre            | s                 | <b>1,3</b>  | <i>VS 1</i>         | <i>não atendido</i> | <b>1,8</b>   | <i>VS 1</i> | <i>não atendido</i> |
| ANEL-J           | Habilidade passante pelo Anel-J                                    | mm                | <b>70</b>   | <i>não atendido</i> | -                   | <b>2</b>     | <i>PJ 1</i> | -                   |
|                  | Blocking step (efeito do bloqueio)                                 | mm                | <b>7,3</b>  | -                   | <i>ok</i>           | <b>3,2</b>   | -           | <i>ok</i>           |
| CAIXA-L          | Tempo de escoamento $T_{L20}$                                      | s                 | <b>0,5</b>  | -                   | <i>ok</i>           | <b>0,4</b>   | -           | <i>ok</i>           |
|                  | Tempo de escoamento $T_{L40}$                                      | s                 | <b>1,1</b>  | -                   | <i>ok</i>           | <b>0,7</b>   | -           | <i>ok</i>           |
|                  | Habilidade passante pela Caixa-L                                   | (H2/H1)           | <b>0,74</b> | <i>não atendido</i> | <i>não atendido</i> | <b>0,93</b>  | <i>PL 2</i> | <i>ok</i>           |
| FUNIL-V          | Viscosidade plástica aparente pelo Funil-V                         | s                 | <b>3,8</b>  | <i>VF 1</i>         | <i>não atendido</i> | <b>5,1</b>   | <i>VF 1</i> | <i>não atendido</i> |
| TUBO-U           | Resistência a segregação pela análise do Tubo-U (RS 1, RS 2, RS 3) | %                 | <b>0,77</b> | -                   | <i>não atendido</i> | <b>1,08</b>  | -           | <i>ok</i>           |
|                  |  |                   | <b>0,85</b> | -                   | <i>não atendido</i> | <b>1,00</b>  | -           | <i>ok (RS)</i>      |
|                  |  |                   | <b>0,83</b> | -                   | <i>não atendido</i> | <b>1,09</b>  | -           | <i>ok</i>           |
| MASSA ESPECÍFICA | Massa específica normal sem compactação                            | kg/m <sup>3</sup> | <b>2415</b> |                     |                     | <b>2404</b>  |             |                     |
| CONSUMO CIMENTO  | Consumo de cimento por m <sup>3</sup> de concreto                  | Kg/m <sup>3</sup> | <b>395</b>  |                     |                     | <b>396</b>   |             |                     |

Nota: As colunas com a letra “A” classificam os valores experimentais de acordo com a NBR 15823-1:2010. As classificações da coluna “B” referem-se aos critérios relacionados por Gomes e Barros (2009). Os campos com o traço (-) indicam que não ocorreram experimentações ou não existem classificações pertinentes.

O concreto 18, que foi novamente produzido não obteve resultados satisfatórios como na sua primeira produção. A habilidade passante do concreto pela Caixa-L que havia obtido um resultado conforme embora próximo do limite de 0,8 na sua produção preliminar, não alcançou resultado satisfatório na sua segunda produção. Outros índices que não haviam sido avaliados na primeira produção também tiveram reprovações, como a habilidade passante

pelo Anel-J (PJ) e a resistência à segregação pelo Tubo-U. Desta forma, foi produzido o concreto 19 com o controle de lançamento de água e de superplastificante com o intuito de realizar um ajuste preciso dos fatores a/c e sp/c para o concreto 18. O desempenho dos parâmetros do ensaio da Caixa-L (Figura 61) obtiveram resultados satisfatórios por todos os critérios de autoadensibilidade seguidos.



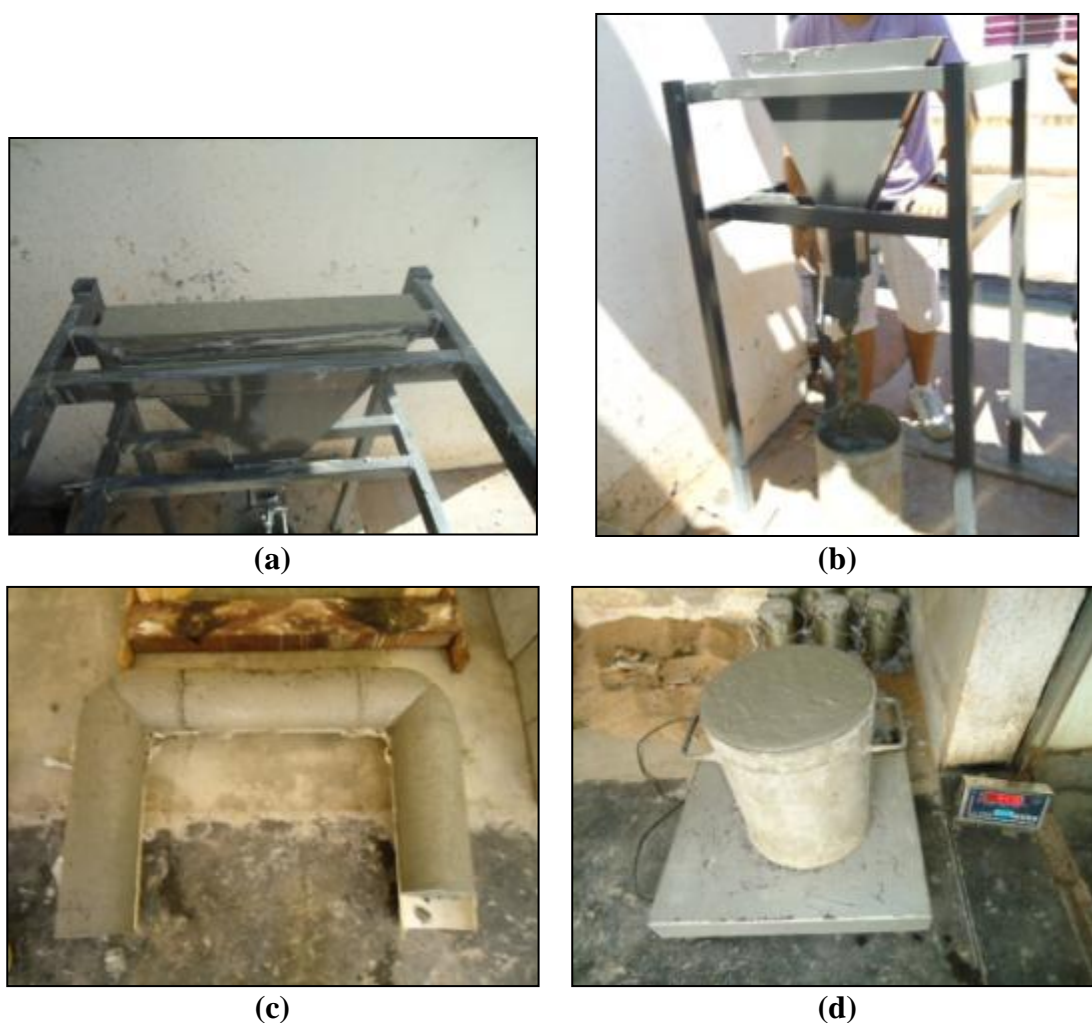
**Figura 61 – Ensaio da Caixa-L para o concreto 19**

Nota: (a) nivelamento do concreto antes do ensaio (b) espalhamento do concreto por entre as barras da caixa durante o ensaio (c) concreto espalhado logo após escoamento e (d) detalhes do escoamento completo na coluna vertical e da planicidade e envolvimento das barras de aço no compartimento horizontal



Os resultados para o concreto 19 apresentados na Tabela 33 informam que todos os quesitos autoadensáveis avaliados obtiveram aprovações pela ABNT NBR 15823-1:2010 e apenas dois dos quesitos, o tempo na posição 500 ( $t_{500}$ ) e o tempo no Funil-V, não obtiveram enquadramento por Gomes e Barros (2009). No entanto, ressalta-se que estes parâmetros inerentes à viscosidade plástica aparente são dependentes de medições realizadas por um cronometro manual controlado pelo operador e assim, susceptíveis a variações tanto nos acionamentos iniciais como nas paradas finais de seus respectivos movimentos avaliados.

Os índices alcançados pelo concreto 19, para os quesitos avaliados na habilidade passante (PL e PJ) demonstraram uma excelente capacidade de escoamento entre armaduras do concreto desenvolvido. O mesmo nível de resultados foram alcançados pelos índices de resistência à segregação do concreto, tendo como fator RS = 1. Algumas ilustrações durante os ensaios com o concreto 19 podem ser vistas na Figura 62.



**Figura 62 – Ensaio com o Funil-V, Tubo-U e Massa Específica do concreto 19**

Nota: (a) nivelamento do concreto antes do ensaio (b) escoamento do concreto durante o ensaio (c) Tubo-U aberto e (d) amostra para cálculo da massa específica normal.

Como pode ser visualizado na Figura 62.c, restou uma fatia de 8cm sem preenchimento dentro do esquema do tubo na face oposta do lançamento do concreto. No entanto, todas as faixas (R.S<sub>1</sub>, RS<sub>2</sub> e RS<sub>3</sub>) alcançaram resultados satisfatórios de seus índices.

Perante a classificação dos anexos A.1 e A.2 da ABNT NBR 15823-1:2010, o concreto 19, que também passou a ser descrito como CAA-CBC<sub>10%</sub> (CAA com 10% de substituição de areia por CBC) desenvolvido pode ser caracterizado como um Concreto Autoadensável adequado para a maioria das aplicações correntes com as mesmas características discutidas e recomendadas no concreto 13 desenvolvido na etapa anterior.

#### 4.5.2 Estudo do Estado Endurecido

Assim como no procedimento 4.5.2 foram produzidos corpos de provas dos dois últimos traços desenvolvidos na busca do CAA-CBC. Logo, os concretos 18 e 19 foram submetidos à análise no estado endurecido aos 28 dias, no ensaios de compressão (ABNT NBR 5739:2007) e no ensaio de tração por compressão diametral (ABNT NBR 7222:2011). Na Tabela 34 são apresentados os resultados dos ensaios de resistência.

**Tabela 34 – Resistência à compressão e tração por compressão diametral aos 28 dias**

| Concretos       | Resistência à compressão ( $f_{ck}$ ) (MPa) | Resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ) (MPa) | Resistência à tração ( $f_{t,D}$ ) (MPa) | Resistência característica à tração ( $f_{t,D}$ ) (MPa) |
|-----------------|---|--|--|---|
| 18              | 40,61                                       | 38,20  | 2,90                                     | 2,56  |
| 19              | 40,88                                       | 39,75  | 2,85                                     | 2,47  |
| <i>Variação</i> | <i>0,66%</i>                                | <i>4,06%</i>   | <i>1,72%</i>                             | <i>3,52%</i>  |

A diferença de 0,05 no fator a/c do concreto 18 para o concreto 19 proporcionou apenas uma pequena diferença de 4,06% na resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ). Este mesmo efeito foi observado na resistência à tração, porém com o concreto 18 resistindo mais a este esforço.

A Figura 63 mostra um corpo de prova do concreto 19 rompido à compressão diametral. Ao longo de toda seção interna rompida observa-se o espalhamento uniforme da brita e o seu respectivo invólucro de argamassa. A taxa de substituição de 10% não proporcionou alterações visuais no aspecto e na coloração interna do concreto.



**Figura 63 – Corpo de prova do concreto 19 rompido após ensaio de compressão diametral**

Na figura 64, observa-se que os aspectos inerentes a variação da cor do concreto com e sem CBC são mínimas. O maior destaque neste aspecto é a coloração clara por conta da presença do filer calcário em ambas as amostras.



**Figura 64 – Aspectos visuais dos concretos com e sem CBC**

Nota: (a) amostra do concreto 13 (sem CBC) (b) amostra do concreto 19 (com CBC)

Na análise da classificação da ABNT NBR 8953:1992 ambos os concretos enquadram-se no grupo I e classe C35, ou seja, possuem resistências características a compressão maiores que 35 MPa e menores que 40 MPa. Pelo auxílio das condicionantes de análise da ABNT NBR 6118:2007 e pelos resultados da resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ), gerou-se a Tabela 35 para análise da resistência à tração.



Tabela 35 – Análise da resistência à tração pela ABNT NBR 6118:2007

| Concretos | ABNT NBR 7222:2011                                      | ABNT NBR 6118:2007   |  |
|-----------|---|--|--|
|           | Resistência característica à tração ( $f_{t,D}$ ) (MPa) | Resistência à tração média esperada ( $f_{ct,m}$ ) (MPa)<br>$f_{ct,m} = 0,3f_{ck}^{2/3}$ | Resistência à tração característica esperada ( $f_{ctk,inf}$ ) (MPa)<br>$f_{ctk,inf} = 0,7 f_{ct,m}$ |
| 18        | 2,56  | 3,40   | 2,38   |
| 19        | 2,47  | 3,49   | 2,45   |

Logo, de acordo com a Tabela 35, realça-se que a resistência característica à tração obtida para os concretos 18 e 19 localizam-se dentro da faixa admissível esperada. Ambos os concretos possuem valores maiores que os valores calculados para  $f_{ctk,inf}$ .

## 4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta pesquisa foram realizados estudos preliminares da caracterização dos materiais, da reologia da pasta e da argamassa. Por fim, os ensaios de autoadensibilidade no estado fresco e os ensaios de resistência à compressão axial e resistência à compressão diametral no estado endurecido para os concretos avaliados, possibilitaram a produção dos concretos com propriedades autoadensáveis (concretos 13 e 19).

No desenvolvimento do estudo da pasta, verificou-se que os pontos ótimos de dosagens de superplastificante aumentavam conforme experimentavam-se as pastas com relações  $f/c$  maiores. Este fato foi observado para as 30 primeiras pastas investigadas na primeira etapa. Na segunda etapa verificou-se que as pastas passaram a exigir menores quantidades de superplastificante pela elevação do fator  $a/c$  de 0,45 para 0,50, mantendo inclusive a mesma coesão e classe de espalhamento apresentados na primeira etapa. A pasta 34, composta pelos fatores:  $a/c = 0,5$ ;  $f/c = 0,4$ ;  $sp/c = 0,004$  e  $a/f = 0,33$  foi a escolhida para dar início a fase 3 do estudo da argamassa. Esta escolha foi realizada pelo fato da mistura ter apresentado características de fluidez esperada e um ótimo aspecto de coesão entre suas partículas sem caracterização de segregação.

No estudo complementar do esqueleto granular, realizado com a brita “A”, juntamente com a areia, determinou-se a relação  $ar/br = 0,67$  como a combinação de maior massa unitária ( $2019 \text{ kg/m}^3$ ) e menor índice de vazios (24,7%). Esta relação, embora aprovada pelos ensaios, apresentava uma dosagem excessiva de brita (60%), contrariando as recomendações de no máximo 50% para CAA. Além disso, esta brita possuía uma forma lamelar imprópria para concretos que desejam obter bons desempenhos de fluidez e escoamento. No entanto, os primeiros concretos desenvolvidos dentro da proposta complementar, que possuíam apenas caráter de conhecimento dos ensaios de autoadensibilidade e do CAA, foram produzidos com esta relação, relevando o fato da maior disponibilidade comercial desta brita na região de estudo.

Neste mesmo estudo, verificaram-se que os traços dos concretos 1 ao 8 propostos para o desenvolvimentos preliminares do concreto autoadensável não obtiveram sucesso nos parâmetros autoadensáveis avaliados. O concreto 7 que possuía melhor consistência e que havia apresentado resultado satisfatório no espalhamento, não repetiu o mesmo desempenho do quesito efeito de bloqueio ( $BS_j$ ) no Anel-J. O seu desempenho também foi insuficiente nos

ensaio com a Caixa-L e com o Funil-V, onde o bloqueio de passagem da brita nas armaduras impossibilitou a realização correta dos ensaios. De tal maneira que ocorreu segregação entre a argamassa e as britas que ficaram bloqueadas entre as armaduras no interior dos dois dispositivos. Portanto, nenhum concreto desta etapa obteve aprovação técnica nos quesitos de investigação das propriedades autoadensáveis. No entanto, estas informações e a experiência no uso e manuseio experimental dos equipamentos de ensaios possibilitaram maiores conhecimentos da tecnologia.

Este estudo complementar gerou algumas incertezas relacionadas com a quantidade de brita a ser empregada no concreto, bem como a própria dimensão e forma deste agregado proposto. A metodologia aplicada para determinar o percentual do volume de pasta no concreto era independente da quantidade de areia. Logo, as reprovações técnicas obtidas na avaliação dos ensaios autoadensáveis aliadas aos fenômenos de baixa coesão e separação de fases do material (segregação) para os concretos 1, 2, 3, 5, 6 e 8 somadas ainda com as incertezas na dosagem dos materiais ajudaram a consolidar a idéia central do desenvolvimento do CAA pelo estudo da argamassa. Assim, este estudo introdutório indicou, que diante destas situações, fosse iniciada a experimentação da metodologia com uma nova brita, denominada como brita “B” com dimensões máximas menores e aspectos geométricos menos angulares.

Voltando-se para a aplicação da metodologia central, o resultado esperado para a argamassa, na fase 3, sem CBC foi atingido logo pelo desenvolvimento da argamassa 1, a qual possuía os fatores:  $a/c = 0,5$ ,  $f/c = 0,4$ ,  $sp/c = 0,4$  oriundos do estudo da pasta ótima (pasta 34). Juntou-se a estes fatores a relação fixada de  $ar/c = 2$ . A argamassa desenvolvida possuía a seguinte composição unitária 1: 2: 0,5: 0,4: 0,004 (cimento: areia: água: filer: superplastificante). A experimentação da argamassa com CBC foi realizada para as taxas de substituição de areia por CBC de: 5, 10%, 20%, 25%, 30% e 40%. Os resultados alcançados demonstraram que a CBC na argamassa, proporciona aspectos de coesão, homogeneidade, viscosidade e fluidez próximos dos observados nas argamassas sem CBC. No entanto, para que estes resultados fossem alcançados era necessário adicionar maiores quantidades de aditivo químico na busca da mesma consistência e fluidez para o desempenho reológico esperado. Determinou-se que a variação experimental das taxas de substituição de areia por CBC nos concretos seriam de 5 à 20%, de tal maneira que o traço 1: 1,8: 0,2: 0,5: 0,4: 0,0042: (cimento: areia: CBC: água: filer: superplastificante) oriundo da argamassa 15 com taxa de substituição de 20% foi a primeiro a ser experimentado.

Na Tabela 36, são apresentados o traço das argamassas antes e após a determinação final do CAA sem CBC e com CBC.

**Tabela 36 – Composição das argamassas**

| Fatores | Argamassas sem CBC |                          |          | Argamassas com CBC (10%) |                          |          |
|---------|--------------------|--------------------------|----------|--------------------------|--------------------------|----------|
|         | Argamassa 1        | Argamassa do concreto 13 | Variação | Argamassa 11             | Argamassa do concreto 19 | Variação |
| a/c     | 0,50               | 0,45                     | -10%     | 0,50                     | 0,45                     | -10%     |
| f/c     | 0,40               | 0,40                     | 0%       | 0,40                     | 0,40                     | 0%       |
| sp/c    | 0,004              | 0,0055                   | 38%      | 0,0042                   | 0,0055                   | 31%      |
| ar/c    | 2                  | 2                        | 0%       | 1,80                     | 1,80                     | 0%       |
| CBC/c   | 0                  | 0                        | 0%       | 0,20                     | 0,2                      | 0%       |

Observa-se na tabela 36, que ambas as argamassas após o estudo de seus respectivos concretos obtiveram redução de água em 10% do estipulado pelas suas respectivas argamassas. Em uma mesma análise foi possível perceber que ao longo da experimentação prática do concreto foi necessário a adição de superplastificante, para melhoria da fluidez. Para o concreto 13, foi necessário um acréscimo de 38% de superplastificante. Já para o concreto 19, foi necessário para a obtenção final do CAA com CBC uma acréscimo de 31%. No entanto, foi observado o mesmo fator final de 0,55% de superplastificante no CAA com e sem CBC.

Os traços de concretos que apresentaram as melhores características autoadensáveis nos ensaios no estado fresco foram o concreto 13 para o CAA sem CBC e o concreto 19 (taxa de substituição de 10%) para o CAA com CBC. No desenvolvimento experimental cada um destes concretos foram produzidos 4 vezes. Sendo duas vezes produzidos pelo roteiro da sequência “A” (3.2.2) e duas vezes pelo roteiro da sequência “B” (3.2.2). Os resultados apresentados na Tabela 23 para o concreto 13 e na Tabela 33 para o concreto 19 representam os resultados da quarta produção realizada para cada um dos traços.

Os concretos 12 e 18, que antecederam os traços unitários finais respectivamente do concreto 13 e do concreto 19, foram investigados também no estado endurecido para critério de comparação entre os concretos dentro de cada categoria. Os resultados apresentados pelos concretos 12 e 18 não os condicionaram à categoria de CAA. Os traços unitários dos dois concretos autoadensáveis produzidos (concretos 13 e 19) são apresentados na Tabela 37.

**Tabela 37 – Traços unitários do concreto 13 e do concreto 19**

| CONCRETOS          | CAA sem CBC<br>Concreto 13 | CAA-CBC <sub>10%</sub><br>Concreto 19 | Comparação                             |
|--------------------|----------------------------|---------------------------------------|--|
| Volume argamassa   | 70%                        | 70%                                   | igual                                  |
| Cimento            | 1                          | 1                                     | igual                                  |
| Filer              | 0,40                       | 0,40                                  | igual                                  |
| Areia (Mar)        | 2,00                       | 1,80                                  | igual<br>(considerando CBC +<br>Areia) |
| CBC                | -                          | 0,20                                  |  |
| Brita (Mbr)        | 2,12                       | 2,21                                  | maior 4,1 %                            |
| Água               | 0,45                       | 0,45                                  | igual                                  |
| Superplastificante | 0,0055                     | 0,0055                                | igual                                  |

Como demonstrado na Tabela 37, a proporção dos dois concretos diferem apenas na dosagem de brita. Fato explicado pela menor massa específica obtida na argamassa com CBC (argamassa 15) em comparação com a argamassa sem CBC (argamassa 1). Ao aplicar a equação 23, esta relação proporciona uma maior massa de brita no concreto ( $M_{br}$ ). A água e o superplastificante que foram ajustados experimentalmente ficaram coincidentemente iguais para os dois traços de CAA obtidos após o estudo de cada categoria. Além da pequena diferença de brita, a outra diferença fica por conta da presença da taxa de substituição de 10% de areia por CBC no concreto 19 (CAA-CBC<sub>10%</sub>), que no traço unitário representa o valor de 0,20.

Na tabela 38, demonstram-se os consumos dos materiais para a produção de 1 m<sup>3</sup> de concreto.

**Tabela 38 – Consumo de materiais para 1 m<sup>3</sup> de concreto**

| CONCRETOS          | CAA sem CBC<br>Concreto 13<br>(kg) | CAA-CBC <sub>10%</sub><br>Concreto 19<br>(kg) | Varição em kg |
|--------------------|------------------------------------|---|---------------|
| Cimento            | 401,0                              | 396,0   | 5,00          |
| Filer              | 160,4                              | 158,4   | 2,00          |
| Areia (Mar)        | 802,0                              | 712,8   | 89,20         |
| CBC                | 0,0                                | 79,2  | 79,20         |
| Brita (Mbr)        | 850,1                              | 875,2   | 25,04         |
| Água               | 180,5                              | 178,2   | 2,25          |
| Superplastificante | 2,21                               | 2,18  | 0,03          |

Conforme a Tabela 38, visualiza-se que o consumo do cimento no traço 19 necessitou de uma menor dosagem em relação ao concreto 13, cerca de 1,2% (5 kg). No entanto, esta pequena

diferença não possibilita uma interpretação que suas faixas de consumo situam-se em patamares distintos de consumo. Mas sim que, ambos, além de estarem na faixa de consumo recomendada pela EFNARC (2002), de 350 kg/m<sup>3</sup> a 450 kg/m<sup>3</sup>, também estão no mesmo patamar de consumo. Avaliando estes consumos diretamente pelos concretos investigados por Gomes (2002), o concreto 13 e o concreto 19, necessitam de consumos de cimento próximos dos concretos com volume de pasta,  $V_p = 35\%$  (398 kg de cimento) desenvolvido nos seus experimentos.

A substituição de 10% de areia por CBC no desenvolvimento do concreto 19 possibilitou a redução de 89,2 kg de areia em relação ao CAA sem CBC. Esta diferença expressiva possibilitou a redução de 11,1% deste recurso natural na dosagem do CAA-CBC<sub>10%</sub>.

# Capítulo 5

---

## CONCLUSÃO

O desenvolvimento experimental deste trabalho proporcionou a obtenção de um traço de concreto autoadensável com CBC de acordo com os parâmetros autoadensáveis avaliados pelos critérios da ABNT NBR 15823-1:2010 complementados pelos parâmetros propostos por Gomes e Barros (2009). Os aspectos desejados relativos à fluidez, ao controle da coesão, a resistência à segregação e a viscosidade esperados foram confirmados pelos índices checados nos ensaios de autoadensibilidade. Também foi desenvolvido um traço de CAA sem CBC com as mesmas características autoadensáveis obtidas pelos mesmos critérios.

O CAA com CBC aprovado nos testes de autoadensibilidade, cuja taxa de substituição atribuída foi de 10%, denominado de CAA-CBC<sub>10%</sub> foi obtido com o seguinte traço unitário 1: 1,8: 0,2: 2,21: 0,45: 0,40: 0,0055 (cimento: areia: CBC: brita: água: filer: superplastificante) com massa específica de 2404,0kg/m<sup>3</sup>. O desenvolvimento do CAA sem CBC que possuía estudo independente apresentou coincidentemente um traço unitário de 1: 2: 2,12: 0,45: 0,40: 0,0055 (cimento: areia: brita: água: filer: superplastificante) similar ao apresentado no traço com CBC, com massa específica de 2393 kg/m<sup>3</sup>. Desta maneira, conclui-se que a CBC utilizada nesta pesquisa em substituição direta pela areia, na taxa de 10% requer dosagens de materiais muito próximas, para a manutenção das propriedades autoadensáveis do CAA.

Contudo, vale ressaltar que nos estudos preliminares das argamassas observou-se que a CBC utilizada como agregado miúdo em substituição parcial da areia, alterava a reologia das argamassas, de tal maneira que eram necessários maiores quantidades de aditivo químico para manter a mesma consistência e fluidez das argamassas sem CBC. Nesta mesma análise, ressalta-se que as dosagens finais de superplastificante para o concretos CAA-CBC<sub>10%</sub> e o CAA sem CBC embora tenham sido iguais, 0,55% (sp/c), foram superiores às dosagens iniciais de suas respectivas argamassas ótimas que eram de 0,42% e 0,40%. Assim enfatiza-se que esta mesma presença de 10% de CBC em substituição a areia no CAA exige a mesma

dosagem de superplastificante para garantia da fluidez, contrariando o efeito que era observado na argamassa.

Em uma comparação direta entre o CAA sem CBC com CAA-CBC<sub>10%</sub>, somente o último apresentou 100% de atendimento das propriedades da ABNT NBR 15823-1:2010 contra 80% de atendimento do CAA sem CBC. Contudo, em todos os ensaios realizados, estes dois CAA desenvolvidos obtiveram aprovação das propriedades autoadensáveis investigadas por pelo menos um dos dois critérios seguidos no Quadro 11. Logo, a habilidade passante do concreto investigada pelo ensaio realizado pelo Anel-J, responsável pelo desempenho inferior do CAA sem CBC reprovada pelos critérios da norma *PJ*, foi atendida em conformidade no índice BS<sub>j</sub> estabelecido por Gomes e Barros (2009).

Ainda na análise do estado fresco, foi possível enquadrar pelos parâmetros de fluidez e escoamento (SF), viscosidade plástica aparente (VF e VS), habilidade passante (PL e VS) e resistência à segregação (RS) que tanto o CAA-CBC<sub>10%</sub> como o CAA sem CBC possuem as mesmas recomendações técnicas de aplicação de acordo com os critérios da ABNT NBR 15823-1:2010. De tal maneira, que pelos Anexos da norma, ambos estão aptos para serem aplicados na maioria das obras correntes, tais como paredes, vigas, pilares e outras, resguardando-se de todas as condicionantes técnicas impostas pela norma.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial e à tração (compressão diametral) para ambos os concretos também os colocaram no mesmo patamar de resistência mecânica pela classificação da ABNT NBR 8953:1992, sendo eles pertencentes ao grupo I e classe C35. Sendo que a resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ) foi de 38,56 MPa para o CAA sem CBC e de 39,75 MPa para o CAA-CBC<sub>10%</sub>, com diferença de apenas 3,1% (1,19 MPa). Os valores obtidos na resistência à tração ( $f_{t,D}$ ) aos 28 dias também foram praticamente iguais, apenas 2,87% (0,07 MPa) de diferença, sendo de 2,401 MPa para o CAA sem CBC e de 2,47 MPa para o CAA-CBC<sub>10%</sub>. Pela ABNT NBR 6118:2007, considerando que ambos os concretos tiveram fator  $a/c = 0,45$  e resistência superior a 35 MPa pode-se classificá-los como pertencentes a classe III de agressividade ambiental.

Enfim, pelos resultados dos ensaios de autoadensibilidade para o CAA-CBC<sub>10%</sub>, em comparação aos resultados do CAA sem CBC, ressalta-se que a taxa de substituição de 10% de areia por CBC no CAA não altera as propriedades reológicas para concretos autoadensáveis, nos seus aspectos de fluidez, coesão e consistência. Da mesma forma, que



não altera significativamente os valores obtidos nas resistências à compressão axial e à tração (compressão diametral) aos 28 dias em relação ao concreto sem CBC. Desta maneira, dentro dos critérios técnicos estabelecidos torna-se possível utilizar a CBC na produção de CAA, sem que haja prejuízo nas propriedades reológicas e mecânicas mantendo os mesmos índices de consumo de superplastificante e cimento e ainda, contribuindo para a redução no consumo de areia de 89,2 kg/m<sup>3</sup> de CAA. Releva-se a esta análise que todos os resultados obtidos nesta pesquisa são diretamente ligados às particularidades das condições experimentais praticadas, bem como dos materiais utilizados.

## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Os resultados desenvolvidos pela metodologia aplicada neste trabalho possibilitaram a obtenção de dois traços de CAA. Um deles utilizou dois agregados miúdos, a areia e a CBC, dosados pelo critério de substituição parcial de 10% da areia por CBC e o outro traço que somente utilizou a areia como agregado miúdo. No entanto, este estudo aplicado foi desenvolvido restritamente às condições definidas nesta metodologia. Desta forma, prevendo a continuidade e a possibilidade de trabalhos futuros, que possuam outros focos de análise, assim como, almejem a utilização de outras metodologias experimentais que visem outros resultados ou até mesmo a comprovação dos resultados obtidos, são apresentadas a seguir algumas sugestões de estudos.

- Aplicação de programas experimentais com controle estatístico para a produção e avaliação dos traços de CAA desenvolvidos nesta pesquisa,
- Estudo do custo e da viabilidade econômica de produção dos traços gerados,
- Pesquisa experimental com outras análises reológicas que visem à aplicação de outros ensaios e técnicas de avaliação das propriedades autoadensáveis,
- Avaliações complementares dos quesitos de durabilidade, resistência à compressão, resistência à tração, resistência à flexão e outras análises no estado endurecido, com investigações realizadas com maiores variações de períodos de tempo,
- Estudo com novas taxas de substituição da areia por CBC que visem à permissão e uso de maiores quantidades deste subproduto nos traços de CAA,
- Aplicação, controle e validação dos traços desenvolvidos,
- Desenvolvimento de CAA com outros resíduos e/ou subprodutos gerados pela indústria que também visem a contribuição ambiental para minimização dos impactos.

# Capítulo 6

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÏTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: Ed. Pini, 2000. 662p.

AKRAM, T.; MEMON, S.A.; OBAID, H.. Production of low cost self compacting concrete using bagasse ash. Construction and building materials. 2009. **Construction and Building Materials**, Vol. 23, 703-712. Disponível em: <http://www.highbeam.com/doc/1G1-191906389.html>. Acesso em: 12 jan. 2011.

ALCANTARA, M. A. de M e DOS SANTOS, B. V. O uso de cinzas de bagaço de cana como finos do concreto auto-adensável. 2011. **In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON**. Anais. Florianópolis, Brasil: IBRACON. CD- ROM.

ALCOPAR – ASSOCIAÇÃO DE PRODUÇÃO DE BIOENERGIA DO ESTADO DO PARANÁ. **Mapa de Localização das Unidades Produtoras de Álcool e Açúcar no Estado do Paraná**. Paraná: 2012. Disponível em: <<http://www.alcopar.org.br/associados/mapa.php>> Acesso em: 22 mai. 2012.

ALMEIDA FILHO, F. M. ; BARRAGAN, B. E. ; CASAS, J. R. ; EL DEBS, A. L. H. C. . Variabilidade da aderência e das propriedades mecânicas do concreto auto-adensável. **Revista IBRACON de Materiais**, v. 1, p. 31-57, 2008.

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

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 6118**. Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 6502**. Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 6508**. Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 7181**. Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 7211**. Agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro, 2009.

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

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 7217**. Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 7222**. Argamassa e concreto. Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 7477**. Tubo extraleve de cobre, sem costura, para condução de água e outros fluidos. Rio de Janeiro, 1982.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 7682**. Calda de cimento para injeção - Determinação do índice de fluidez. Rio de Janeiro, 1983.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 7809**. Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. Rio de Janeiro, 1983.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 7810**. Agregado em estado compactado seco - Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1983.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 8953**. Concreto para fins estruturais- Classificação por grupos de resistência. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 9775**. Agregados - Determinação da umidade superficial em agregados miúdos por meio do frasco de Champman - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 9939**. Agregados - Determinação do teor de umidade total, por secagem, em agregado graúdo - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 10004**. Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 11578 (CB-18)**. Cimento Portland Composto. Rio de Janeiro, 1991.

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

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

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 15823-3**. Concreto auto-adensável. Parte 3: Determinação da habilidade passante - Método do Anel-J. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 15823-4**. Concreto auto-adensável. Parte 4: Determinação da habilidade passante - Método da Caixa-L. Rio de Janeiro, 2010.

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

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 15823-6**. Concreto auto-adensável. Parte 6: Determinação da resistência à segregação - Método da coluna de segregação. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 15900-1**. Água para amassamento do concreto - requisitos. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR NM 26**. Agregado - amostragem. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR NM 27**. Agregado miúdo – Redução de amostras de campo para ensaio em laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

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

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

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR NM 46**. Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem, 2003.

- \_\_\_\_\_. **ABNT NBR NM 49.** Agregado fino – determinação de impurezas orgânicas, 2001.
- \_\_\_\_\_. **ABNT NBR NM 52.** Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.
- \_\_\_\_\_. **ABNT NBR NM 53.** Agregado graúdo – determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.
- \_\_\_\_\_. **ABNT NBR NM 65.** Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.
- \_\_\_\_\_. **ABNT NBR NM 248.** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- BARBOSA, M P; COSTA, O. J.; SILVA L. M.; SALLES, F.M. Concreto Auto-Adensável: Avaliação da Aderência Aço- Concreto Através dos Ensaio de Determinação do Coeficiente de Conformação Superficial das Barras de Aço. 46º 2004, Florianópolis. Anais. São Paulo: **IBRACON, 2004.** Congresso Brasileiro do Concreto-ISBN: 85-98576-02-6. **IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto Volume II** – Construções em Concreto- Trabalho CB 0167, 2004, p.484-497.
- BORLINI, M. C. ; MENDONÇA, J. L. C. C. ; VIEIRA, C. M. F. ; MONTEIRO, S.N. Influência da Temperatura de Sinterização nas Propriedades Físicas, Mecânicas e Microestruturais de Cerâmica Vermelha Incorporada com Cinza de Bagaço de Cana-de-açúcar. **Matéria (UFRJ)**, v. 11, p. 435-443, 2006. Disponível em: <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10799/>. Acesso em: 26 nov. 2010.
- CAMARGOS, U. A. Concreto Auto-Adensável e Autonivelante. *Téchne*, São Paulo, n. 59, p. 04-05, fevereiro 2002.
- CARDOSO, F. A. **Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico. 2009, 138 p.** Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia de Construção Civil, EPUSP, 2009.
- CAVALCANTI, D. J. de H. **Contribuição ao estudo de propriedades do concreto auto-adensável visando sua aplicação em elementos estruturais.** 2006, 141 p. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Alagoas, 2006.
- COELHO, F. C. de A; MESQUITA, E. F. T. Avaliação das propriedades determinantes da durabilidade do concreto auto-adensável com incorporação de pó orgânico. In: VI Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras, 2010, Córdoba. **Anais** do VI Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras. Córdoba : Editora da Universidade de Córdoba, 2010. v. 1. p. 1-10. Disponível em: [http://www.edutecne.utn.edu.ar/cinpar\\_2010/Topico%203/CINPAR%20127.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/cinpar_2010/Topico%203/CINPAR%20127.pdf). Acesso em: 14 jan. 2010.
- COLLEPARDI, M. A very close precursor os self-compacting concrete. In: **Supplementary volume of the Proceedings of Three-day CANMET/ACI International Symposium on Sustainable Development and Concrete Technology**, Setembro 16-19, 2001. Disponível em <http://www.encosrl.it/enco%20srl%20ITA/servizi/pdf/additivi/89.pdf>. Acesso em 19 dez. 2010.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, primeiro levantamento, maio/2012** - Companhia Nacional de Abastecimento. – Brasília : CONAB 2012. Disponível em: [http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12\\_04\\_10\\_09\\_19\\_04\\_boletim\\_de\\_can\\_a.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12_04_10_09_19_04_boletim_de_can_a.pdf). Acesso em: 22 mai. 2012.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto.** 2006. 445f. Tese de Doutorado. Pós-graduação em Ciências de Engenharia e materiais. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. (2009) Caracterização de Cinza do Bagaço de Cana-de-açúcar para Emprego como Pozolana em Materiais Cimentícios. 2009. **Revista Química Nova**, 32(1), 82-86, 2009.

COUTINHO, B. S.; SHEHATA, L. C. D.; SHEHATA, I. A. E. M. Concretos auto-adensáveis: homogeneidade e aderência a barras de armadura. 2011. In: **53º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON**. Anais... Florianópolis, Brasil: IBRACON. CD- ROM.

DE PAULA, M. O. de ; TINÔCO, I. de F.F. ; RODRIGUES, C. de S. ; SILVA, E. N. da ; SOUZA, C.de F. Potencial da cinza de bagaço de cana-de-açúcar como material de substituição parcial do cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 353-357, 2009.

EFNARC - EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS (EFNARC). Specification and guidelines for self-compacting concrete. In: **EFNARC**, fevereiro, 2002. Disponível em: <http://www.EFNARC.org/pdf/SandGforSCC.PDF>. Acesso em: 20 dez. 2010.

\_\_\_\_\_. The Europe Guidelines for Self-Compacting Concrete – Specification, Production and Use. In: **EFNARC** Maio, 2005. Disponível em: <http://www.EFNARC.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2011.

ESPING, O. Methods for characterisation of fillers and fines for self-compacting concrete. Edição: O. Wallevik ; I, Nielson: In: **Internacional Rilem Symposium on Self-Compacting Concrete, 3rd, 2003**. RILEM Publications, p. 540 – 550.

FELEKOGLU, B. A comparative study o the use of mineral abd chemical types of viscosity enhancers in self-compacting concrete. Edição: O. Wallevik ; I, Nielson: In: **Internacional Rilem Symposium on Self-Compacting Concrete, 3rd, 2003**. RILEM Publications, p. 446 -455.

FIESP/CIESP – FEDERAÇÃO DA INDUSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO/ CENTRO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO **Ampliação da oferta de energia através da biomassa.** São Paulo: 2001. Disponível em: <[http://www.FIESP/CIESP.com.br/publicacoes/pdf/ambiente/relatorio\\_dma.pdf](http://www.FIESP/CIESP.com.br/publicacoes/pdf/ambiente/relatorio_dma.pdf)>. Acessado em: 04 jun. 2010.

FREITAS, E. de S. **Caracterização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar do município de campos dos Goytacazes para uso na construção civil.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, UENF, Rio de Janeiro, 2005.

GEYER, A. L. B.; SÁ, R. R. De. **Concreto Auto-adensável: Uma tecnologia a disposição da construção civil de Goiânia.** Informativo técnico. Ano 1, n. 1 de abril de 2005. Disponível em: [http://www.realmixconcreto.com.br/downloads/informativo\\_realmix.pdf](http://www.realmixconcreto.com.br/downloads/informativo_realmix.pdf)>. Acesso em: em 12 de julho de 2010.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa.** São paulo: Ed. Atlas, 2002. 175p.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T.; GUARDABASSI, P. **The sustainability of ethanol production from sugarcane.** **Energy Policy** 36, 2086– 2097, 2008. Disponível em: <http://cenbio.iee.usp.br/download/publicacoes/JEPO2750.pdf>. Acesso em: 14 jan. 2011.

GOMES, P. C. C. **Optimization and Characterization of High-Strength Self- Compacting Concrete**. 2002, 139 p. Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2002.

GOMES, P. C. C e BARROS, A. R. de. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. São Paulo: Ed. Pini, 2009, 165p.

HELENE, P e TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI; SENAI, 1992.

HOJO, O. ; ERNESTO, V. A. R. T. ; RIBEIRO, C. A. ; FISCARELLI, P. E. ; FERTONANI, F. L. . Comparação metodológica entre mufla convencional e automática para análise de umidade e cinzas em bagaço de cana. In: **Congresso da Qualidade em Metrologia - ENQUALAB, 2008**, São Paulo. Anais ENQUALAB 2008, 2008. Disponível em: <http://www.vertent.net/remesp/enqualab2008/cdrom/pdf/TT021.pdf>. Acesso em: 14 jan. 2010.

KHAYAT, K. H.; HU, C.; MONTY, H. Stability of self-compacting concrete, advantages, and potential applications. Edição: A. Skarendahl ; O Petersson . In: **Internacional Rilem Symposium on Self-Compacting Concrete, 1rd, 1999**. RILEM Publications, p. 143 – 152.

KHAYAT, K.; GHEZAL, A. Effect of viscosity-modifying admixture superplasticizer combination on flow properties of SCC equivalent mortar. Edição: O. Wallevik ; I, Nielson: In: **Internacional Rilem Symposium on Self-Compacting Concrete, 3rd, 2003**. RILEM Publications, p. 369 – 385.

KUMAR, P. Self-compacting Concrete : Methods of Testing and Design. **IE(I) Journal-CV**, v. 86, p. 145 – 150. February, 2006. Disponível em: <http://www.ieindia.org/pdf/86/ab026a3.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2011.

LIMA, S. A. ; SALES, A. ; MORETTI, J. P. ; ALMEIDA, F. C. R. ; SANTOS, T. J. . Caracterização de concretos confeccionados com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar. In: VI Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras, 2010, Córdoba. **Anais do VI Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras**. Córdoba : Editora da Universidade de Córdoba, 2010. v. 1. p. 1-10. Disponível em: [http://www.edutecne.utn.edu.ar/cinpar\\_2010/Topico%203/CINPAR%20070.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/cinpar_2010/Topico%203/CINPAR%20070.pdf). Acesso em: 12 jan. 2010.

LIMA, S. A. ; SALES, A. ; MORETTI, J. P. ; SANTOS, T. J. . Análise de argamassas confeccionadas com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição ao agregado miúdo. **Revista Tecnológica (UEM)**, v. 18, p. 87-97, 2009

LISBÔA, E.M. **Obtenção do concreto auto-adensável utilizando o resíduo de serragem de mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas**. 2004, 121 p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Alagoas, 2004.

LISBÔA, E. M.; GOMES, P. C. C.; LIMA, F. B. e BARBOZA, A. S. R. Concreto Auto-Adensável uma opção para os Pré Moldados. In: 1o. Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto pré-moldado, 2005, **Anais do 1o. Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto pré-moldado**, 2005. (1). 1-11, São Carlos, SP, 2005.

MACEDO, P. C. **Avaliação de argamassas com adição da cinza do bagaço de cana-de-açúcar**. 2009, 116p. Dissertação de mestrado. Pós-graduação em engenharia civil (UNESP – Ilha Solteira). Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2009. Disponível em: [http://www.ppgec.feis.unesp.br/teses/2009/pamela\\_camargo2009\\_final.pdf](http://www.ppgec.feis.unesp.br/teses/2009/pamela_camargo2009_final.pdf). Acesso em: 12 janeiro de 2011.

MACEDO, P. C. ; CASTALDELLI, V. N. ; AKASAKI, J. L. ; MELGES, J. L. P. ; FIORITI, C. F. ; TASHIMA, M. M. ; BERNABEU, J. P. . Revisão Bibliográfica sobre o uso de cinza de bagaço de cana-de-açúcar na construção civil. In: **51 Congresso Brasileiro do Concreto, 2009**, Curitiba. 51 Congresso Brasileiro do Concreto. Curitiba : IBRACON, 2009. p. 01-14.

MANSANEIRA, E. C. **Verificação da Potencialidade do uso da cinza do bagaço da cana de açúcar em substituição parcial ao cimento Portland**. 2010. 116f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento, Universidade Estadual de Londrina, 2010.

MARTINS, C. H.; ZANELLA, R. M.; PAULINO Jr, R. Potencial do uso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como agregado miúdo. In: I SEMINÁRIO DE ENGENHARIA URBANA. **Anais...**, Maringá, Brasil, 2007. Disponível em: <http://www.dec.uem.br/seuem/artigosseuem2007/13a.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2010.

MCGOVERN, M.. Going with the flow. In: **Concrete Technology Today**, July, 2002. Portland Cement Association, Vol 23, nr 2. Boston, 2002. Disponível em: <http://www.fi-hoff.com/images/von-scc.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2011.

MEHTA, P. K. **Greening of the concrete industry for sustainable development**. **Concrete International**, p.23 – 27, july 2002. Disponível em: <http://www.ecosmartconcrete.com/kbase/filedocs/trmehta02.pdf>. Acesso em: 19 jan. 2011.

MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Ed. Pini, 1994, 593p.

MELO, A. L. de. **Análise do comportamento reológico de pastas de cimento contendo resíduos de pneu para poços de petróleo**. 2009, 124 p. Dissertação de Mestrado. Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

MELO, K. A. de. **Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de fíler calcário**. 2005, 183 p. Dissertação de Mestrado. Pós-graduação em engenharia civil (PPGEC). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

MOOSBERG-BUSTNES, H. Characterization of filler. Edição: O. Wallevik ; I, Nielson: In: **Internacional Rilem Symposium on Self-Compacting Concrete, 3rd, 2003**. RILEM Publications, p. 540 – 550. Disponível em: <http://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=5k8AD9lRw1gC&oi=fnd&pg=PR19&dq=moosbergbustnes+characterization&ots=56XB5UH3I1&sig=nOjTbhIgvSN0AIGITrughCiMjM>. Acesso em: 23 dez. 2010.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. Ed. São Paulo: Ed. Pini, 1997. 738p.

NIELSON, I; WALLEVIK, O. H. Rheological evaluation of some empirical test methods- Preliminary results Edição: O. Wallevik ; I, Nielson: In: **Internacional Rilem Symposium on Self-Compacting Concrete, 3rd, 2003**. RILEM Publications, p. 59 – 68.

NUNES, I. H. S. **Estudo das características físicas e químicas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar para uso na construção**. 2009, 65f. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Maringá, UEM, Centro de Tecnologia, Maringá, 2009.

NUNES, I. H. S. ; VANDERLEI, R. D. ; SECCHI, M. ; ABE, M. A. P. . Estudo das características físicas e químicas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar para uso na construção. **Revista Tecnológica (UEM)**, v. 17, p. 39-48, 2008. Disponível em: <http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/RevTecnol/article/view/8728/5158>. Acesso em: 25 set. 2010.

NUNES, S. C. B. **Betão Auto-Compactável: Tecnologia e Propriedades**. 2001, 198 p. Tese de Doutorado. Pós-Graduação em Estruturas de Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2001. Disponível em: [http://digitool.fe.up.pt:1801/webclient/DeliveryManager?pid=6099&custom\\_att\\_2=simple\\_viewer](http://digitool.fe.up.pt:1801/webclient/DeliveryManager?pid=6099&custom_att_2=simple_viewer). Acesso em 13 de dez. 2010.

OKAMURA, H. “Ferguson Lecture for 1996: **Self-compacting high-performance concrete**”, **Concrete International**, ACI, Vol. 19, nº 7, p. 50-54, 1997.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. Development, present use and future. Edição: A. Skarendhal; Petersson. In: **International Rilem Symposium on Self-compacting Concrete, 1st, 1999, Stockholm. Proceedings**. RILEM Publications, France, 3-14, 1999.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. In: **Jornal of advance concrete technology**, Vol. 1, n. 1, p 5-15, 2003. Disponível em: [http://www.jstage.jst.go.jp/article/jact/1/1/5/\\_pdf](http://www.jstage.jst.go.jp/article/jact/1/1/5/_pdf). Acesso em: 14 dez. 2010.

PILZ, S. E. ; PAVAN, R. C. ; MENEGOTTO, M. L. ; ANDRIOLI, M. Contribuição ao estudo de concreto auto-adensável utilizando resíduos de britadores. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 51, 2009, Curitiba. Anais. São Paulo: **IBRACON**, 2009. Disponível em: <http://www2.unochapeco.edu.br/~pavan/Arquivos/51CBC0181.pdf>. Acesso em; 18 nov. 2010.

PIOVEZAM, I. A. R.; MELEIRO, L. P.; ISA, M. M. Influência da adição no comportamento reológico da pasta auto-adensável de alto desempenho. **Acta Sci. Technol**, Maringá, v. 30, n. 2, p. 155-159, 2008.

POGGIALI, F. S. J. **Desempenho de microconcretos fabricados com cimento portland com adições de cinza de bagaço de cana-de-açúcar**. 2010, 149 f. Dissertação de Mestrado. Pós graduação em Construção Civil. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

PROSKE, T; GRAUBNER, C. A. Self-compacting concrete – pressure on formwork and ability to deareate. In.: **Darmstadt Concrete 17**. 2002 Disponível em: [http://www.ifm.tu-armstadt.de/cag/02\\_elements/02\\_pdf/99\\_mitarbeiter/proske/DACON2002\\_Schalung.pdf](http://www.ifm.tu-armstadt.de/cag/02_elements/02_pdf/99_mitarbeiter/proske/DACON2002_Schalung.pdf). Acesso em: 15 dez. 2010.

REPETTE, W. L. Concretos de Última Geração: Presente e Futuro. In: Geraldo Cechella Isaia. (Org.). **Concreto - Ensino, Pesquisa e Realizações**. 1 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2005, v. 2, p. 1509-1550.

SALES, A. ; LIMA, S. A. ; ALMEIDA, F. C. R. ; MORETTI, J. P. . Considerações ambientais e proposta de aproveitamento da cinza do bagaço da cana-de-açúcar para uso na infra-estrutura urbana. In: **4º Congresso Luso Brasileiro para o Planeamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável - PLURIS 2010**, 2010, Faro. Anais do 4º Congresso Luso Brasileiro para o Planeamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável - PLURIS 2010. Faro : Editora da Universidade do Algarve - Portugal, 2010. v. 1. p. 20-30.

SANTOS, J.R.; ABREU, N.R.; BALDANZA, R.F.. O impacto do marketing verde nas indústrias sucroalcooleiras de Alagoas. In: **Revista Econômica do Nordeste**, v.40, n.2. 2009.

SIMONETTI, C. **Análise Teórico-Experimental da Deformação Instantânea e Lenta de Vigas de Concreto Auto-adensáveis**. 2008, 155 p. Dissertação de Mestrado. Programa de pós-graduação em engenharia civil, UFRS, Porto Alegre, 2008.

SOUTO I. H. S. **Avaliação do desempenho da cinza do bagaço de cana-de-açúcar na produção de concretos**. 2010, 105f. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Maringá, UEM, Centro de Tecnologia, Maringá, 2010.



SOUZA, G. N.; FORMAGINI, S.; CUSTÓDIO, F. O.; SILVEIRA, M. M. Desenvolvimento de Argamassas com Substituição Parcial do Cimento Portland por Cinzas Residuais do Bagaço de Cana-de-açúcar. 2007. In: **49º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON**. Anais... Bento Gonçalves, Brasil: IBRACON. CD- ROM.

TOKUDOME, S. **Contribuição para o desenvolvimento de concreto auto-adensável**. 2006. 118 p. Dissertação de mestrado. Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concreto auto-adensável**. 2004, 149 p. Dissertação de mestrado. Pós-graduação em engenharia civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

VICTOR, J. W. R. **Estudio de la sensibilidad e influencia de la composición en las propiedades reológicas y mecánicas de los hormigones autocompactantes**. 2007, 342 p. Tese de Doutorado. Departamento de engenharia de construção e projetos de engenharia civil. Universidade Politécnica de Valência, Valência, Espanha, 2007.

ZARDO, A. M.; BEZERRA, E. M.; MARTELLO, L. S.; SAVASTANO JR.,H.. Utilização da cinza de bagaço cana-de-açúcar como “filler” em compostos de fibrocimento. 2004. In: **I Conferência Latino-americana de Construção Sustentável**, X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Paulo, Brasil.