

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**MÔNICA CRISTINA FERNEDA**

**ESTUDO DO DESENVOLVIMENTO DE CONCRETO AUTO-  
ADENSÁVEL COM AREIA ARTIFICIAL EM PRÉ-FABRICADOS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PATO BRANCO  
2014**

**MÔNICA CRISTINA FERNEDA**

**ESTUDO DO DESENVOLVIMENTO DE CONCRETO AUTO-  
ADENSÁVEL COM AREIA ARTIFICIAL EM PRÉ-FABRICADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso Superior de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Caroline Angulski da Luz  
Co-orientador: Prof. Me. José Miguel Etchalus

PATO BRANCO  
2014



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

### ESTUDO DO DESENVOLVIMENTO DE CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL COM AREIA ARTIFICIAL EM PRÉ-FABRICADOS

#### MÔNICA CRISTINA FERNEDA

Aos 29 dias do mês de julho do ano de 2014, às 13h00min, na Sala de Treinamento da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, este trabalho de conclusão de curso foi julgado e, após argüição pelos membros da Comissão Examinadora abaixo identificados, foi aprovado como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná– UTFPR, conforme Ata de Defesa Pública nº 27-TCC/2014.

Orientadora : Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. CAROLINE ANGUSLKI DA LUZ (DACOC / UTFPR-PB)

Co-orientador: Prof. Msc. JOSÉ MIGUEL ETCHALUS (DACOC / UTFPR-PB)

Membro 1 da Banca: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. PAÔLA REGINA DALCANAL (DACOC / UTFPR-PB)

Membro 2 da Banca: Prof. Dr. JOSÉ ILO PEREIRA FILHO (DACOC / UTFPR-PB)

Às pessoas que tornaram esse sonho possível, meus pais e meu irmão, responsáveis por cada conquista, fiéis companheiros, que fazem a vida valer a pena. A eles que fazem da palavra família a razão da felicidade.

## AGRADECIMENTOS

A Deus por me conceder o dom da vida, por me guiar em um caminho seguro e cheio de realizações, por me ensinar a compreender as adversidades e superá-las, por trazer a meus dias a felicidade expressa em simples sorrisos amigos, por iluminar minha mente com a sabedoria necessária para encontrar a força e alcançar mais essa realização.

Aos meus queridos pais Neri e Solange, pela dedicação de uma vida inteira de ensinamentos, prezando por valores como honestidade, caráter e responsabilidade, pelo ombro amigo a cada lágrima, por cada conselho e acima de tudo pelo apoio incondicional aos meus estudos. Obrigada pai pelo dia em que disse que eu seria engenheira sem nem ao menos sonhar que seria essa minha escolha. Obrigada mãe por acreditar em mim e ser o suporte mais valioso em minha vida.

Ao meu irmão Fidelis, por ser meu maior companheiro em todos os passos, exemplo de vida, força e coragem, por mesmo distante me alegrar e guiar, ao meu melhor amigo meu eterno agradecimento.

Ao meu namorado pelos momentos de compreensão, pelo carinho e incentivo.

Aos meus amigos e colegas Gilson, Kleber, Thayna e Jéssica pela ajuda indispensável para que este trabalho fosse concretizado.

À minha orientadora, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Caroline Angulski da Luz, por todo o tempo dedicado e o conhecimento transmitido, obrigada pelo carinho e paciência. Ao meu coorientador Prof. Me. José Miguel Etchalus pela disponibilidade e colaboração. Ao Prof. Me. Cleovir José Milani especialmente pelo apoio, interesse e colaboração com este trabalho.

Agradeço imensamente a todos os professores que fazem parte de minha formação, pelo conhecimento e exemplo que levo de cada um.

À empresa JJN Indústria de Pré-fabricados Ltda e seus funcionários pela disponibilidade dos materiais, tempo e espaço para a realização e finalização deste trabalho.

A todos os amigos nesse tempo conquistados, obrigada pelo reconhecimento e pela amizade.

## RESUMO

FERNEDA, Mônica C. **Estudo do desenvolvimento de concreto auto-adensável com areia artificial em pré-fabricados.** 2014. 116. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato branco, 2014.

O concreto auto-adensável (CAA) vem conquistando o mercado da construção civil e fornecendo propriedades que podem sanar as necessidades exigidas dentro da indústria de pré-fabricados quanto à produtividade. Para ser considerado como tal, sua produção, controle e aplicação exigem maiores cuidados, pois esse deve ter suas características mantidas estáveis durante e após seu lançamento, sendo essas: coesão, fluidez e resistência à segregação. O concreto auto-adensável demanda uma grande quantidade de materiais finos em sua composição e dentro desse contexto pode-se destacar como contribuição a incorporação da areia de britagem em substituição parcial à natural, pois a mesma apresenta alto teor de finos, além de minimizar a atividade de exploração da areia natural que causa grandes impactos ambientais. A partir disso, o presente trabalho objetiva avaliar o desempenho do CAA produzido com areia artificial, visando à aplicação na confecção de elementos pré-fabricados. Assim, a realização desse estudo contou com a análise laboratorial das propriedades dos materiais constituintes do concreto, a dosagem e produção experimental do concreto auto-adensável e a consolidação do produto com aplicação em indústria de pré-fabricados. Verificou-se que a incorporação da areia artificial intensificou a formação de segregação e exsudação no CAA, podendo ser explicada pela descontinuidade granulométrica apresentada pelo agregado estudado. Entretanto, a quantidade de finos presente na areia artificial supriu a maior parte do material fino demandado pelo CAA. Percebeu-se que o alto consumo de cimento apresentado pelo CAA, conferiu-lhe um ganho de resistência acentuado nas primeiras 24 horas de cura, confirmando a adequação do produto com a pré-fabricação no quesito de otimização do uso de fôrmas.

**Palavras-chave:** Concreto auto-adensável. Pré-fabricados. Areia britada. Produtividade.

## ABSTRACT

The self-compacting concrete (SCC) is conquering the market of construction and providing properties that can satisfy the needs required within the precast industry for productivity. To be considered as such, their production, control and application require more care, because this must have maintained stable their characteristics during and after its release, these being: cohesion, fluidity and segregation resistance. The self-compacting concrete requires a large amount of fine material in their composition and in this context can highlight, as a contribution, the incorporation of artificial sand in partial substitution to the natural sand, because it contain content high of fine material, minimizing the activity exploration of natural sand that cause major environmental impacts. From this, this work have as objective to evaluate the performance of SCC produced with artificial sand, aiming to do at implementation in the manufacturing of precast elements. Like this the carrying out of this study included the laboratory analisys the properties of the constituent materials of concrete, the dosage and experimental production of self-compacting concrete and the consolidation of product with application in the precast industry. It has been found that with the incorporation of artificial sand was intensified formation of segregation and exudation in the SCC, which can be explained by the discontinuity given by the particle of aggregate size studied. However, the amount of fines present in the artificial sand supplied the most of the fine material demanded by the SCC. It was noticed that high consumption of cement had by SCC, has given him a strong strength gain in the first 24 hours of curing, confirming the suitability of the product with the precast in the question of optimizing the use of molds.

**Keywords:** Self-compacting concrete. Precast industry. Atificial sand. Productivity.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mini Slump-flow utilizado no ensaio de espalhamento.....	26
Figura 2 - Funil de Marsh .....	26
Figura 3 - Gráfico de determinação do ponto de saturação do aditivo superplastificante .....	27
Figura 4 - Fluxograma do método de dosagem.....	30
Figura 5 - Caixa L.....	33
Figura 6 - Funil V.....	34
Figura 7 - Fluxograma de Pesquisa .....	42
Figura 8 - Faixa granulométrica de Melo para agregado miúdo.....	45
Figura 9 - Prensa hidráulica .....	53
Figura 10 - Conjunto de peneiras ABNT .....	56
Figura 11 - Curva granulométrica da areia natural.....	57
Figura 12 - Curva granulométrica da areia artificial.....	57
Figura 13 - Curva granulométrica da brita.....	58
Figura 14 - Curva granulométrica da composição final dos agregados miúdos .....	59
Figura 15 - Curva granulométrica da mistura das areia e faixa de Melo .....	60
Figura 16 - Equipamentos do ensaio de massa específica de agregado miúdo .....	61
Figura 17 - Etapas do ensaio de massa específica.....	61
Figura 18 - Equipamentos para ensaio de teor de material pulverulento .....	63
Figura 19 - Materiais e equipamentos do estudo em pasta de cimento .....	65
Figura 20 - Curva de espalhamento das pastas de cimento .....	66
Figura 21 - Aspecto visual das pastas de cimento .....	66
Figura 22 - Curva de escoamento das pastas de cimento .....	67
Figura 23 - Curva de espalhamento das argamassas.....	68
Figura 24 - Aspecto visual das argamassas.....	69
Figura 25 - Curva de espalhamento comparativa dos aditivos.....	70
Figura 26 - Aspecto comparativo das argamassas com diferentes aditivos.....	70
Figura 27 - Quantitativo de materiais para o CAA .....	72
Figura 28 - Material para imprimação.....	72
Figura 29 - Moldes para os corpos-de-prova.....	73
Figura 30 - Resistência média do CAA .....	75

Figura 31 - Cp's antes do rompimento .....	75
Figura 32 - Cp's depois do rompimento .....	75
Figura 33 - Pesagem e organização dos materiais .....	76
Figura 34 - CAA sendo produzido na indústria de pré-fabricados .....	77
Figura 35 - Ensaio no estado fresco com o CAA na indústria .....	78
Figura 36 - Concretagem da viga pré-fabricada .....	79
Figura 37 - Sistema de concretagem utilizado .....	79
Figura 38 - Desforma da viga pré-fabricada com CAA .....	80
Figura 39 - Viga pré-fabricada com CAA .....	80
Figura 40 - Viga pré-fabricada com CAA e forma metálica .....	81
Figura 41 - Resistências médias à compressão do CCV com o CCA .....	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Umidade dos agregados .....	56
Tabela 2 - Umidade dos agregados .....	58
Tabela 3 - Massas específicas dos agregados .....	62
Tabela 4 - Massas unitárias dos agregados.....	62
Tabela 5- Teor de material pulverulento dos agregados .....	63
Tabela 6 - Composições dos agregados graúdo e miúdo .....	64
Tabela 7 - Quantitativo de materiais para o CAA .....	71
Tabela 8 - Resultados dos ensaios do CAA no estado fresco em laboratório.....	74
Tabela 9 - Traço final do CAA em laboratório .....	74
Tabela 10 - Traço final do CAA produzido industrialmente .....	77
Tabela 11 - Resultados dos ensaios do CAA no estado fresco na indústria .....	78
Tabela 12 - Custos de produção de peça pré-fabricada em CAA e CCV.....	82

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1 OBJETIVOS .....	15
1.1.1 Objetivo geral .....	15
1.1.2 Objetivos específicos .....	15
1.2 JUSTIFICATIVA .....	16
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>18</b>
2.1 CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL .....	18
2.1.1 Materiais constituintes.....	19
2.1.1.1 Cimento.....	19
2.1.1.2 Água .....	20
2.1.1.3 Agregado miúdo .....	20
2.1.1.4 Agregado graúdo .....	21
2.1.1.5 Adições minerais .....	22
2.1.1.6 Aditivos.....	23
2.1.2 Estudo em pasta de cimento e argamassas para CAA .....	25
2.1.3 Métodos de dosagem.....	28
2.1.3.1 Método de Gomes.....	29
2.1.4 Propriedades no estado fresco .....	31
2.1.4.1 Ensaio da caixa L .....	32
2.1.4.2 Ensaio do Slump-flow .....	33
2.1.4.3 Ensaio do funil V.....	34
2.1.5 Propriedades no estado endurecido .....	35
2.1.5.1 Resistência mecânica .....	36
2.2 CONCRETO PRÉ-MOLDADO .....	37
2.2.1 Etapas do Desenvolvimento do Concreto Pré-moldado .....	38
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>41</b>
3.1 ESCOLHA DOS MATERIAIS .....	43
3.1.1 Cimento .....	43
3.1.2 Aditivo.....	43
3.1.3 Adição mineral.....	43
3.1.4 Agregados .....	44
3.1.4.1 Agregado graúdo.....	44
3.1.5 Agregado miúdo .....	45
3.1.6 Água .....	46
3.2 METODOLOGIA ADOTADA PARA OS ENSAIOS.....	46
3.2.1 Estudo em pasta .....	46
3.2.1.1 Relação água/cimento (a/c) .....	46
3.2.1.2 Teor de aditivo superplastificante .....	47
3.2.2 Determinação da composição do agregado miúdo .....	48
3.2.3 Definição do esqueleto granular .....	48
3.2.4 Estudo em argamassa .....	49
3.2.5 Produção do concreto .....	51
3.2.6 Teor de adição mineral .....	52
3.2.7 Ensaio de resistência à compressão do concreto .....	52
3.2.8 Aplicação na indústria de pré-fabricados.....	53
3.2.9 Comparação entre o CAA e o CCV .....	54
3.2.9.1 Estudo de custos .....	54
3.2.9.2 Estudo da resistência à compressão.....	54
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>56</b>

4.1 DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DOS AGREGADOS .....	56
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS .....	56
4.2.1 Análise Granulométrica .....	56
4.2.2 Composição do agregado miúdo .....	59
4.2.3 Determinação de massa específica .....	60
4.2.4 Determinação de massa unitária .....	62
4.2.5 Teor de material pulverulento .....	62
4.3 DEFINIÇÃO DO ESQUELETO GRANULAR .....	64
4.4 ESTUDO EM PASTA DE CIMENTO .....	65
4.5 ESTUDO EM ARGAMASSA .....	68
4.6 PRODUÇÃO DO CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL .....	71
4.6.1 Resistência à compressão do CAA .....	74
4.7 APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA DE PRÉ-FABRICADOS .....	76
4.8 COMPARAÇÃO ENTRE O CAA E O CCV .....	81
4.8.1 Estudo de custos .....	81
4.8.2 Estudo da resistência à compressão .....	82

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS..... 84**

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 87**

APÊNDICE A – PROCEDIMENTOS PARA A REALIZAÇÃO DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS .....	91
APÊNDICE B – PROCEDIMENTOS PARA A DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS AGREGADOS .....	93
APÊNDICE C – PROCEDIMENTOS PARA A DETERMINAÇÃO DA MASSA UNITÁRIA DOS AGREGADOS .....	95
APÊNDICE D – PROCEDIMENTOS PARA A DETERMINAÇÃO DO TEOR DE MATERIAL PULVERULENTO DOS AGREGADOS .....	97
APÊNDICE E – COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS .....	99
APÊNDICE F – COMPOSIÇÕES E CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS MESCLAS DAS AREIAS 101	
APÊNDICE G – MASSAS ESPECÍFICAS DOS AGREGADOS .....	103
APÊNDICE H – MASSAS UNITÁRIAS DOS AGREGADOS .....	105
APÊNDICE I – TEOR DE MATERIAL PULVERULENTO DOS AGREGADOS .....	107
APÊNDICE J – ESTUDO EM PASTA DE CIMENTO .....	109
APÊNDICE K – ESTUDO EM ARGAMASSA .....	111
APÊNDICE L – MASSA ESPECÍFICA DO CAA PRODUZIDO EM LABORATÓRIO.....	113
APÊNDICE M – RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO DO CAA PRODUZIDO EM LABORATÓRIO..	115
APÊNDICE N – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CAA PRODUZIDO DA INDÚSTRIA DE PRÉ-FABRICADOS .....	117

## 1 INTRODUÇÃO

Os materiais cimentícios podem ser considerados como um dos materiais mais importantes de todas as épocas da civilização humana, por terem suprido as necessidades de edificações e obras de infraestrutura. A explicação para isso é simples, sendo que a natureza forneceu matérias primas abundantes e o homem, pela sua inerente capacidade de elaborar relações de causa-efeito, estabeleceu interações entre as necessidades existentes e as possibilidades de aplicação que estes materiais disponibilizaram para a solução de seus problemas imediatos (REPETTE et al., 2001).

Com a ampliação do campo de utilização do concreto começaram a surgir preocupações a cerca da durabilidade do mesmo. A partir de 1983, o Japão ateu-se a problemas sérios de durabilidade em suas estruturas de concreto armado, e este passou a ser um tema de interesse nacional. Notou-se que houve uma redução gradual de operários especializados na indústria da construção japonesa, o que levou a uma correspondente redução na qualidade das obras (TAKADA (2004) apud MANUEL (2005)).

Considerando-se que o adensamento adequado do concreto fresco é essencial para a produção de estruturas duráveis, teve ênfase o desenvolvimento de um concreto que não necessitasse de nenhum processo de adensamento. Neste contexto, Tutikian e Dal Molin (2008) cita que, em 1988, no Japão, foi desenvolvido o concreto auto-adensável (CAA), capaz de se moldar nas fôrmas por conta própria sem necessidade nenhuma de vibração ou compactação externa de qualquer natureza.

Marangon (2006) define o concreto auto-adensável como um tipo de concreto recente que apresenta alta fluidez e coesividade, sendo capaz de preencher completamente as formas por meio de seu peso próprio, atingindo compactação total, mesmo na presença de densa armadura. É denso, homogêneo e tem as mesmas propriedades de engenharia do concreto convencional. Apresenta como principais vantagens: redução no tempo de construção, mão-de-obra, necessidade de equipamentos no canteiro de obras, exposição dos trabalhadores a ruídos e vibrações, além de possibilitar a obtenção de superfícies com melhor acabamento.

Contudo, sua produção, controle e aplicação exigem maiores cuidados, sendo necessário que a mão-de-obra envolvida adquira conhecimento suficiente a cerca do produto. Isso porque o CAA deve ter suas características mantidas estáveis durante e após seu lançamento sem sofrer segregação de seus materiais constituintes (LISBÔA (2004)).

Dessa forma é possível perceber que o desenvolvimento do concreto auto-adensável é um passo de relevante importância em direção à eficiência construtiva, pois pode vir a proporcionar uma melhora das condições de trabalho nos canteiros de obras e nas indústrias de pré-moldados devido às suas propriedades (GRUNEWALD (2004) apud MANUEL (2005)).

Como o mercado de pré-fabricados está ganhando espaço, assumindo o papel de desenvolvimento em busca de agilidade e melhores acabamentos superficiais, é visível que a combinação do CAA com peças pré-fabricadas pode gerar resultados vantajosos, proporcionados pelo encaixe das propriedades fornecidas por um e exigidas pelo outro.

Para isso, as características do concreto auto-adensável devem ser criteriosamente determinadas e mantidas durante sua obtenção e aplicação. Dentre tais características, são proeminentes as propriedades de trabalhabilidade, fluidez e estabilidade, alcançadas com o correto proporcionamento dos materiais e a otimização da mistura.

Há ainda a possibilidade de desenvolvimento e aperfeiçoamento de técnicas que venham a combinar materiais alternativos que ampliem ainda mais a gama de vantagens de se utilizar um produto como o concreto auto-adensável. Ou seja, materiais que possam ser aplicados de forma viável e que garantam economia na produção, mantendo ainda, as propriedades necessárias ao produto final. Nesse contexto pode-se destacar a incorporação da areia de britagem em substituição parcial à natural.

Valverde (2001) considera que os agregados básicos utilizados na produção do concreto, areia e pedra britada, são os insumos minerais mais consumidos no mundo. Ainda, Penna (2010) ressalta essa colocação ao afirmar que os agregados correspondem a cerca de metade do consumo mundial de minerais. No entanto, a obtenção desses materiais tem por base a atividade de exploração e esta é naturalmente causadora de impactos ambientais. Surge assim, uma visão que busca identificar os limites para que o processo exploratório não se torne desordenado,

principalmente na extração de areia natural do leito de rios, o que pode vir a acelerar o processo de erosão. Diante disso, há um controle cada vez maior que priva legalmente pela manutenção das jazidas naturais.

A areia britada ou areia artificial é um material decorrente da fragmentação de rocha e pode atender às especificações da areia natural, passando, porém, por um processo de obtenção no qual algumas características podem ser controladas, como a distribuição granulométrica, a forma e a textura, alcançando-se um material adequado para cada aplicação (ALMEIDA et al., (2005)).

Sendo assim, cresce a tendência que faz o mercado abrir suas portas à utilização da areia britada como agregado para concretos, acompanhada de estudos que demonstrem o potencial de viabilidade de tal uso.

Logo, o trabalho em questão objetiva atrelar as propriedades fornecidas pela areia artificial às necessárias em um concreto auto-adensável de qualidade, ou seja, buscar definições de dosagens que permitam um processo de produção racionalizado, otimizando as proporções dos diferentes tipos de materiais e propiciando viabilidade quando da aplicação prática do CAA em pré-fabricados.

Para tanto a realização desse estudo terá por base a sequência de etapas previamente planejadas, sendo estas: definição laboratorial das propriedades dos materiais; utilização do material para a produção de concreto auto-adensável; análises e resultados do produto obtido.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho do CAA produzido com areia artificial, visando à aplicação na confecção de elementos pré-fabricados.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Analisar a influência do uso da areia artificial no desempenho do CAA.

- Comparar a resistência inicial do CAA em relação ao concreto convencional, visando à otimização do uso de fôrmas.
- Comparar a relação custo/benefício da substituição do concreto convencional pelo CAA na indústria de pré-fabricados.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Diante do constante aquecimento do setor da construção civil, bem como da necessidade de sobrevivência das empresas no intenso e competitivo mercado, não se pode mais limitar o interesse quanto à expansão da adoção de tecnologias inovadoras que ampliem as possibilidades de desenvolvimento, ganho de espaço e qualidade de produtos e serviços.

Para o concreto, torna-se essencial suprir os avanços na área da tecnologia, não concentrando os estudos apenas em concretos convencionais, pois esse é o material de construção mais utilizado no mundo. O mercado e as técnicas construtivas exigem concretos que apresentem características especiais, como os concretos auto-adensáveis (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Também, é importante ter conhecimento da abundância de rochas basálticas no Brasil, fonte primária de extração para obtenção de agregado graúdo, material importante para a produção do concreto. É no processo de fragmentação de tal material que é gerado um resíduo com granulometria inferior à mínima de classificação de agregados graúdos, sendo este denominado como areia artificial por ser empregado na produção de concreto em substituição parcial à areia natural. Dessa forma a areia britada passa a ser um componente de importância econômica para o setor.

A indústria da construção precisa estar atenta e atualizada em relação às tendências positivas que visam melhorar o processo produtivo, os ambientes de trabalho, custos e segurança. Sendo assim, pode-se afirmar que o estudo da utilização do CAA é relevante para o mercado, podendo representar uma das áreas da tecnologia do concreto que tem grande potencial de desenvolvimento, pois quando aplicada corretamente, proporciona resultados satisfatórios, além de novas oportunidades de otimização nos processos construtivos.

O concreto auto-adensável tem emergido de um contexto de estudo teórico para ganhar espaço no ramo de pré-fabricados, sendo que em países industrializados o CAA vem se tornando regra, de forma a ser o objeto que conquistou maior atenção na indústria de pré-fabricados (BRÜCK, 2007). Isso, devido às melhorias proporcionadas pelo seu processo de aplicação.

A possibilidade de facilitar o seu controle de produção, através da eliminação de etapas como vibração, espalhamento manual e regularização das superfícies, reduz o número de funcionários e tempo. Isso promove um aumento na capacidade produtiva da fábrica, devido à maior agilidade obtida no processo de moldagem e também à possibilidade de permitir um maior nível de organização. Além disso, o CAA imprime maior qualidade de acabamento superficial, indispensável em peças pré-fabricadas. Também, o aumento na resistência inicial desenvolvido pelo CAA é a grande exigência no setor de pré-fabricação, pois possibilita a desforma do concreto em idades iniciais, rápida e eficientemente, sem perda de propriedades, disponibilizando as fôrmas para a concretagem seguinte e conferindo à indústria a velocidade produtiva exigida.

Vale ressaltar que esse concreto possui tecnologia e qualidade superiores às do convencional, ou seja, ao utilizá-lo, a empresa terá um aprimoramento das condições de sua estrutura e produto final, obtendo um ganho de competitividade no setor da construção. Logo, espera-se que o conjunto de todas essas vantagens leve à ampliação do uso do CAA.

Dessa forma, a proposta do trabalho justifica-se por buscar desenvolver um produto vantajoso, principalmente no emprego em pré-fabricados, satisfazendo os requisitos referentes à sua produção, procurando, assim, acompanhar uma tendência internacional do setor.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL

O concreto auto-adensável (CAA) é um concreto que pode ser compactado em todo canto de uma fôrma, simplesmente por meio de seu peso próprio e sem a necessidade de equipamento de vibração. É capaz de fluir sob ação da gravidade, preenchendo completamente os espaços, adensando-se totalmente, mesmo na presença de alta densidade de armaduras (EFNARC, 2005).

A capacidade de se autoadensar é obtida com o equilíbrio entre alta fluidez e moderada viscosidade. A alta fluidez é alcançada com a utilização de aditivos superplastificantes e a moderada viscosidade através do incremento de um percentual adequado de adição mineral com granulometria fina. Além disso, são características do concreto auto-adensável um maior volume de pasta e um menor volume de agregados, quando comparados às misturas de concretos convencionais (GOMES; BARROS, 2009).

Para que um concreto possa ser considerado auto-adensável, devem ser satisfeitas simultaneamente três propriedades básicas em seu estado fresco: coesão, que é a propriedade necessária para que a mistura escoe intacta, desempenhando habilidade passante por entre as armaduras sem obstrução do fluxo; fluidez, que caracteriza a capacidade de fluir, preenchendo todos os espaços; e resistência à segregação que define a manutenção da coesão da mistura ao fluir dentro das fôrmas, passando ou não por obstáculos (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

A resistência e durabilidade esperadas das estruturas de concreto dependem, entre outros fatores, do correto adensamento do mesmo. No entanto, devido à escassez de mão-de-obra, na maioria das vezes esse processo é feito por trabalhadores sem qualificação. Além do mais, a concretagem de estruturas complexas, com vibração impraticável, como peças submersas, estacas, elementos com elevadas taxas de armadura, se tornaram cada vez mais comuns (NUNES, 2001).

### 2.1.1 Materiais constituintes

Os materiais constituintes do CAA são: cimento, adições, aditivos, água e agregados. Gomes et al. (2009), afirmam que a qualidade desses materiais é fator determinante para garantir as propriedades do CAA.

Quando comparado com concretos convencionais, o CAA necessita de uma maior quantidade de finos em sua composição, isso porque aumentando a quantidade de finos aumenta-se a superfície específica e conseqüentemente a capacidade de absorção de água da mistura. Com isso, tem-se uma redução do volume de agregado graúdo, sendo a argamassa fator determinante das propriedades do CAA no estado fresco (NUNES, 2001).

#### 2.1.1.1 Cimento

No CAA, as recomendações referentes à durabilidade e ao uso adequado do cimento são as mesmas de concretos estruturais convencionais. Não existem especificações científicas sobre o melhor cimento para obtenção do CAA. No entanto, o tipo de cimento empregado e a finura do mesmo interferem nas propriedades no estado fresco e na dosagem dos aditivos no CAA (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Gomes et al. (2009) afirmam que a quantidade necessária de aditivo superplastificante aumenta com a área específica do cimento. Ou seja, quanto mais fino for o cimento, maior será o consumo de superplastificantes e conseqüentemente mais fluido será o concreto obtido.

A reação do cimento com a água gera calor de hidratação, que pode causar fissuração no concreto. Quanto mais fino o cimento maior a superfície específica e maior o consumo de água o que gera maior calor de hidratação. Em cimentos que possuem silicato tricálcico (C3S) e aluminato tricálcico (C3A) em suas composições o calor de hidratação é liberado mais rapidamente. Por outro lado, a necessidade de uma mistura coesa gera uma demanda por material fino elevada no CAA. Uma maior quantidade de finos e como conseqüência um consumo de água mais elevado diminuem a tensão de escoamento e aumentam a coesão da mistura (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Assim, acredita-se que o cimento mais indicado ao CAA deve ser o CPV ARI por apresentar partículas mais finas e imprimir maior resistência inicial ao concreto.

#### 2.1.1.2 Água

A água a ser utilizada para a produção do CAA segue as mesmas recomendações da água utilizada na produção do concreto convencional. A quantidade de água é definida pelas propriedades requeridas no estado fresco e está relacionada com a quantidade de finos que a proporção de material seco disponibiliza à mistura.

O CAA é sensível às variações na relação água/finos, por isso é extremamente importante controlar a umidade das adições e dos agregados para que não alterem o volume de água da mistura (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Gomes et al. (2009) citam que a quantidade de água na mistura depende de vários fatores, dos quais pode-se citar: propriedades dos agregados, tipo de cimento, quantidade total de partículas finas e uso de adições ou aditivos. Além disso, tal quantidade é dividida basicamente em quatro partes: uma para a hidratação do cimento, uma para absorção e adsorção dos agregados e materiais finos, uma para preencher a porosidade do esqueleto granular e a última para garantir a fluidez do concreto.

As propriedades reológicas do concreto fresco são influenciadas pela relação água/cimento. Um aumento nesta relação produz uma redução na viscosidade plástica e na resistência de fluxo. No entanto, uma baixa relação água/cimento e o uso de superplastificante produzem concretos com alta viscosidade (GOMES; BARROS, 2009).

#### 2.1.1.3 Agregado miúdo

Agregado miúdo são areias de origem natural ou resultante do processo de britagem de rochas estáveis, bem como a mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira de abertura 4,8 mm e ficam retidos na peneira de abertura 0,075 mm (NBR 7211 (1983)).

Segundo Tutikian e Dal Molin (2008) tanto areias naturais quanto artificiais podem ser utilizadas para a produção do CAA, no entanto areias naturais são mais recomendadas por possuírem forma mais arredondada e textura mais lisa, aumentando a fluidez da mistura devido ao baixo atrito entre as partículas, enquanto areias artificiais apresentam granulometria descontínua, resultando em argamassas menos deformáveis e com maior consumo de pasta. Segundo os mesmos autores, o controle de umidade do agregado miúdo deve ser rigoroso, pois estimativas erradas da umidade dos agregados é a principal causa de variação de fluidez da mistura, além de alterar as propriedades mecânicas e de durabilidade do CAA.

A coesão e a fluidez do concreto são diretamente influenciadas pela água incorporada ao mesmo e é a demanda desta que condiciona a seleção do agregado miúdo. Quando da produção de concreto auto adensável, é preferível a utilização de agregados miúdos com partículas arredondadas e lisas, pois aumentam a fluidez da mistura para uma mesma quantidade de água (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008). Okamura e Ouchi (2003) reforçam elucidando que a resistência ao cisalhamento da argamassa é maior quanto mais angulosas forem as partículas do agregado miúdo, dificultando a deformabilidade do concreto, propriedade essencial ao concreto auto adensável.

Com relação à quantidade de agregado miúdo, Okamura e Ouchi (2003) afirmam que devem ser empregados volumes baixos, entre 40% e 50%, evitando a redução da deformabilidade causada pelo contato entre as partículas. Porém, deve-se observar o método de dosagem a ser empregado e suas especificações.

Tutikian e Dal Molin (2008) afirmam que areias grossas, com módulo de finura superior a 3, devem ser evitadas, pois podem causar a segregação da mistura. Como o CAA necessita grande quantidade de finos, é importante considerar que quanto menor o módulo de finura do agregado miúdo, mais coeso será o concreto produzido. Além disso, os autores citam que se deve ter especial cuidado com areias artificiais devido à composição granulométrica das mesmas apresentar descontinuidades, ou seja, lacunas nas frações intermediárias. No entanto, tal característica pode ser corrigida por meio de combinação com areias naturais.

#### 2.1.1.4 Agregado graúdo

Para garantir suas propriedades reológicas o CAA não requer apenas uma maior quantidade de finos, mas também uma redução da quantidade de agregados, principalmente do agregado graúdo. Para garantir a habilidade passante do CAA por todos os obstáculos e reduzir os efeitos de segregação, a dimensão máxima característica do agregado graúdo deve ser de 19 mm, sendo comum utilizar agregados com dimensões entre 12,5 e 19 mm. Além disso, agregados com dimensões maiores que 19 mm requerem um volume de pasta elevado. Outra exigência feita com relação à granulometria do agregado graúdo é que ela seja continua diminuindo o volume de vazios da mistura (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Com relação à forma, partículas arredondadas diminuem o volume de vazios da mistura e aumentam a fluidez, enquanto agregados com forma angulosa ou alongada consomem maior quantidade de pasta para produzir a trabalhabilidade necessária, aumentando o custo do CAA. O consumo de água e de pasta para determinada fluidez também aumenta com o aumento da área superficial do agregado (GOMES; BARROS, 2009).

Enfim, Gomes et al. (2009) sintetiza frisando que devem ser continua e criteriosamente monitoradas a umidade, a absorção de água e a quantidade de finos dos agregados, a fim de ser mantida a qualidade do concreto auto-adensável.

Com base nesses conceitos, identifica-se que o tipo ideal de agregado graúdo seja de forma mais arredondada e que se enquadre em diâmetros menores ou iguais a 19 mm.

#### 2.1.1.5 Adições minerais

As principais adições minerais utilizadas para a obtenção do CAA é o filer calcário, a cinza volante, a pozolana natural, a sílica ativa, a cinza de casca de arroz e o metacaulim.

A grande quantidade de finos necessária para garantir a coesão da mistura e evitar a segregação do agregado graúdo no CAA é obtida com o emprego de aditivos modificadores de viscosidade ou teores elevados de adições de origem mineral. Essas adições melhoram as propriedades do concreto devido ao aumento da densidade da mistura, causado pelo preenchimento dos espaços vazios do concreto por partículas minúsculas. As adições minerais podem ser inertes, quando

agem fisicamente no concreto, melhorando a compacidade, ou quimicamente ativas, quando reagem com o hidróxido de cálcio durante a hidratação do cimento (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Em relação às exigências do CAA no estado fresco, adições inertes e reativas são comumente utilizadas para aumentar a viscosidade e a coesão, proporcionando uma resistência a segregação. As adições também regulam a quantidade de cimento para reduzir o calor de hidratação e a retração (EFNARC, 2005).

Das propriedades relacionadas às dimensões dos grãos dos finos, a superfície específica se destaca. Segundo Nunes (2001), quanto maior a superfície específica dos finos, maior a viscosidade da mistura. No CAA, a dimensão das partículas das adições minerais utilizadas tem tido importante influência no alcance de suas propriedades, sendo que uma alta superfície específica, elevada quantidade e agregados de pequena granulometria são parâmetros eficazes para uma maior trabalhabilidade e maior controle das propriedades do CAA.

#### 2.1.1.6 Aditivos

Os aditivos utilizados no CAA devem atender às exigências normativas disponíveis. Os mais utilizados são os superplastificantes e os modificadores de viscosidade.

Lisbôa (2004) conceitua aditivo como sendo produtos adicionados, em pequenas quantidades a concretos e argamassas, para melhorar as propriedades da mistura no estado fresco e no estado endurecido. Sabe-se que o uso de aditivos para obtenção de concretos é tão antigo quanto o uso do cimento.

Um dos diferenciais do concreto auto-adensável é o uso de aditivos que possibilitam o alcance de propriedades não contempladas por concretos convencionais. Os aditivos mais empregados para obtenção do CAA são os superplastificantes e os modificadores de viscosidade. O uso conjunto desses aditivos visa garantir elevada fluidez e estabilidade adequada às misturas, evitando a segregação ou exsudação, efeitos indesejáveis decorrentes do emprego de elevadas dosagens de aditivos superplastificantes (MEIRELES, 2009).

O uso de superplastificantes no CAA é inevitável, pois ele é responsável por uma de suas principais propriedades, a fluidez. No mercado nacional são inúmeros os tipos e marcas existentes e novos sempre estão surgindo direcionados ao CAA, o que passa a dificultar a escolha do superplastificante ideal. Esses aditivos são agentes redutores de água, que permitem reduções de água ou trabalhabilidade extrema dos concretos de alto desempenho, principalmente quando é exigida alta fluidez com baixa relação água/cimento.

Com relação aos efeitos reológicos, Gomes et al. (2009) cita que os superplastificantes reduzem o valor da tensão de escoamento e viscosidades plástica das pastas de cimento. Para altas dosagens a tensão pode ser próxima de zero.

Segundo a NBR 11768:1992, os aditivos superplastificantes aumentam o índice de consistência do concreto com quantidade de água de amassamento constante, ou seja, tornam o concreto mais fluido sem a necessidade de aumentar a quantidade de água da mistura. Podem ainda, reduzir pelo menos 12% da água de amassamento para se obter uma determinada consistência.

Os aditivos superplastificantes podem ser divididos em três grupos, de acordo com a sua composição química. Os aditivos plastificantes de primeira geração que funcionam como redutores de água. Os comercializados como superplastificantes de segunda geração, quando utilizados como redutores de água, podem diminuir até 25% a quantidade de água da mistura. O terceiro grupo são os superplastificantes de alta eficiência, que agem por repulsão das partículas de cimento, evitando o contato e floculação entre as mesmas. São os mais aconselhados para obtenção do CAA e podem proporcionar uma redução de água de até 40% (AÏTCIN, 2000).

A eficiência do aditivo com relação à melhora das propriedades do concreto depende da composição química do cimento, da composição do aditivo e do modo como é introduzido na mistura. Além disso, a mistura pode perder fluidez se submetida a temperaturas elevadas e baixos teores de superplastificantes.

Quanto aos aditivos modificadores de viscosidade, seu mecanismo de ação no concreto é aumentar a coesão da mistura, melhorando a estabilidade e a mobilidade do concreto. A adição do agente de viscosidade afeta a fase aquosa da pasta de cimento, na qual cadeias de polímeros solúveis em água podem absorver alguma água livre no sistema, reforçando a viscosidade. Como resultado, haverá

redução na exsudação e melhora na capacidade da pasta suspender partículas sólidas, reduzindo a sedimentação, isso devido ao reforço na viscosidade (GOMES; BARROS, 2009).

Os aditivos modificadores de viscosidade são produtos à base de polissacarídeos que substituem os finos do concreto, diminuindo a falta de uniformidade decorrente da variação granulométrica, ou seja, tornam a mistura mais homogênea. Com menos finos, tem-se uma mistura com área superficial menor, o que ocasiona um menor consumo de água. Além disso, os modificadores de viscosidade formam uma rede que sustentam os agregados, evitando a exsudação e segregação do concreto (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

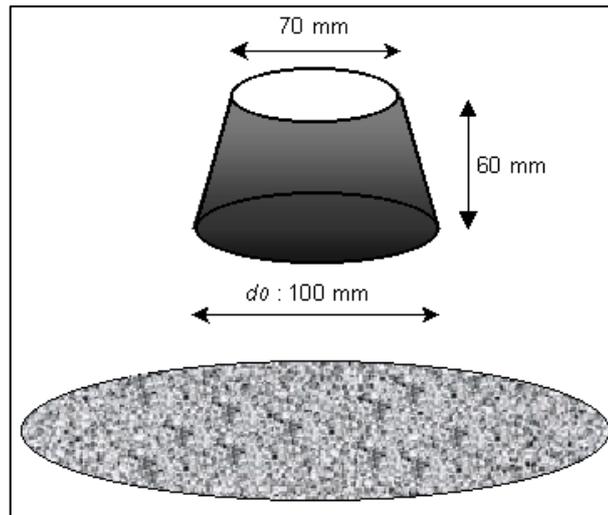
#### 2.1.2 Estudo em pasta de cimento e argamassas para CAA

Para que seja alcançado um concreto com propriedades de auto-adensável são necessários alguns ensaios que avaliem a fluidez, a coesão e a resistência à segregação da pasta de cimento e da argamassa que o constituirão. Enquanto o estudo em pasta proporciona a determinação da relação água/aglomerante e do ponto de saturação do aditivo superplastificante, o estudo em argamassa permite avaliar a ocorrência de segregação e/ou exsudação da mistura com agregado miúdo.

Para o estudo em pasta, define-se o volume da mesma em função do volume necessário para o desenvolvimento dos ensaios. Inicialmente é escolhida uma relação a/c em função das propriedades desejadas do concreto e a dosagem do cimento é fixada em função do volume de pasta necessário (GOMES; BARROS, 2009).

Um dos ensaios realizados com as pastas de cimento produzidas é o de espalhamento, através do tronco de cone denominado *Mini Slump-flow* (Figura 1).

**Figura 1 - Mini Slump-flow utilizado no ensaio de espalhamento**



**Fonte: Adaptado de NUNES, 2001**

Neste, mede-se o diâmetro da extensão final da pasta e avalia-se visualmente a ocorrência de segregação e/ou exsudação, verificando-se se a mistura permaneceu coesa.

Outro ensaio aplicado às pastas é o de escoamento, através do funil de Marsh (Figura 2), onde se mede o tempo necessário para que 200 ml da pasta escoem pela abertura inferior de saída do cone a fim de se conhecer o ponto de saturação do aditivo e observar a fluidez da mistura sem perda de coesão (GOMES; BARROS, 2009).

**Figura 2 - Funil de Marsh**

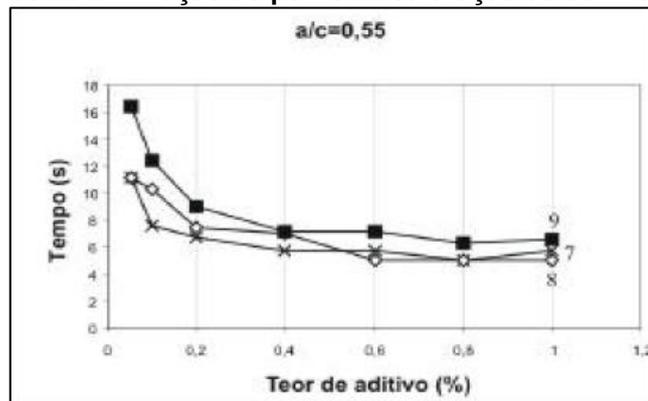


**Fonte: Adaptado de MELO, 2005**

Nesse estudo, são produzidas pastas com diferentes teores de aditivo e as mesmas são submetidas aos ensaios acima descritos. No entanto, o ponto de saturação do aditivo superplastificante é definido de forma diferente para cada ensaio. Enquanto no *mini-slump* é através da análise visual da ocorrência de exsudação e/ou segregação da pasta sem o aumento considerável do espalhamento, no funil de Marsh é considerada a porcentagem de aditivo que causa variação menor que 1 segundo no tempo de escoamento.

Melo (2005) elaborou o gráfico contido na Figura 3 que relaciona a variação no tempo de escoamento das pastas com o referente teor de aditivo usado. Tal gráfico pode ser tomado como base para prever que haverá certa dosagem a partir da qual o aumento no teor de aditivo não causará variações consideráveis no tempo de escoamento, indicando o ponto de saturação do aditivo.

**Figura 3 - Gráfico de determinação do ponto de saturação do aditivo superplastificante**



Fonte: Adaptado de MELO, 2005

O estudo em argamassa pode ser utilizado para observar a condição de segregação que a mistura apresenta através do ensaio de espalhamento, pois as características granulométricas do agregado miúdo podem conter elevada concentração de finos e dispensar o uso de adições minerais para a correção desse efeito.

Para isso, aplicam-se os resultados encontrados em pasta ao proporcionamento de agregado miúdo e observa-se a ocorrência do efeito de segregação, quando vista, constata-se que o agregado miúdo não apresenta a quantidade de finos suficiente ao controle da segregação e exsudação, sendo

necessário o emprego de adição mineral aos materiais constituintes do concreto como forma de correção.

### 2.1.3 Métodos de dosagem

Apesar de também serem empíricos, os métodos de dosagem para o CAA apresentam diferenças quando comparados aos utilizados para concretos convencionais. Tais métodos têm por base princípios que buscam atender as propriedades que constituem uma combinação entre a habilidade das misturas fluírem com facilidade nas fôrmas e a estabilidade das misturas, garantindo a ausência de segregação, independente da complexidade e dificuldade de fluência (GOMES; BARROS, 2009).

As primeiras considerações acerca do pioneirismo do concreto auto adensável impulsionaram o surgimento de diferentes metodologias de dosagem para o mesmo. No entanto, por ser um ponto crítico da produção deste material, alguns estudos foram considerados defasados por terem sido propostos antes do emprego de materiais que melhoram o desempenho da mistura, como os superplastificantes. O resultado disso foi que as primeiras misturas eram inviáveis economicamente e apresentavam dificuldades no alcance das propriedades exigidas pelo produto final (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

A proporcionalidade dos materiais ainda é um fator que gera dificuldades, devido à exigência de um maior controle na execução de ensaios. Repette et al. (2001) afirma que não há restrições para os teores dos materiais componentes do CAA, no entanto, para aqueles produzidos com incorporação de finos e materiais comuns ao concreto convencional, geralmente, tem-se como consumos típicos:

- Teor de cimento entre 350 e 450 Kg/m<sup>3</sup>;
- Incorporação de partículas finas entre 150 e 250 kg/m<sup>3</sup>;
- Relação água/finos (em volume) entre 0,8 e 1,10;
- Volume de agregado miúdo na fração de argamassa entre 35 e 50%;
- Volume de agregado graúdo no concreto entre 25 e 35 %.

Gomes et al. (2009) enfatiza que os procedimentos e teorias desenvolvidos para cada método de dosagem têm sua parcela de contribuição com a evolução do

conhecimento sobre o comportamento do concreto auto adensável através da obtenção de misturas que atendem às propriedades de fluência e estabilidade.

Dentre vários métodos analisados, o presente trabalho conta com a adoção do método de Gomes et al. (2003) como base para estabelecer a dosagem do concreto auto adensável a ser produzido tanto em laboratório como industrialmente no setor de pré-fabricação. Isso devido ao método tratar o concreto como material bifásico, composto pela pasta e pelo esqueleto granular, além de permitir que as proporções da composição de ambas sejam definidas separadamente. Posteriormente estas são combinadas para dar origem ao concreto auto adensável.

#### 2.1.3.1 Método de Gomes

A metodologia proposta para a dosagem de CAA assume que o concreto pode ser obtido otimizando-se a composição da pasta e o esqueleto granular separadamente. A composição final do concreto é obtida buscando-se o conteúdo da pasta necessário para que o concreto apresente as características de um CAA. O modelo sugere que a viscosidade e a fluidez da pasta governem o comportamento do fluxo do concreto. Essa teoria já tem sido assumida por outros métodos. Por outro lado, o método é particularmente aceitável por assumir que a composição da pasta não interfere na determinação da proporção entre os agregados, o que permite a independência de ambas as fases; e que a composição da pasta com um volume mínimo associada com o esqueleto granular são necessários para garantir as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido.

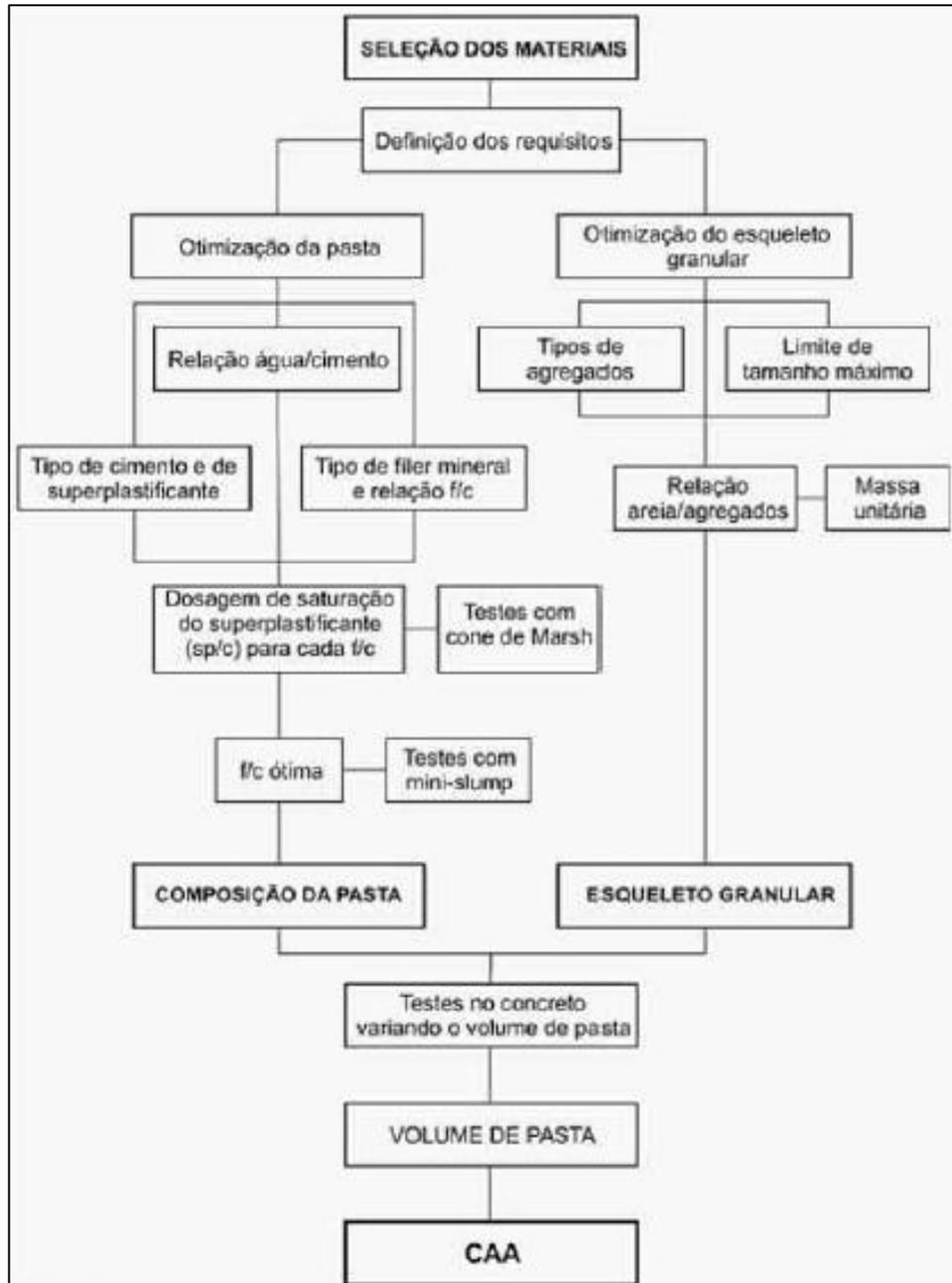
Gomes et al. (2009) explica que o método é executado em três fases: obtenção da composição da pasta, determinação da proporção de mistura dos agregados (esqueleto granular) e seleção do conteúdo da argamassa (traço piloto 1:3). Uma das principais vantagens desse processo é a habilidade de separar as fases, que permite a determinação independente dos parâmetros para a mistura, conforme os seguintes critérios de proporcionalidade dos componentes da mistura:

- Determinação do teor de aditivo superplastificante em relação à massa de cimento, através do desenvolvimento de pastas que atendam propriedades ótimas para o CAA.

- Obtenção da proporção dos agregados pela definição do esqueleto granular através da densidade seca da mistura destes. Tendo por base um método experimental derivado do ensaio padrão da ASTM C29/C29M (1986).
- Garantia de habilidade de preenchimento, habilidade passante e resistência à segregação como propriedades para a determinação do volume ideal de pasta.

A Figura 4 mostra os procedimentos da metodologia apresentada por Gomes et al. (2003) para a obtenção do concreto auto adensável.

**Figura 4 - Fluxograma do método de dosagem**



Fonte: Adaptado de GOMES et al., 2009

#### 2.1.4 Propriedades no estado fresco

As características do concreto no estado fresco é que diferenciam o CAA dos concretos convencionais, sendo o controle das propriedades neste estado fundamental à obtenção de qualidade. Além disso, o desempenho do concreto durante sua vida útil é influenciado pelas características que o material apresenta desde a sua mistura, nas primeiras idades.

O CAA deve apresentar, obrigatoriamente, três propriedades no estado fresco, que não competem ao concreto convencional (REPETTE et al., 2001):

- Habilidade de preenchimento: preencher a fôrma onde é aplicado e se auto compactar, sem vibração, mantendo-se homogêneo;
- Habilidade de passagem: passar através de obstáculos, como as barras de armaduras, sem apresentar bloqueio de partículas de agregados;
- Resistência à segregação ou estabilidade: manter-se homogêneo durante a mistura, o transporte e a aplicação.

Para que o concreto tenha habilidade de preenchimento é necessário que a fluidez da pasta e da argamassa seja elevada, porém, juntamente com esta propriedade o concreto deve apresentar coesão elevada, para que, ao preencher a fôrma onde é aplicado, este permaneça homogêneo. Da mesma forma, a habilidade de passagem está relacionada à coesão de concreto, pois um material coeso contribui para a homogeneidade em situações onde há áreas restritas ou com alta quantidade de armaduras (OKAMURA; OUCHI, 2003).

A estabilidade do concreto fresco é uma propriedade de grande importância, sendo um índice simultâneo da capacidade de retenção de água – oposto da exsudação, que é o afloramento de água e/ou pasta na superfície do concreto, depois de lançado – e da capacidade de retenção do agregado graúdo na massa do concreto fresco – oposto da segregação, que é a separação do agregado graúdo dos demais componentes do concreto, tornando a mistura heterogênea. A resistência do concreto à exsudação e à segregação é chamada de coesão do material (GOMES; BARROS, 2009).

#### 2.1.4.1 Ensaio da caixa L

Esse método permite analisar a fluidez do concreto e a sua capacidade de passar por obstáculos, permanecendo coeso, de forma similar a uma concretagem real em peça armada. A caixa em L é constituída por um depósito vertical com uma abertura para um canal horizontal, sendo esta abertura fechada por uma comporta, que se abre para a passagem do concreto. Atrás dessa comporta existem barras de armadura pelas quais o concreto deve fluir sem obstrução. A Figura 5 apresenta o equipamento da caixa L.

Figura 5 - Caixa L



Fonte: Autoria própria (2014)

Para a realização do ensaio, então, preenche-se o depósito vertical com concreto, abrindo-se a comporta após 30 segundos, de modo que o concreto flua do canal vertical para o horizontal, passando através das barras metálicas. Em seguida, cessado o movimento do concreto, são medidas as alturas de concreto nos dois extremos do canal horizontal, sendo  $h_1$  a altura remanescente de concreto no eixo vertical próxima à comporta e  $h_2$  a altura alcançada pelo concreto no final do canal. A razão  $h_2/h_1$  é definida como coeficiente de bloqueio, devendo ser superior a 0,80 para que a resistência ao bloqueio do concreto seja considerada satisfatória (GOMES; BARROS, 2009). A norma NBR 15823-4:2010 considera que o coeficiente de bloqueio deve ser superior a 0,80 e inferior a 1,00.

Para avaliação qualitativa da segregação do concreto observa-se o acúmulo do agregado graúdo atrás e/ou entre as barras da armadura, sendo que isso não deve ocorrer – o agregado graúdo deve estar uniformemente distribuído ao longo de todo o canal horizontal – para que o concreto apresente boa resistência à segregação.

#### 2.1.4.2 Ensaio do *Slump-flow*

O ensaio de *slump-flow* utiliza como equipamento o cone de Abrams e busca avaliar quantitativamente a capacidade de fluir do concreto mediante a ação de seu peso próprio, bem como, realizar uma análise visual qualitativa da ocorrência de segregação e exsudação no material. A NBR 15823-2:2010 e Gomes et al. (2009) recomendam que o CAA alcance espalhamento entre 600 e 800 mm para ser classificado como tal.

A avaliação visual de segregação é feita pela observação dos agregados graúdos, que tendem a permanecer próximos ao centro quando a resistência à segregação não é suficiente. Por fim, a exsudação é avaliada pela presença de uma auréola de pasta ou argamassa em torno de todo o diâmetro do concreto.

Para a execução inicialmente posiciona-se o cone de Abrams sobre a base, próximo ao local de produção do concreto, preenche-se o mesmo, sem qualquer forma de compactação, com pouco mais de 6 litros de concreto, sendo o topo rasado para a retirada do excesso de material. Verifica-se se a base permaneceu limpa após o preenchimento. Então, cone deve ser levantado verticalmente em um único movimento, permitindo que o concreto flua livremente.

Cessado o espalhamento do concreto, são feitas as medidas do diâmetro espalhado em duas direções perpendiculares entre si. A média destas representa o *Slump-flow*, ou seja, o diâmetro final do espalhamento.

#### 2.1.4.3 Ensaio do funil V

O ensaio do funil V foi desenvolvido para simular a capacidade da passagem do concreto através do estreitamento de uma seção, apenas sob a ação do seu peso próprio, ou seja, reflete a fluidez do material. A Figura 6 apresenta o equipamento do funil V.

**Figura 6 - Funil V**



**Fonte: A autoria própria (2014)**

Para realização do ensaio, o equipamento deve ser posicionado verticalmente, estando seu suporte em superfície nivelada, próximo do local de produção do concreto. Garantido o nivelamento horizontal da abertura superior do funil, o mesmo necessita ser umedecido para evitar que a água do concreto seja absorvida indevidamente. Então, preenche-se o funil com concreto sem que haja nenhuma compactação ou adensamento mecânico, e, após 15 segundos, abre-se a portinhola que veda a abertura da base de forma a permitir que o volume total de concreto flua através do funil e seu tempo de fluxo seja medido.

Para o teste em questão, a NBR 15823-5:2010 considera que o tempo de fluxo é adequado quando varia de 5 a 10 segundos. Já Gomes et al. (2009), recomenda que o tempo de escoamento do concreto através do funil V seja de 6 a 15 segundos.

Quanto à natureza do fluxo, sendo esta contínua ou descontínua, é possível uma avaliação visual do concreto, de modo que um fluxo contínuo e sem interrupções indica elevada resistência à segregação e ao bloqueio, enquanto que o fluxo descontínuo representa o efeito contrário.

#### 2.1.5 Propriedades no estado endurecido

Desde a introdução do CAA na indústria da construção civil, teve-se sempre grande interesse nas propriedades deste material no estado fresco, de modo que estas foram e continuam a ser muito estudadas por pesquisadores em todo o

mundo. Porém, quando se tem em vista o uso estrutural do concreto, são as propriedades do material no estado endurecido que ganham maior importância, exigindo estudos que permitam sua previsão (DOMONE, 2006).

Em geral, Walraven (2007) considera comparáveis as propriedades, no estado endurecido, entre CAA e concretos convencionais vibrados, sendo as diferenças, quando existentes, atribuídas à forma de produção e dosagem do material.

#### 2.1.5.1 Resistência mecânica

A resistência à compressão é, geralmente, a característica mais relevante do concreto endurecido, sendo determinada através de um ensaio padrão de compressão uniaxial, e aceita universalmente, na idade de 28 dias, como um índice geral da resistência do concreto (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

É de conhecimento geral que a relação água/cimento de um concreto é a principal responsável pela porosidade da matriz de cimento e da zona de transição entre matriz e agregado graúdo, que têm influência direta na resistência do concreto, de modo que quanto maior a porosidade do material, menor será sua resistência à compressão (GOMES; BARROS, 2009).

Porém, fatores como adensamento, dimensões e mineralogia dos agregados, presença de adições minerais, aditivos e composição do concreto, em geral, influenciam fortemente as propriedades do concreto no estado endurecido. Desse modo, no CAA a combinação desses fatores faz com que o material apresente uma microestrutura mais homogênea, com uma menor porosidade quando comparada a concretos convencionais. Esse fato faz com que a resistência à compressão dos CAA possa se apresentar ligeiramente maior que a de concretos convencionais, para a mesma relação água/cimento (MELO, 2005).

A durabilidade do concreto é influenciada, também, pela resistência à compressão e porosidade, de modo que o CAA apresenta maior durabilidade quando comparado a concretos convencionais, devido à melhoria apresentada pela microestrutura, mais homogênea e com menor incidência de falhas.

## 2.2 CONCRETO PRÉ-MOLDADO

Segundo a NBR 9062:2006, os elementos pré-moldados são peças executadas industrialmente, mesmo em instalações temporárias em canteiros de obras, em condições rigorosas de controle de qualidade. Portanto, o processo da pré-moldagem / pré-fabricação pode ser entendido como uma metodologia de construção, na qual a obra como um todo ou parte dela, é moldada fora de seu local de utilização. No entanto, a pré-moldagem diferencia-se da pré-fabricação por apresentar um menor controle de qualidade no processo executivo.

A data de início da pré-moldagem não é bem definida, contudo, o próprio nascimento do concreto pré-moldado ocorreu com a invenção do concreto armado, meados do ano de 1870. Sendo assim, pode-se afirmar que a pré-moldagem começou com a invenção do concreto armado (VASCONCELLOS, 2002).

Todavia, a evolução do sistema pré-fabricado se deu juntamente com a evolução da industrialização, mas, foi no período pós Segunda Guerra Mundial, principalmente na Europa, que começou, verdadeiramente, a história da pré-fabricação como manifestação mais significativa da industrialização na construção, devido à necessidade de se construir em grande escala.

O Brasil não sofreu devastações devido à Segunda Guerra Mundial, logo, não sofreu as necessidades de construções em grande escala como ocorrido na Europa. Desta forma, Vasconcelos (2002), afirma que a primeira grande obra onde foi utilizado elementos pré-fabricados no Brasil, refere-se ao hipódromo da Gávea, no Rio de Janeiro, construído em 1926 pela empresa dinamarquesa Christiani-Nielsen.

Não existia até este momento preocupação com a racionalização e com a industrialização dos sistemas construtivos. Esta preocupação só teve início no fim da década de 50, quando, segundo Vasconcelos (2002), na cidade de São Paulo, a Construtora Mauá, especializada em construções industriais, executou vários galpões pré-moldados no próprio canteiro de obras.

Devido à rapidez da construção, com ganho na praticidade e a aprovação pelo público, a pré-fabricação evoluiu das construções de galpões para edifícios de vários pavimentos, com estrutura reticulada. Depois disso, devido às necessidades de cada época e o incentivo deste tipo de construção, a pré-fabricação passou por seus altos e baixos, sendo que atualmente, verifica-se cada vez mais a introdução

de diversos elementos pré-fabricados nas obras. A diversidade das peças e a facilidade de montagem colaboram para que a produtividade, a segurança e a qualidade sejam os grandes diferenciais deste sistema construtivo.

### 2.2.1 Etapas do Desenvolvimento do Concreto Pré-moldado

O concreto pré-moldado apresentou três etapas históricas durante seu desenvolvimento. A primeira ocorreu entre os anos de 1950 a 1970, período em que ocorreu falta de edificações ocasionadas pela devastação da guerra e houve a necessidade de se construir diversos edifícios, tanto habitacionais quanto escolares, hospitais e industriais. Os edifícios construídos nessa época eram compostos de elementos pré-fabricados, cujos componentes eram procedentes do mesmo fornecedor, constituindo o que se convencionou de chamar de ciclo fechado de produção (SERRA et al., 2005).

Serra et al. (2005) reforça que tal ciclo criou um estigma associando a construção pré-fabricada à uniformidade, monotonia e rigidez na arquitetura. Além destas questões, as construções massivas, sem uma avaliação prévia de desempenho dos sistemas construtivos, ocasionaram o surgimento de muitas patologias.

Serra et al. (2005) descreve ainda que a segunda fase ocorreu entre os anos de 1970 a 1980, período em que ocorreram acidentes com alguns edifícios construídos com grandes painéis pré-fabricados. Esses acidentes provocaram além de uma rejeição social a esse tipo de edifício, uma profunda revisão no conceito de utilização nos processos construtivos de elementos pré-fabricados. Neste contexto, teve o início do declínio dos sistemas pré-fabricados de ciclo fechado de produção.

Já a terceira fase, ocorreu pós 1980 e caracterizou-se, em primeiro lugar, pela demolição de grandes conjuntos habitacionais, justificada dentro de um quadro crítico, especialmente de rejeição social e deterioração funcional. Em segundo lugar, pela consolidação de uma pré-fabricação de ciclo aberto, à base de componentes compatíveis, de origens diversas. Esta caracterização de ciclo aberto refere-se ao fato de construir elementos pré-moldados visando à necessidade do mercado e não pensando só na empresa de pré-fabricado, como é o sistema de ciclo fechado.

Nesta etapa, evoluíram-se muito os estudos perante a resistência, as técnicas, formas e tamanhos dos elementos (SERRA et al., 2005).

## 2.2 AREIA DE BRITAGEM

Diante dos problemas ambientais associados à extração de areia natural dos leitos de rios e à disposição dos resíduos das pedreiras, surge a necessidade de uma alternativa que reduza tais efeitos. Esta tem sido a produção de areia artificial a partir dos resíduos gerados no processo de britagem da produção de brita, sendo o produto conhecido também como areia britada e possibilitando a substituição parcial da areia natural em concretos.

A areia obtida a partir da britagem de rochas apresenta considerável potencial de crescimento, justificando e incentivando o desenvolvimento de estudos que verifiquem a viabilidade do emprego da mesma na produção de concreto.

Os agregados miúdos de britagem são obtidos através da redução de tamanho de rochas por trituração em equipamentos mecânicos. Quando da extração de basalto para a produção de brita, há a geração da areia britada que passa, segundo Lodi (2006), pelos seguintes processos de produção:

- a) **Extração da rocha:** retirada de blocos de grandes dimensões da jazida rochosa com a utilização de explosivos e carregadeiras mecânicas;
- b) **Fragmentação secundária:** redução do tamanho dos blocos em dimensões que permitam o transporte e o processo para o britador primário;
- c) **Britador primário:** reduz novamente o tamanho dos fragmentos geralmente através de sistema de mandíbulas, esmagando as pedras entre uma superfície fixa e outra triturante de movimento alternado. O material originado nesse processo é denominado rachão de pedra e pode ser diretamente comercializado ou encaminhado para britagem secundária;
- d) **Britador secundário:** nesta etapa, os fragmentos geralmente alcançam sua dimensão final. São utilizados britadores com diferentes sistemas de moagem e após o material passar pelo primeiro conjunto de peneiras de classificação, serão obtidas as britas 3 e 4, dando origem às dimensões comerciais de britas;

- e) **Britador terciário e quaternário:** processos que se caracterizam por britar rocha contra rocha o que torna os grãos dos agregados mais regulares (menos lamelares), aumentando a produção de material fino (abaixo de 4,8 mm) e de material pulverulento (inferior a 0,075 mm).
- f) **Peneiramento:** separa os grãos já britados em granulometrias diferentes, classificando-os segundo exigências normativas ou comerciais. A produção da areia artificial tem como matéria prima o material passante na peneira 4,8 mm conhecido comercialmente como pó de brita;
- g) **Lavagem:** tal processo pode ser realizado com todas as classificações de brita. O pó de brita, resíduo do processo de produção, é coletado e conduzido para um sistema de eliminação do excesso de material pulverulento, finalizando a sequência de produção da areia artificial.

### 3 METODOLOGIA

O presente trabalho busca produzir e avaliar uma alternativa viável de um material que possa imprimir melhor desempenho ao processo executivo do setor da construção civil, bem como, garantir qualidade para o produto final, ressaltando o potencial de desenvolvimento da tecnologia quando da conquista do mercado através de suas vantagens.

Diante dessa abordagem, é possível classificar o trabalho como uma pesquisa quantitativa, embasada pela análise de conceitos e especificações descritos na literatura e sua devida comparação aos obtidos em fase experimental. Este método emprega a quantificação desde a coleta de dados até o tratamento dos mesmos como forma de obter e analisar a interação entre determinadas variáveis, além de possuir intenção de conduzir os resultados à precisão, amenizando distorções, descobrindo e classificando características de um estudo descritivo (DALFOVO et al., 2008). É uma pesquisa com finalidade específica que estabelece os passos de seu desenvolvimento em um padrão linear, obtendo resultados passíveis de verificação (LIMA, 2001).

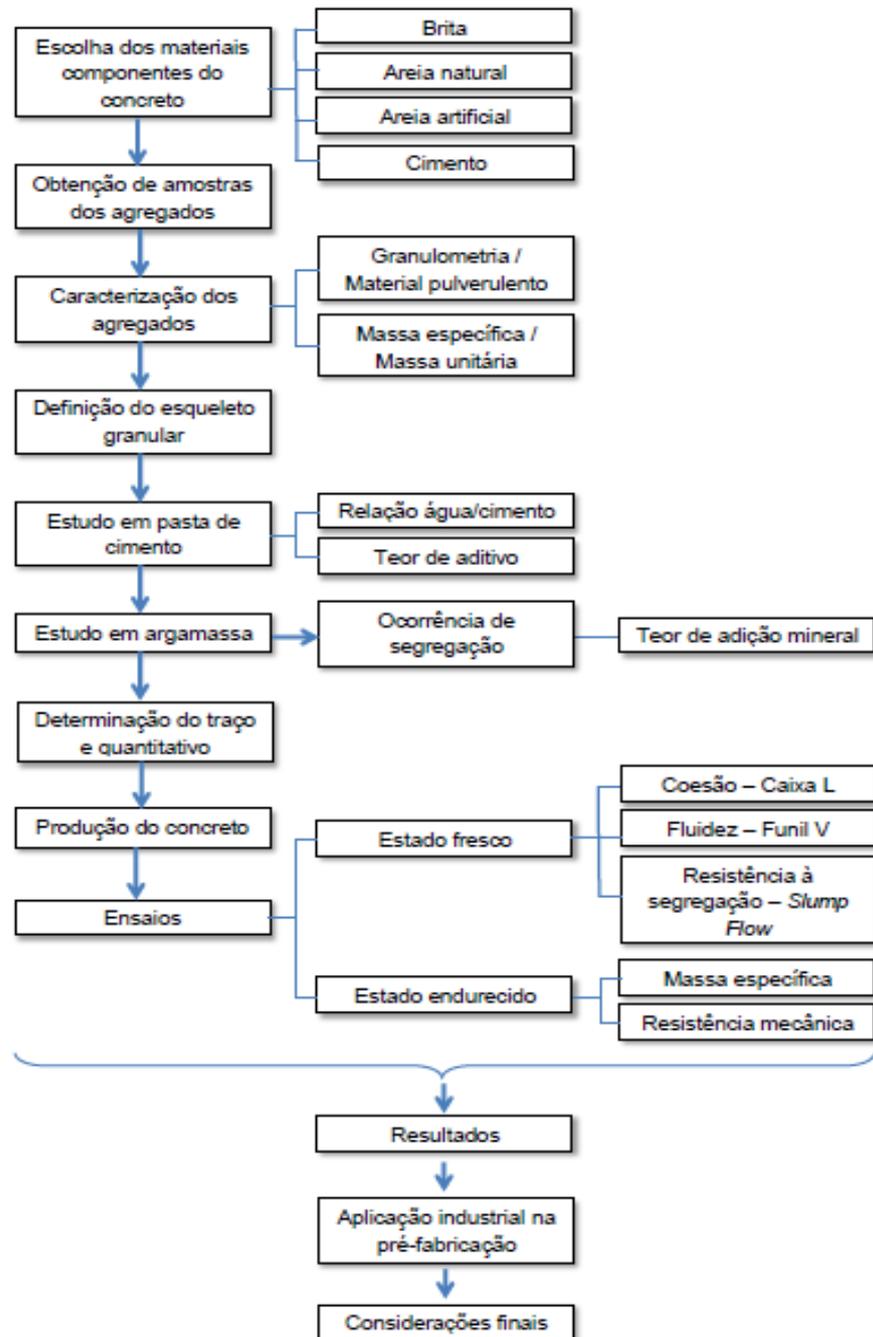
Em definição a estudos exploratórios, Sampieri et al. (1994) dizem que estes acontecem perante a existência da pretensão de oferecer um quadro de referência para futuras aplicações. Gil (2002) fundamenta que a pesquisa explicativa tem como foco a identificação de fatores relevantes na ocorrência de determinados fenômenos. Dessa forma, a delimitação do tema e os objetivos especificados imprimem um caráter exploratório e explicativo à pesquisa, uma vez que esta será desenvolvida a partir de pesquisa bibliográfica combinada à aplicação prática de conceitos já existentes a um estudo de caso.

Além disso, os procedimentos técnicos adotados aplicam à pesquisa a aceção de experimental, que segundo Gil (2002, p. 48), “consiste essencialmente em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis capazes de influenciá-lo e definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto”.

Buscando-se levantar e apresentar os pontos relevantes quando do uso da areia britada em concreto auto adensável em substituição parcial à areia natural, foram definidas as variáveis acerca do objeto de estudo, bem como, detalhado o método de trabalho através de uma sequência de etapas metodológicas

representadas no fluxograma da Figura 7. Ressalta-se que a fixação de cada procedimento levou em conta não apenas a importância no processo do estudo, mas também a disponibilidade dos materiais e dos equipamentos, além do referente tempo exigido.

Figura 7 - Fluxograma de Pesquisa



Fonte: Autoria própria (2014)

Estabelecida a sequência de realização das atividades, o objetivo do trabalho foi avaliado por meio de ensaios laboratoriais. Para isso, foram definidos os materiais e métodos a serem utilizados.

### 3.1 ESCOLHA DOS MATERIAIS

#### 3.1.1 Cimento

O cimento empregado para a realização dos ensaios laboratoriais e da aplicação industrial foi o CP-V ARI, por este apresentar alta resistência inicial e maior finura que os demais cimentos, contribuindo para o aumento da fluidez.

#### 3.1.2 Aditivo

O aditivo adotado para os ensaios em pasta de cimento e para a produção do concreto auto adensável foi o superplastificante Tec-Flow 7030, aditivo à base de éter carboxílico modificado, isento de cloretos, de responsabilidade do fabricante RHEOTEC.

Segundo RHEOTEC, fabricante do material, se utilizado corretamente, este proporciona ao concreto propriedades como: fluidez com elevadas resistências iniciais e manutenção da plasticidade com o tempo; fluidez com mínima relação água/cimento (a/c), sem segregação e exsudação; melhora a aparência e a textura da superfície do concreto; aumenta a resistência à compressão axial inicial e final, à tração na flexão inicial e final, o módulo de elasticidade, a impermeabilidade e a resistência ao ataque de agentes químicos em ambientes agressivos.

#### 3.1.3 Adição mineral

Quando observada a ocorrência de segregação e exsudação no estudo em argamassa e na produção do concreto, foi necessário o controle a partir da utilização

do filer calcário, uma adição inerte, ou seja, que pouco reage com a água e com os compostos do cimento hidratado, possuindo apenas efeito físico de tamponamento dos poros e complemento granulométrico de finos.

#### 3.1.4 Agregados

A coleta das amostras de agregados foi realizada no pátio de estoque da empresa fornecedora e consistiu na divisão em três amostras parciais, obtidas da base, meio e topo da pilha de material, após a retirada da camada superficial, segundo descrito pela NBR NM 26 (ABNT, 2009). Na sequência tais amostras foram reduzidas para ensaio como determinado pela NBR NM 27 (ABNT, 2001) para a caracterização dos materiais, através de um separador mecânico que realiza o quarteamento da amostra.

Como os materiais originalmente estavam expostos ao tempo, fez-se a pesagem de amostras dos mesmos logo após coletadas e estas foram encaminhadas à estufa para secagem. Após isso, aferiram-se novamente as massas das amostras. Reduziu-se então a massa seca da massa úmida e obteve-se o percentual de água contido em cada material. Para os ensaios em laboratório foram utilizados todos os materiais devidamente secos, enquanto que para a aplicação industrial considerou-se a porcentagem de água apresentada pelos agregados.

Além disso, os agregados passaram pelos ensaios de análise granulométrica, descrito no Apêndice A, determinação de massa específica, conforme Apêndice B, de massa unitária, segundo Apêndice C e de teor de material pulverulento, expresso no Apêndice D.

##### 3.1.4.1 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi a brita 1 de origem basáltica que apresenta dimensão máxima característica de 19 mm, pois a distribuição do tamanho das partículas do agregado graúdo influencia diretamente a fluidez e a habilidade de passagem, assim como a demanda de pasta. Partículas de agregados de formato esférico e dimensão característica baixa reduzem o bloqueio e melhoram a fluidez

devido à redução do atrito entre as partículas. Assim, foi realizada a caracterização do material para confirmar a granulometria exigida.

### 3.1.5 Agregado miúdo

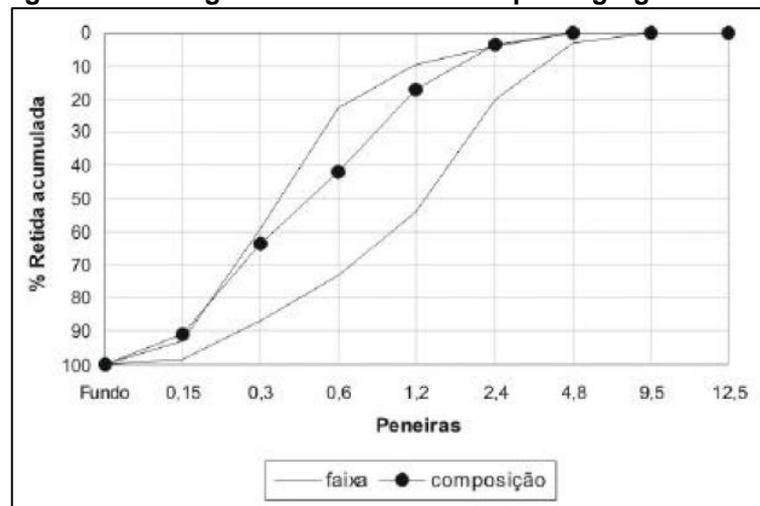
Como agregado miúdo foram empregadas tanto a areia natural como a areia de britagem ou artificial. Ambas provenientes da empresa fornecedora passaram por processo de caracterização a fim de se conhecer as propriedades dos materiais e se estabelecer a correta proporção de cada agregado na composição ideal.

É comum a mistura entre areias com módulo de finura diferentes para conferir melhor desempenho ao concreto. No caso do estudo em questão, fez-se a mistura entre a areia natural e a areia de britagem ou artificial.

A partir da análise granulométrica inicial dos agregados miúdos, fez-se o estudo das proporções entre a areia natural e a artificial, fazendo-se diferentes composições e variando-se as porcentagens de cada material gradativamente. O procedimento consistiu em aplicar as diferentes proporções às porcentagens retidas acumuladas em cada peneira para ambos os materiais de forma a conhecer a porcentagem retida acumulada das misturas e a curva granulométrica das mesmas.

A composição do agregado miúdo final deve se enquadrar nos limites de distribuição granulométrica estabelecidos na faixa apresentada por Melo (2005), conforme a Figura 8.

**Figura 8 - Faixa granulométrica de Melo para agregado miúdo**



Fonte: MELO, 2005

### 3.1.6 Água

A água a ser utilizada na mistura do concreto auto-adensável foi proveniente do canteiro de obras da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato Branco, fornecida pela empresa de abastecimento da cidade.

## 3.2 METODOLOGIA ADOTADA PARA OS ENSAIOS

### 3.2.1 Estudo em pasta

Inicialmente realizou-se o estudo em pasta com o objetivo de se atingir a proporção ideal de aditivo superplastificante, alcançando o ponto de saturação do mesmo, de forma que a pasta de cimento apresentasse espalhamento adequado às características exigidas para um bom concreto auto-adensável.

#### 3.2.1.1 Relação água/cimento (a/c)

A relação água/cimento utilizada para os ensaios em pasta foi inicialmente adotada e seu valor, definido com base no tempo para escoamento da pasta de cimento ao ser realizado o ensaio do tronco de cone de Mini *Slump-flow*, bem como, observando resultados já descritos na literatura acerca do desempenho do concreto auto-adensável.

Para isso, realizou-se o preparo da mistura na argamassadeira mecânica utilizando-se a relação água/cimento (a/c) fixada inicialmente em 0,4 e a quantidade de cimento de 1200g, de acordo com a seguinte sequência:

- Adição do cimento com a argamassadeira desligada;
- Adição da água, durante trinta segundos, com argamassadeira ligada na velocidade baixa;
- Mistura mecânica, em velocidade baixa por trinta segundos;
- Mistura manual por um minuto;
- Mistura mecânica, em velocidade baixa por um minuto.

Após o preparo da mistura, primeiramente fez-se o preenchimento do tronco de cone com a pasta para em seguida levantá-lo, deixando a pasta escoar livremente. Com a estabilização da pasta de cimento sobre a mesa, mediu-se o diâmetro de seu espalhamento com uma trena, além de se observar a ocorrência ou não de segregação e/ou exsudação da pasta.

### 3.2.1.2 Teor de aditivo superplastificante

Esse processo foi realizado através dos ensaios de espalhamento (Mini *Slump-flow*) e escoamento (Funil de Marsh) de pastas com relação a/c constante e igual à definida anteriormente e variações na porcentagem do aditivo, com o objetivo de determinar o ponto de saturação do aditivo superplastificante na pasta.

O preparo consistiu na mistura de cimento, água e aditivo superplastificante, seguindo uma sequência de etapas. Sendo a relação água/cimento já definida, o teor inicial de aditivo foi fixado em 0,05% da massa de cimento.

O procedimento foi realizado na argamassadeira mecânica de acordo com as seguintes etapas:

- Adição do cimento com a argamassadeira desligada;
- Adição da água, durante trinta segundos, com argamassadeira ligada na velocidade baixa;
- Mistura mecânica, em velocidade baixa por trinta segundos;
- Mistura manual por um minuto;
- Mistura mecânica, em velocidade baixa por trinta segundos.
- Adição do superplastificante, com a argamassadeira ligada em velocidade baixa, distribuindo o aditivo em vários pontos dentro da argamassadeira, durante trinta segundos;
- Mistura mecânica durante trinta segundos;
- Mistura manual durante trinta segundos;
- Mistura mecânica durante trinta segundos;

A pasta passou novamente pelo ensaio do Mini *Slump-flow* para medição do diâmetro de seu espalhamento e observação da segregação e/ou exsudação. A partir de então, foram adicionados teores de aditivo superplastificante iguais a 0,05% da massa de cimento a cada novo ensaio.

Além disso, houve a aplicação do ensaio do cone de Marsh, que consistiu em depositar a pasta já produzida no interior do funil até a marca de 200 ml e soltá-la, cronometrando o tempo que a mesma necessitou para escoar totalmente, a fim de se observar a fluidez da pasta em relação ao teor de aditivo.

Ambos os ensaios foram repetidos até que se observou a estabilidade da pasta com espalhamento suficiente e tempo adequado para o escoamento, sem perder a coesão da mistura e agravar a segregação e/ou a exsudação. Por fim, os traçados das curvas de espalhamento e escoamento em função do teor de aditivo forneceram o ponto de saturação deste.

### 3.2.2 Determinação da composição do agregado miúdo

A partir da análise granulométrica inicial dos agregados miúdos, fez-se o estudo das proporções entre a areia natural e a artificial. Para isso, foram feitas diferentes composições, variando-se as porcentagens de cada material gradativamente em 10%.

O procedimento consistiu em aplicar as diferentes proporções às porcentagens retidas acumuladas em cada peneira para ambos os materiais de forma a conhecer a porcentagem retida acumulada das misturas. Com isso foram traçadas as curvas granulométricas referentes às mesclas a fim de compará-las com as curvas originais dos agregados miúdos e obter-se a composição que melhor atendesse à faixa recomendada por Melo (2005).

### 3.2.3 Definição do esqueleto granular

O esqueleto granular é obtido experimentalmente através da massa unitária de misturas de agregados secos não compactados e seus índices de vazios, onde se escolhe como adequada a mistura que apresentar maior massa unitária e menor índice de vazios (GOMES; BARROS, 2009).

O procedimento consistiu em juntar manualmente os agregados secos em uma bandeja metálica, formando misturas com diferentes combinações de proporção entre os agregados miúdo e graúdo, variando-se de 10 em 10% de forma

a conhecer a relação percentual entre os mesmos. Foi mantida fixa a proporção entre as areias encontrada na composição do agregado miúdo. Cada mistura foi colocada em um recipiente sem nenhuma compactação. O recipiente utilizado para a pesagem das mesclas foi um molde de corpo-de-prova em PVC com dimensões de 10x20cm, apresentando massa de 238,5 g e volume igual a 1570,8 cm<sup>3</sup>. Assim, foi alcançada a massa unitária de todas as misturas, conforme a NBR NM 45 (ABNT, 2006), dividindo-se o seu peso total pelo seu volume total.

Conhecendo-se as massas específicas dos agregados, determinou-se a massa específica da mescla dos mesmos, sendo que esta varia conforme a proporção entre eles, ou seja, é diferente para cada mistura. Para isso, foram somadas as multiplicações da massa específica de cada material com a sua respectiva porcentagem na mistura, e divididas por 100.

Com base nos valores alcançados para as massas específicas e para as massas unitárias das misturas, fez-se a determinação do índice de vazios. Esse consiste em reduzir a massa unitária da massa específica e dividir essa diferença pela massa específica, e é expresso em porcentagem ao ser multiplicado por 100.

Os resultados de todas as misturas foram comparados e, assim, definiu-se o esqueleto granular conforme o conceito anteriormente descrito.

#### 3.2.4 Estudo em argamassa

Como a produção do concreto auto-adensável conta com a utilização de areia artificial na composição do agregado miúdo, fez-se o estudo em argamassa para se observar a condição de segregação que a mistura apresentaria. Isso, devido ao fato de a areia de britagem apresentar características granulométricas com elevada concentração de finos, o que pode dispensar o uso de adições minerais para a correção desse efeito.

Para isso, utilizou-se o esqueleto granular em conjunto com o estudo em pasta de cimento, definidos anteriormente, como bases para o proporcionamento dos materiais empregados na produção da argamassa, bem como o traço piloto 1:*m* que especificou a proporção de agregados (*m*) em relação ao cimento, sendo esta sugerida pelo método de dosagem escolhido e igual a 1:3. A partir disso, pôde-se calcular o traço do CAA a ser produzido. Como *m* é a soma das proporções dos

agregados no traço final do concreto, o cálculo consistiu em se manter aquelas obtidas no esqueleto granular, ou seja, de 60% de agregado miúdo e 40% de agregado graúdo e aplicá-las ao valor fixado para  $m$ .

Definida a quantidade dos materiais, a mistura foi preparada na argamassadeira mecânica segundo as seguintes etapas:

- Adição do cimento com argamassadeira desligada;
- Adição da água, durante trinta segundos, com argamassadeira ligada na velocidade baixa;
- Adição do agregado miúdo, durante trinta segundos, com argamassadeira ligada na velocidade baixa;
- Mistura mecânica, em velocidade baixa por trinta segundos;
- Mistura manual por um minuto;
- Mistura mecânica, em velocidade baixa durante trinta segundos;
- Adição do aditivo superplastificante, com a argamassadeira ligada em velocidade baixa, distribuindo o aditivo em vários pontos dentro da argamassadeira, durante trinta segundos;
- Mistura mecânica, em velocidade baixa durante trinta segundos;
- Mistura manual durante trinta segundos;
- Mistura mecânica, em velocidade baixa durante trinta segundos.

Com a mistura pronta, aplicou-se o teste de espalhamento para observar a ocorrência ou não de segregação e/ou exsudação.

Com base nessa etapa, foi determinado o quantitativo de materiais para a produção do concreto e verificou-se que o consumo de cimento calculado para o traço foi superior ao consumo típico recomendado por Repette et al. (2001) para CAA. A partir disso, foi-se necessário refazer o estudo em argamassa, seguindo um novo traço piloto com  $m=4$ , elevando-se, assim, a proporção de agregados a fim de se obter um menor consumo de cimento.

O consumo de cimento recalculado também não se enquadrou nos limites descritos por Repette et al. (2001), no entanto, buscou-se orientação a cerca da continuidade do trabalho e optou-se por dar sequência ao estudo com os últimos valores calculados.

Ainda, devido a pouca disponibilidade do aditivo Tec-Flow 7030, aplicou-se aos ensaios em argamassa o Glenium 3400 NV, aditivo superplastificante da marca BASF que possui indicação do fabricante quanto ao uso entre 0,2% e 1,0% da

massa de cimento. Ambos os aditivos foram utilizados ao serem refeitas as argamassas. Dessa forma, os novos ensaios realizados com a argamassa partiram do teor de aditivo superplastificante de 0,60% variando ainda em 0,05%.

### 3.2.5 Produção do concreto

A partir da escolha do método de dosagem pelo método de Gomes, bem como da definição exigida de todas as propriedades referentes aos materiais a serem utilizados, o concreto auto-adensável objetivado no trabalho foi produzido seguindo a referência normativa da NBR 15823-1:2010.

A partir do estudo em pasta e da definição do traço do CAA no estudo em argamassa, foram determinadas as quantidades dos materiais. Para isso, fixou-se, com base nos testes e na moldagem dos corpos-de-prova, um volume de concreto de 40 litros e calculou-se a quantidade de cimento necessária para tal. Chegou-se à quantidade dos demais materiais através da multiplicação do traço alcançado no estudo em argamassa pelo consumo de cimento alcançado para o volume fixado, mantendo-se o teor de aditivo e a relação a/c.

Os materiais foram lançados no interior da betoneira na seguinte ordem: brita,  $\frac{3}{4}$  da água, cimento, areia, o restante da água e por fim o aditivo, mantendo-se a mistura por cinco minutos.

Os requisitos estabelecidos ao concreto auto-adensável são aqueles que deverão atender as propriedades de capacidade de preenchimento, capacidade de passagem entre armaduras e estabilidade ou ausência de segregação (GOMES; BARROS, 2009). Esses foram observados através dos ensaios de controle de trabalhabilidade no estado fresco com os testes no *Slump-flow*, caixa L e funil V, sendo que quando não atendidos, o concreto passou por correções no proporcionamento dos materiais e novos testes.

A composição real do CAA estudado foi definida, incorporando-se ao traço o filer calcário de modo que os teores de material pulverulento encontrados nos agregados fossem representados em massa na proporção desta adição mineral e reduzidos da massa dos mesmos.

### 3.2.6 Teor de adição mineral

Para o controle da segregação e exsudação empregou-se como material fino a adição mineral já escolhida, o filler calcário. A partir da definição da argamassa, a adição mineral foi introduzida na produção do concreto em pequenas quantidades e sua proporção adequada alcançada através da avaliação visual, ou seja, ao ensaiar a mistura no teste do cone de Abrams e cessado o espalhamento, verificou-se a eficiência do material na redução dos efeitos já descritos, mantendo-se a coesão da mistura.

O ensaio foi repetido elevando-se o teor de adição em 10% da massa de cimento, até que fosse constatado o controle da exsudação e segregação dos materiais constituintes do concreto, sem que o mesmo apresentasse perda de trabalhabilidade.

### 3.2.7 Ensaio de resistência à compressão do concreto

Com o concreto auto-adensável produzido experimentalmente, foram moldados corpos-de-prova cilíndricos sem nenhuma forma de adensamento e, posteriormente, com 24 horas de moldados, extraídos conforme a NBR 7680:1983 e postos em cura conforme a NBR 9479:2006.

De posse disso, os corpos-de-prova foram ensaiados à compressão na prensa hidráulica do laboratório de materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato Branco (Figura 9), segundo especificações da NBR 5739:1994, sendo parte deles às 24 horas, parte aos 7 dias e parte aos 28 dias após a produção, com o objetivo de identificar o desempenho do concreto produzido quanto à sua resistência à compressão.

**Figura 9 - Prensa hidráulica**



**Fonte: A autoria própria (2014)**

### 3.2.8 Aplicação na indústria de pré-fabricados

A partir dos resultados da produção experimental do concreto auto-adensável, partiu-se à aplicação do mesmo em escala industrial, inicialmente conservando-se a proporcionalidade estudada em laboratório. Para isso, foram tomadas por base as normas NBR 15823-1:2010 e NBR 9062:2006.

A produção foi feita mediante a concretagem de uma viga com dimensões de 3,80 m de comprimento, 0,40 m de altura e 0,15 m de largura, sendo esta, parte do processo de fabricação da empresa que forneceu os materiais e disponibilizou o espaço para o desenvolvimento da pesquisa.

O traço planejado para a aplicação industrial do CAA foi o mesmo obtido na produção laboratorial, porém sem a compensação dos finos devido aos materiais serem utilizados diretamente do estoque da empresa, sem passarem por lavagem. A sequência do proporcionamento refere-se ao cimento, areia natural, areia britada, brita e água, respectivamente:

**1 : 1,2 : 1,2 : 1,6 : 0,43**

O teor inicial da adição mineral filler calcário foi o mesmo definido em laboratório, 10% da massa de cimento. Devido à disponibilidade do material, o

aditivo superplastificante utilizado no CAA em escala industrial foi o Tec-Flow 7030, com o qual as pastas e argamassas foram desenvolvidas. No entanto, sua dosagem partiu de 0,8% da massa de cimento a fim de que sua proporção no concreto fosse mais bem controlada no decorrer da mistura, por ser um aditivo diferente do utilizado no concreto anteriormente rodado.

Obteve-se o volume a ser produzido considerando-se a peça a ser concretada e corpos-de-prova para posterior análise de resistência à compressão do CAA, resultando em um total de 250 litros de concreto. Através do traço obtido na produção laboratorial e das considerações da umidade, definiu-se o quantitativo dos materiais. As quantidades de água e filer calcário foram pesadas em porções para serem adicionadas aos poucos ao concreto devido ao fato da mudança de lote da areia artificial, que apresentava, segundo informações do fornecedor, granulometria superior a do lote estudado.

### 3.2.9 Comparação entre o CAA e o CCV

#### 3.2.9.1 Estudo de custos

Foi realizada uma análise de algumas etapas do processo produtivo industrial em pré-moldados, incluindo-se desde a composição unitária dos insumos e mão-de-obra até a etapa de acabamento do produto final produzido, a fim de se obter um comparativo de custos globais entre a aplicação do CAA proposto e do CCV usualmente utilizado na empresa de pré-fabricados.

Os valores referentes ao CAA foram alcançados através dos dados coletados durante a produção do mesmo em escala industrial e os custos atuais utilizados pela empresa, enquanto que os referentes ao CCV foram fornecidos diretamente pela empresa onde o processo foi aplicado. Todos foram avaliados em função da produção de 1,0 m<sup>3</sup> de concreto.

#### 3.2.9.2 Estudo da resistência à compressão

Através dos resultados obtidos durante os ensaios com o concreto auto-adensável, produzido experimentalmente, para a resistência à compressão, pôde-se estabelecer uma comparação direta com a resistência à compressão média do concreto convencional produzido por PHILIPPSEN et al. (2014).

Esse foi produzido a partir do traço de proporção dos materiais cimento, areia natural, areia artificial, brita e água igual a:

$$1 : 1,19 : 0,85 : 3,68 : 0,59$$

A composição do agregado miúdo utilizada no CCV contou com 60% de areia natural e 40% de britagem.

O desenvolvimento do CCV forneceu, com cura convencional em câmara úmida, uma resistência média inicial a 24 horas de 9,30 MPa e ao fim do processo, 28 dias, resistência de 36,80 MPa (PHILIPPSEN et al., 2014).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DOS AGREGADOS

Seguindo os procedimentos metodológicos foi determinada a umidade presente em cada agregado, sendo os resultados apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1 - Umidade dos agregados**

<b>Material</b>	<b>Massa úmida (g)</b>	<b>Massa seca (g)</b>	<b>Umidade (%)</b>
Areia Natural	1475,69	1435,26	2,74
Areia Artificial	1497,25	1444,70	3,51
Brita	2149,36	2110,03	1,83

**Fonte: Autoria própria (2014)**

### 4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

#### 4.2.1 Análise Granulométrica

Conforme descrito na metodologia para os ensaios, a partir da amostragem dos materiais e da secagem dos mesmos, foi realizada a análise granulométrica dos agregados utilizados para a produção do concreto, através do conjunto de peneiras com aberturas especificadas pela ABNT (Figura 10).

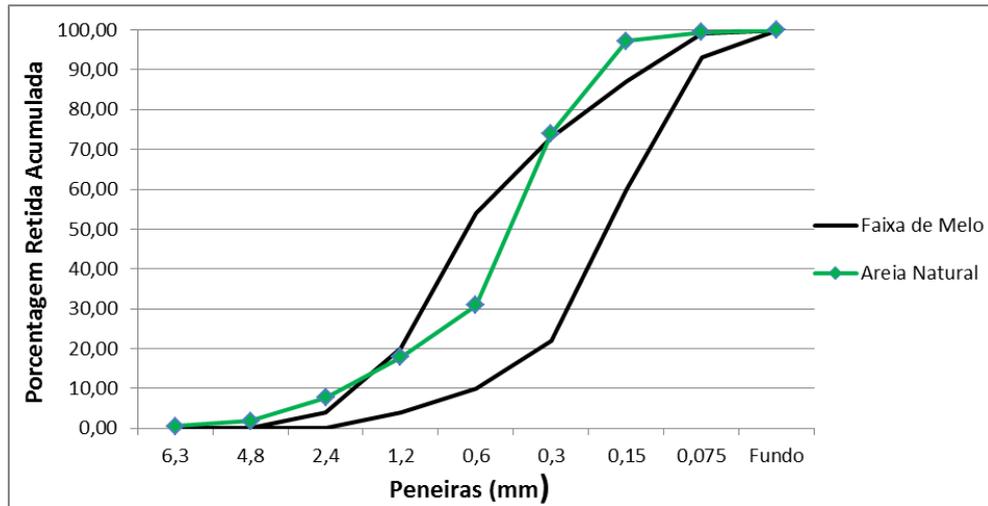
**Figura 10 - Conjunto de peneiras ABNT**



**Fonte: Autoria própria (2014)**

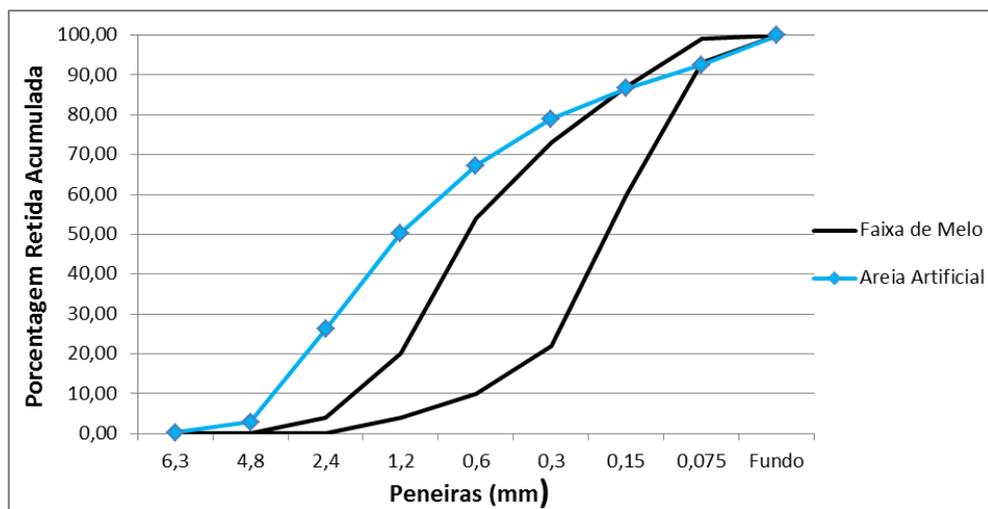
Os resultados obtidos durante os ensaios estão expostos no Apêndice E. A partir desses, obteve-se os traçados das curvas granulométricas, especificando-se a porcentagem retida acumulada de material em função da abertura das peneiras. Ambos os agregados miúdos tiveram suas distribuições granulométricas posicionadas junto à faixa de Melo (2005), conforme descrito nas Figuras 11 e 12.

**Figura 11 - Curva granulométrica da areia natural**



Fonte: Autoria própria (2014)

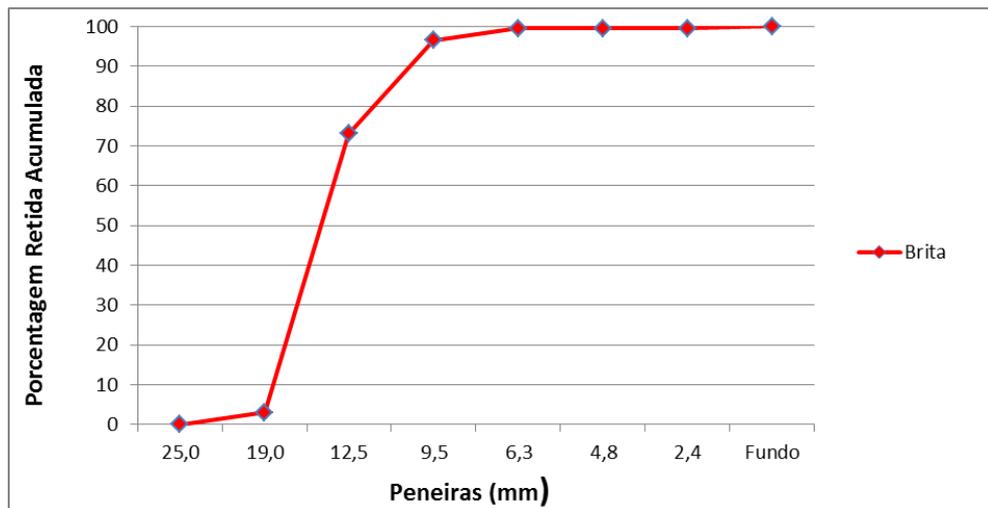
**Figura 12 - Curva granulométrica da areia artificial**



Fonte: Autoria própria (2014)

A Figura 13 apresenta a curva com a distribuição granulométrica encontrada para a brita estudada.

**Figura 13 - Curva granulométrica da brita**



**Fonte: Autoria própria (2014)**

Tendo por base as composições granulométricas dos agregados foram definidos ainda o módulo de finura (MF) e a dimensão máxima característica (DMC) dos mesmos, como descrito na Tabela 2.

**Tabela 2 - Umidade dos agregados**

Agregado	MF (%)	DMC (mm)
Areia Natural	2,29	4,8
Areia Artificial	3,12	4,8
Brita 1	2,99	19,0

**Fonte: Autoria própria (2014)**

Analisando-se os resultados obtidos quanto à granulometria dos materiais, pôde-se perceber que tanto a areia natural quanto a britada não apresentaram distribuição granulométrica totalmente dentro da faixa recomendada por Melo (2005), sendo ambas mais grossas que o ideal. A areia natural ofereceu uma maior adequação, no entanto com uma descontinuidade de grãos promovida pelo excesso de material retido na peneira de 0,15 mm. A areia artificial apresentou uma distância maior de granulometria em relação à faixa de Melo, porém com uma melhor continuidade dos grãos e uma quantidade de material fino que satisfaz as condições recomendadas.

Conforme afirmado por Tutikian e Dal Molin (2008), o módulo de finura da areia artificial classificou-a como muito grossa o que não é adequado para a

produção de CAA, pois, pode contribuir com um menor desempenho da coesão, levando à segregação do concreto a ser produzido, além de implicar na redução da trabalhabilidade do mesmo. Dessa forma, mesmo as areias disponibilizadas podendo ser empregadas para a produção do CAA, o ideal seria o emprego de agregados miúdos com menor granulometria.

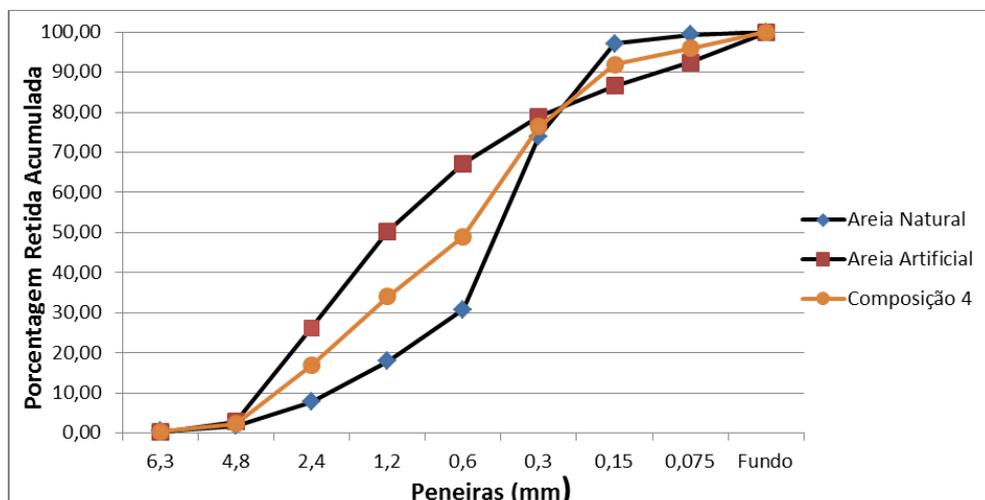
Quanto ao ensaio granulométrico da brita, pôde-se perceber que a mesma apresentou um diâmetro máximo característico de 19,0 mm, sendo este equivalente ao recomendado por Tutikian e Dal Molin (2008) como tamanho máximo usual de brita a ser empregada em CAA.

#### 4.2.2 Composição do agregado miúdo

Seguiu-se a descrição dos procedimentos metodológicos e obteve-se as composições granulométricas e as curvas das mesclas estudadas apresentadas no Apêndice F, juntamente às referências das areias.

Com a análise dos resultados, percebeu-se que a composição que se aproximou do limite superior da faixa de Melo, mantendo uma quantidade significativa de ambas as areias foi aquela com a mescla de 50% de cada agregado miúdo. Esta apresentou uma curva de caracterização granulométrica com comportamento intermediário, reduzindo a quantidade de grãos maiores presentes na areia britada e elevando a quantidade de finos em relação à natural (Figura 14).

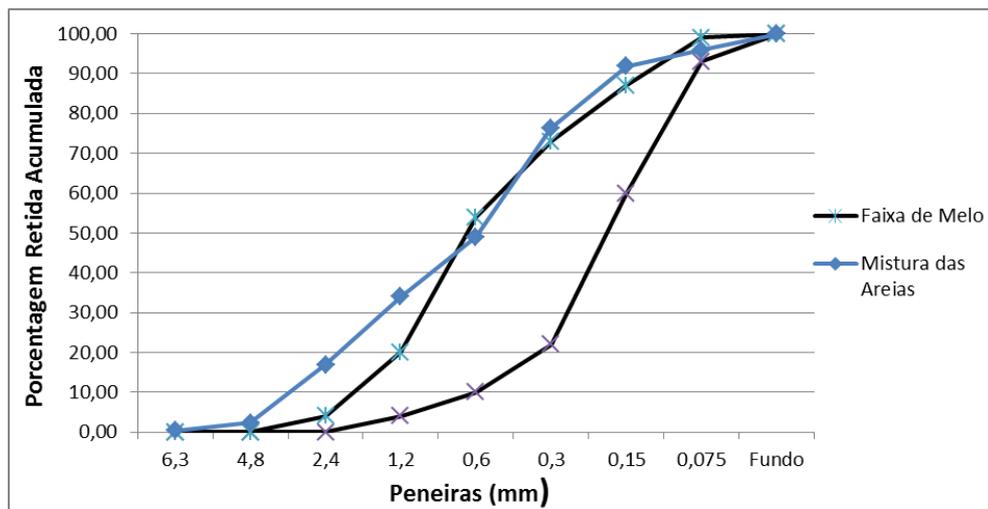
**Figura 14 - Curva granulométrica da composição final dos agregados miúdos**



Fonte: Autoria própria (2014)

Contudo, ao comparar-se a curva granulométrica da mistura entre as areias estudadas com as faixas granulométricas limites do agregado miúdo indicadas por Melo (2005) para concretos auto-adensáveis, percebeu-se que a composição escolhida não atendeu à recomendação, ou seja, apresentou uma granulometria maior que a desejada, como mostra a Figura 15. Como esse era o material disponibilizado, prosseguiu-se com o estudo utilizando-se do mesmo.

**Figura 15 - Curva granulométrica da mistura das areia e faixa de Melo**



Fonte: Autoria própria (2014)

#### 4.2.3 Determinação de massa específica

Foram aplicados os conceitos descritos na metodologia para a determinação das massas específicas dos agregados selecionados para a confecção do concreto auto-adensável, sendo que para cada material foram ensaiadas três amostras com massas aproximadamente, como apresentado no Apêndice G.

Para os agregados miúdos foi adotado o método do picnômetro que confere maior precisão aos resultados finais, sendo este apresentado, juntamente aos demais equipamentos do ensaio, na Figura 16.

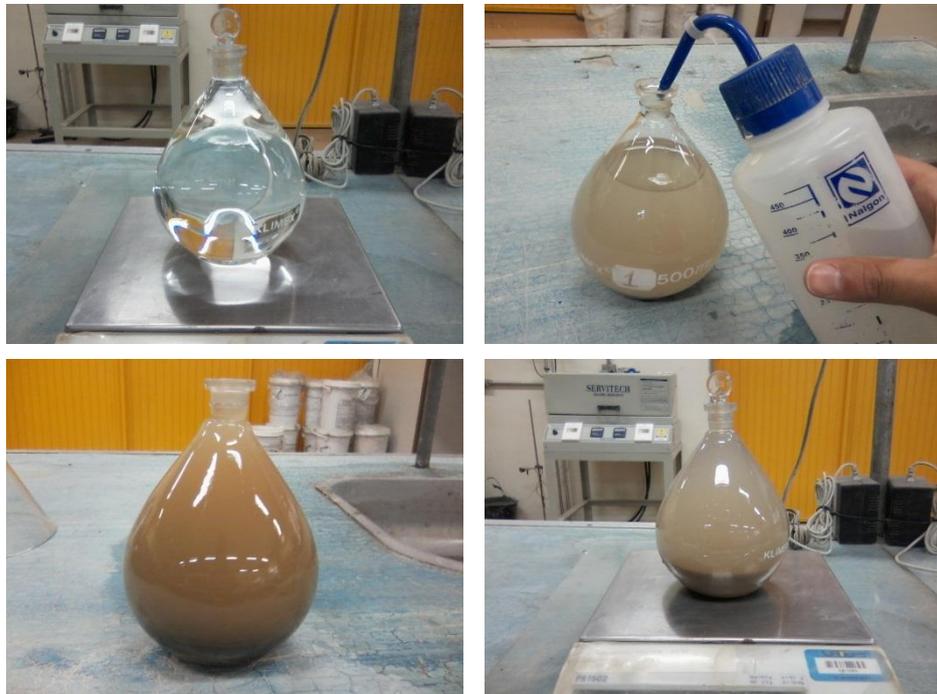
**Figura 16 - Equipamentos do ensaio de massa específica de agregado miúdo**



**Fonte: Autoria própria (2014)**

A Figura 17 apresenta a sequência das etapas para a obtenção da massa específica pelo método do picnômetro.

**Figura 17 - Etapas do ensaio de massa específica**



**Fonte: Autoria própria (2014)**

A massa específica da brita foi encontrada através do método do frasco graduado e considerou-se que a variação apresentada pela amostra 2 em relação às

demais se deu devido à imprecisão do método aplicado, diferentemente do observado com as areias.

Adotou-se a média dos resultados das três amostras como valor final referente à massa específica de cada material, pois a variação entre os mesmos foi mínima. As massas específicas encontradas foram expressas na Tabela 3.

**Tabela 3 - Massas específicas dos agregados**

<b>Agregado</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Areia Natural	2,64
Areia Artificial	2,94
Brita 1	2,80

**Fonte: Aatoria própria (2014)**

#### 4.2.4 Determinação de massa unitária

Com a aplicação do ensaio de massa unitária segundo a metodologia de ensaio, foram obtidos os valores apresentados no Apêndice H. Para o resultado final novamente adotou-se a média como valor de referência das massas unitárias dos agregados, conforme apresentado na Tabela 4.

**Tabela 4 - Massas unitárias dos agregados**

<b>Agregado</b>	<b>Massa unitária (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Areia Natural	1,58
Areia Artificial	1,87
Brita 1	1,57

**Fonte: Aatoria própria (2014)**

#### 4.2.5 Teor de material pulverulento

O teor de material pulverulento foi definido com base na metodologia de ensaio anteriormente descrita, utilizando-se os equipamentos apresentados na Figura 18.

**Figura 18 - Equipamentos para ensaio de teor de material pulverulento**



**Fonte: Autoria própria (2014)**

O Apêndice I contém os valores encontrados no ensaio com cada amostra dos três agregados, sendo que o resultado final foi descrito na Tabela 5.

**Tabela 5- Teor de material pulverulento dos agregados**

<b>Agregado</b>	<b>Teor de material pulverulento (%)</b>
Areia Natural	0,80
Areia Artificial	9,45
Brita 1	0,93

**Fonte: Autoria própria (2014)**

O conhecimento da quantidade de finos presentes nos materiais que compõem o concreto é de relevante importância quando da produção de CAA, pois, como este demanda grande quantidade dos mesmos, o teor de material pulverulento já presente nos agregados pode compensar essa necessidade, reduzindo ou até evitando sua incorporação através de adições minerais para eventuais correções das propriedades do CAA.

Segundo a Tabela 5, 0,80% da massa de areia natural pesada para a produção do concreto era composta por material pulverulento, bem como, 9,45% da massa de areia artificial e 0,93% da massa de brita. O equivalente a tais quantidades foi, por fim, acrescentado à proporção de adição mineral necessária para o controle da exsudação do concreto e descontado da massa dos respectivos

agregados, pois os mesmo não passaram por processo de lavagem antes de serem utilizados. Isso foi empregado na correção final do traço.

Assim, a porcentagem de finos que consta no traço final do CAA estudado refere-se parte à adição de filer calcário e parte ao material pulverulento contido juntamente aos agregados.

#### 4.3 DEFINIÇÃO DO ESQUELETO GRANULAR

Mantendo-se fixa a composição final dos agregados miúdos, definiu-se o esqueleto granular, ou seja, a mistura entre os três agregados, seguindo o procedimento descrito na metodologia adotada para o ensaio.

Os resultados desse ensaio foram expressos na Tabela 6.

**Tabela 6 - Composições dos agregados graúdo e miúdo**

Materiais (%)		Mistura				Índice de Vazios (%)
Areias	Brita	Massa Total (g)	Massa Amostra (g)	Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	
90	10	2834,50	2551,00	1,624	2,792	41,84
80	20	3055,00	2771,50	1,764	2,793	36,83
70	30	3139,00	2855,50	1,818	2,794	34,94
60	40	3187,00	2903,50	1,848	2,795	33,88
50	50	3159,50	2876,00	1,831	2,797	34,53
40	60	3013,00	2729,50	1,738	2,798	37,89
30	70	2879,50	2596,00	1,653	2,799	40,95
20	80	2747,50	2464,00	1,569	2,800	43,97
10	90	2600,50	2317,00	1,475	2,801	47,34

Fonte: Autoria própria (2014)

De posse dos resultados alcançados na análise granulométrica dos agregados para suas respectivas massas específicas, bem como, das massas unitárias das misturas, foram calculados os índices de vazios destas, a fim de se determinar a composição do esqueleto granular.

A mistura que apresentou a maior massa unitária e, conseqüentemente, o menor índice de vazios forneceu, segundo Gomes et al. (2009), a proporção final adequada entre os agregados graúdo e miúdo estudados para a produção do CAA,

ou seja, o esqueleto granular. Este se constituiu de 60% de agregado miúdo e 40% de agregado graúdo.

Dessa forma, 30% dos agregados do concreto será composto por areia natural, 30% por areia artificial e 40% por brita.

#### 4.4 ESTUDO EM PASTA DE CIMENTO

Inicialmente foi pesada a quantidade de materiais e separados os equipamentos (Figura 19) para, a partir da descrição da metodologia de ensaio, produzir as amostras de pasta de cimento e realizar os devidos testes com as mesmas.

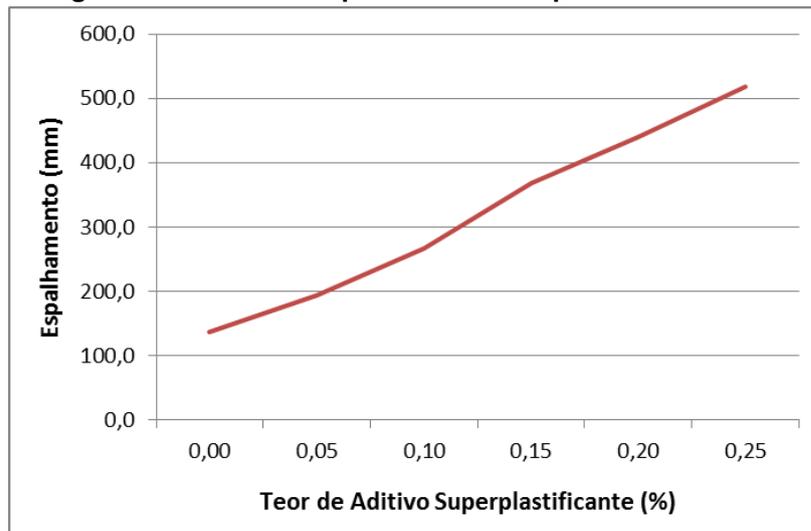
**Figura 19 - Materiais e equipamentos do estudo em pasta de cimento**



**Fonte: Autoria própria (2014)**

O Apêndice J contém os resultados obtidos nos ensaios em pasta para os testes de espalhamento e escoamento. Com esses fez-se o traçado da curva de espalhamento das pastas em função do teor de aditivo superplastificante, apresentado na Figura 20.

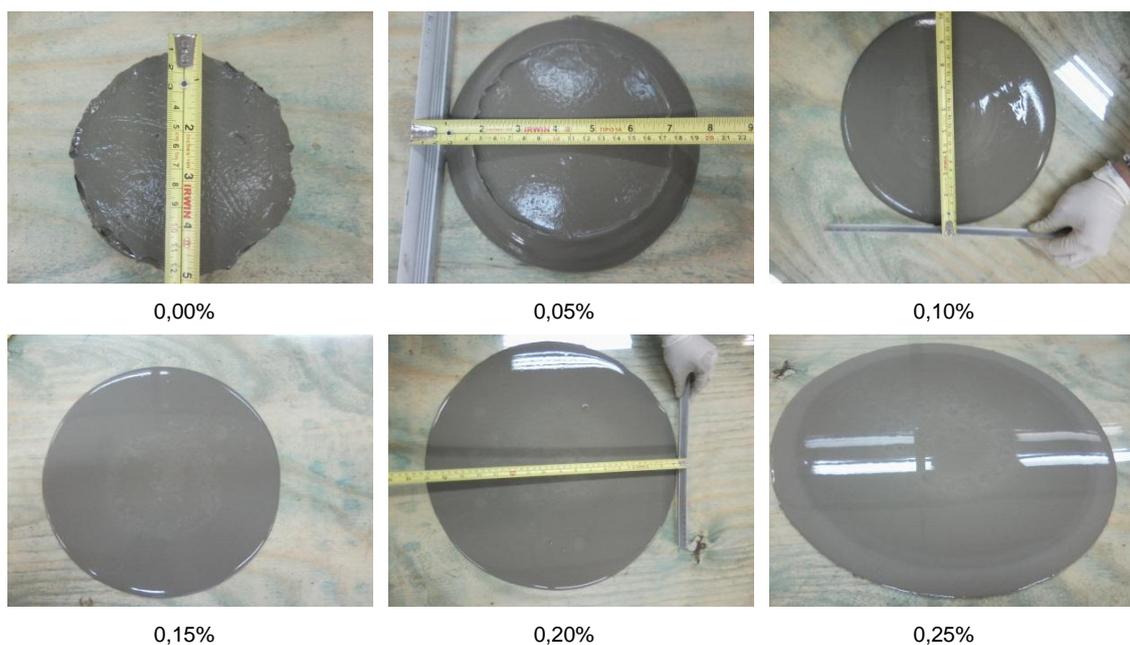
**Figura 20 - Curva de espalhamento das pastas de cimento**



**Fonte: Autoria própria (2014)**

No gráfico acima é possível perceber que o aumento no espalhamento das pastas acompanhou a elevação no teor de aditivo superplastificante, o que demonstra a melhora da fluidez da mistura. Além disso, o ensaio do espalhamento forneceu, através do aspecto visual, a análise da influência do teor de aditivo na segregação e na exsudação das pastas. A Figura 21 apresenta o comportamento das pastas de cimento referentes à aplicação dos diferentes teores de aditivo superplastificante.

**Figura 21 - Aspecto visual das pastas de cimento**



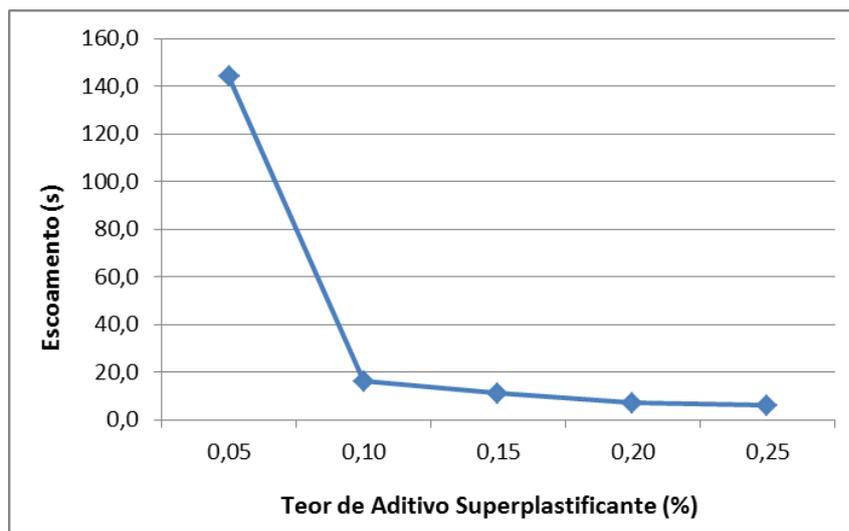
**Fonte: Autoria própria (2014)**

O aspecto visual das pastas permitiu comprovar a ação do aditivo sobre a fluidez da mistura, anteriormente justificada na medição do espalhamento, bem como, verificar, através das manchas mais claras, que a segregação dos materiais se intensificou com o aumento de aditivo superplastificante, além da exsudação apresentada nas bordas, deixando-as irregulares e mais baixas.

Dentre as pastas produzidas, aquela que apresentou melhor resultado quanto ao aspecto aliado ao valor médio de espalhamento foi aquela com teor de aditivo superplastificante igual a 0,20% da massa de cimento, indicando o ponto de saturação do mesmo.

Ainda, os dados coletados no experimento foram analisados para fornecerem o traçado da curva de escoamento das pastas também em função do teor de aditivo, conforme Figura 22.

**Figura 22 - Curva de escoamento das pastas de cimento**



**Fonte: Autoria própria (2014)**

Nesse caso, a análise do gráfico relata a redução no tempo de escoamento causada pelo aumento no teor de aditivo superplastificante. Percebeu-se que ao passar o teor de aditivo de 0,05% para 0,10% houve uma queda brusca no tempo de escoamento, enquanto que para os demais aumentos de aditivo a redução no tempo foi menos acentuada. Seguindo os efeitos, constatou-se ainda que do teor 0,20% para o 0,25% de aditivo a variação no tempo foi menor que 1 segundo, não sendo significativa a influência de mais aditivo na fluidez da pasta.

Assim, ambos os ensaios resultaram em um mesmo ponto de saturação do aditivo superplastificante para a pasta de cimento produzida, sendo este de 0,20%.

#### 4.5 ESTUDO EM ARGAMASSA

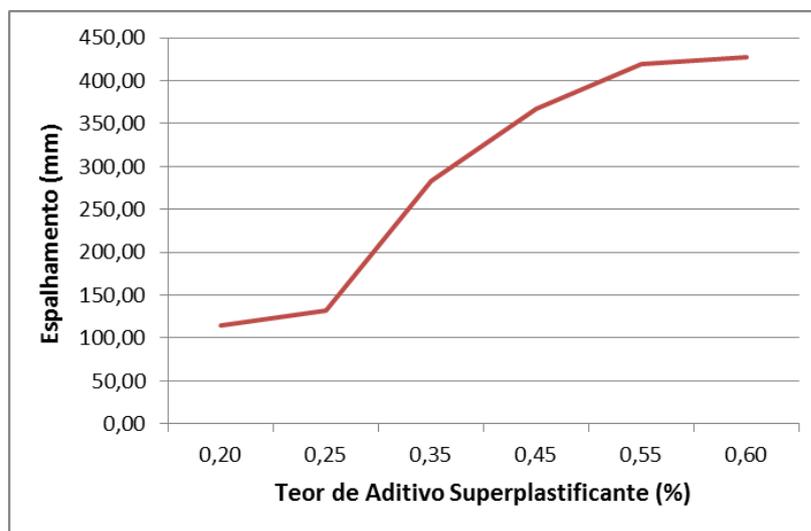
O traço obtido através da descrição metodológica para o concreto auto-adensável em estudo foi:

**1 : 1,8 : 1,2 : 0,4**

Este representa a disposição dos materiais em cimento, areias, brita e água.

Os valores obtidos no ensaio de espalhamento das argamassas produzidas estão descritos no Apêndice K. Com isso, foi traçada a curva de espalhamento (Figura 23) para verificar a ação do aditivo na fluidez, segregação e exsudação da argamassa, como feito anteriormente no estudo em pasta.

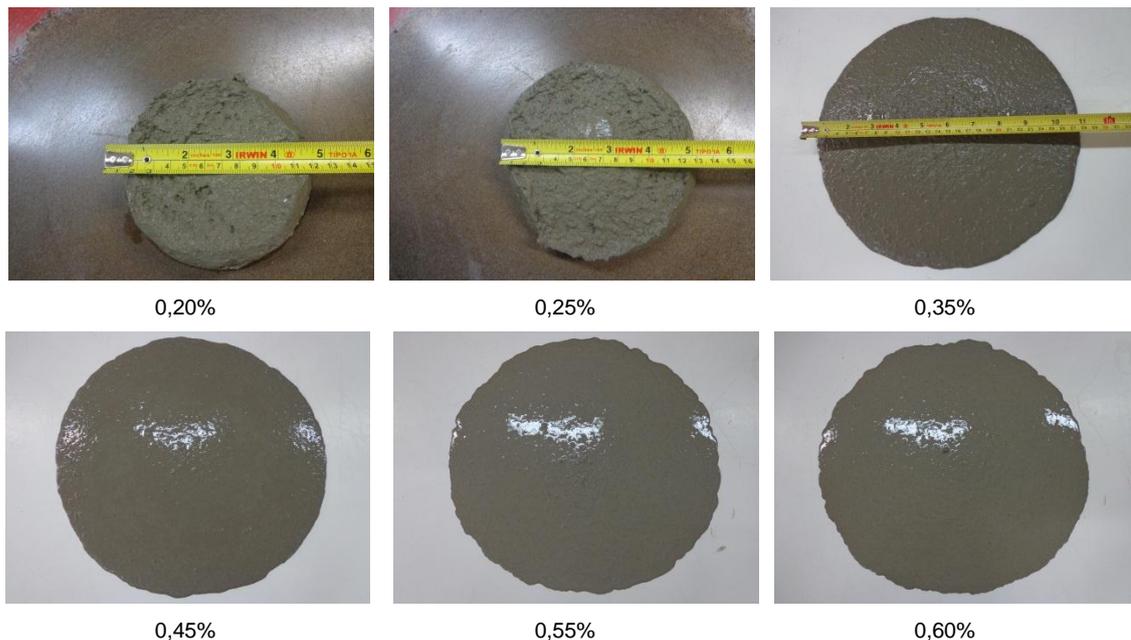
**Figura 23 - Curva de espalhamento das argamassas**



**Fonte: Autoria própria (2014)**

O gráfico de espalhamento do estudo em argamassa demonstrou que a fluidez continua aumentando gradativamente com a elevação do teor de aditivo, porém na análise visual foi possível perceber que há ainda o agravamento da ocorrência de segregação e exsudação dos materiais quando da continuidade no acréscimo de aditivo, conforme exposto na Figura 24.

**Figura 24 - Aspecto visual das argamassas**



**Fonte: Autoria própria (2014)**

As características acima descritas podem ser comprovadas através da percepção do aumento da irregularidade das bordas das argamassas, do surgimento de manchas mais claras na superfície, bem como, da concentração do agregado na parte central do espalhamento, como nos teores de aditivo 0,55% e 0,60%. No entanto, o ponto de saturação do aditivo superplastificante ficou estabelecido na concentração de 0,55%, alcançando o espalhamento médio de 419,0 mm.

O consumo de cimento calculado para o traço foi de 552,75 Kg/m<sup>3</sup>, sendo superior ao consumo típico recomendado por Repette et al. (2001) para CAA.

Seguiu-se, então, a metodologia e o novo traço alcançado para o concreto auto-adensável foi:

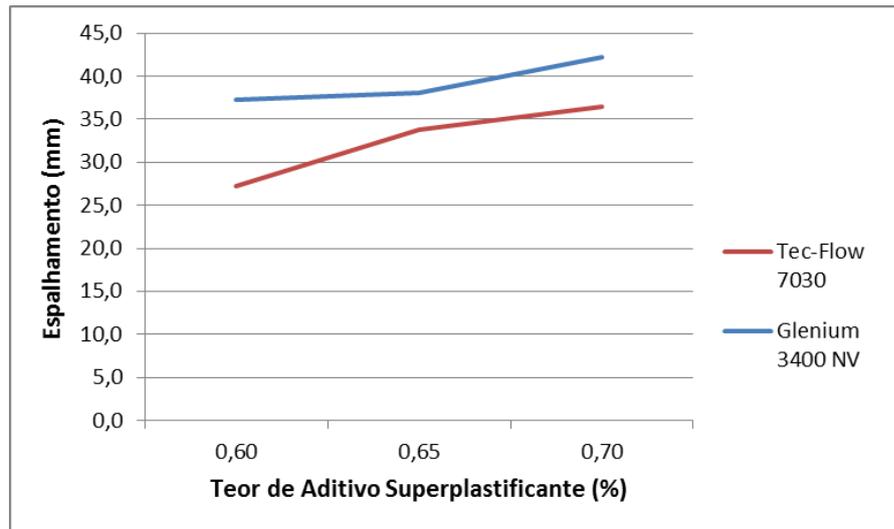
**1 : 2,4 : 1,6 : 0,4**

O consumo de cimento recalculado foi de 461,25 Kg/m<sup>3</sup>.

Os resultados da aplicação do novo traço às argamassas com os aditivos estão expostos juntamente aos primeiros no Apêndice K.

Traçou-se a curva de espalhamento para que pudesse ser feita a comparação da ação dos dois aditivos nas argamassas produzidas e obteve-se o gráfico da Figura 25.

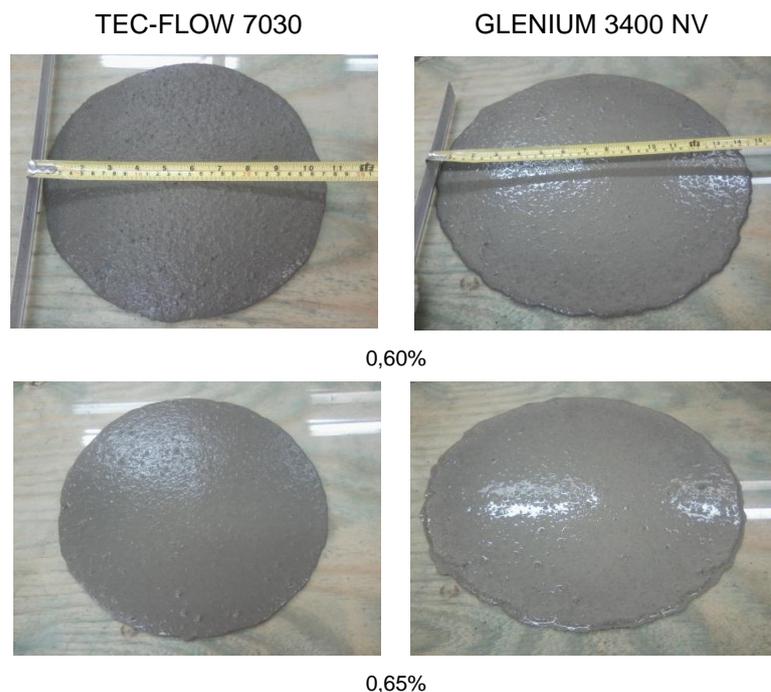
**Figura 25 - Curva de espalhamento comparativa dos aditivos**

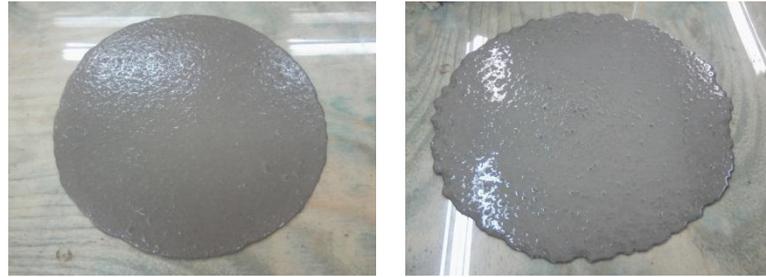


**Fonte: Autoria própria (2014)**

O aditivo Glenium surtiu um efeito melhor quando dos diâmetros de espalhamento das argamassas em relação ao aditivo Tec-Flow, no entanto, o aspecto das mesmas foi menos uniforme, evidenciando a ocorrência de segregação e exsudação mais acentuada dos materiais, como mostra a Figura 26. Diante disso, confirma-se a possibilidade da utilização da adição mineral durante a produção do CAA para que possam ser corrigidos tais efeitos.

**Figura 26 - Aspecto comparativo das argamassas com diferentes aditivos**





0,70%

Fonte: A autoria própria (2014)

Com a análise dos resultados, definiu-se o tipo e o teor de aditivo superplastificante a ser aplicado na produção do CAA como sendo o Glenium 3400 NV a uma taxa de 0,65% da massa de cimento, justificando a escolha através do valor de espalhamento alcançado pela argamassa e pela disponibilidade de volume suficiente de produto.

#### 4.6 PRODUÇÃO DO CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL

Segundo a metodologia de ensaio foram determinadas as quantidades dos materiais apresentadas na Tabela 7, junto ao consumo de cimento e ao volume de concreto.

Tabela 7 - Quantitativo de materiais para o CAA

Material	Massa (Kg)	Volume de concreto (m <sup>3</sup> )	Consumo de cimento (Kg/m <sup>3</sup> )
Cimento	18,45		
Areia natural	22,14		
Areia artificial	22,14		
Brita	29,52	0,04	461,25
Água	7,32		
Filer calcário	1,85		
Aditivo Superp.	0,12		

Fonte: A autoria própria (2014)

Definido o quantitativo de materiais, os mesmos foram separados organizadamente antes da produção do concreto, conforme a Figura 27. Além disso,

foram pesadas quantidades extras de água, aditivo superplastificante e filler calcário para eventuais correções durante o processo de produção do CAA.

**Figura 27 - Quantitativo de materiais para o CAA**



**Fonte: Autoria própria (2014)**

Também, foi separado o material para a imprimação da betoneira, equivalente a um traço (Figura 28) e os moldes para os corpos-de-prova (Figura 29).

**Figura 28 - Material para imprimação**



**Fonte: Autoria própria (2014)**

**Figura 29 - Moldes para os corpos-de-prova**

**Fonte: Autoria própria (2014)**

Como descrito na metodologia, o CAA necessitou passar por um controle para avaliar a trabalhabilidade da mistura proposta, sendo este, por meio da aplicação dos testes de *Slump-flow*, funil V e caixa L.

Inicialmente o CAA não satisfaz as condições dos ensaios recomendadas pela NBR 15823:2010, então, foram aplicadas medidas de correção para que o concreto pudesse apresentar as características esperadas quanto às suas propriedades. Optou-se pelo acréscimo de aditivo superplastificante, sendo a quantidade definida através da análise visual das alterações apresentadas pelo concreto durante o processo. Com isso, alcançou-se um espalhamento adequado, porém houve a ocorrência tanto de segregação quanto de exsudação.

Assim, repetiram-se os procedimentos, dessa vez, controlando-se a exsudação e segregação através da incorporação de adição mineral. Foi adicionado o equivalente à 10% da massa de cimento em filer calcário, controlando o efeito, mas reduzindo a fluidez do CAA. Por fim, decidiu-se por controlar a fluidez do concreto com o aumento na reação a/c. O teor final de aditivo superplastificante foi de 0,99% da massa de cimento e a relação a/c de 0,43. Também, foi feita a compensação entre o teor de material pulverulento dos agregados e o filer calcário, seguindo a metodologia. O resultado foi um total de 23,79% de material fino, ou seja, 0,24 no traço. Dessa forma, percebeu-se que parte do teor de finos demandado pelo CAA foi suprido pelo material pulverulento contido nos agregados.

Com o fim do processo, foram aplicados os três testes para avaliação da trabalhabilidade do concreto e os resultados finais foram dispostos na Tabela 8.

**Tabela 8 - Resultados dos ensaios do CAA no estado fresco em laboratório**

Ensaio	CAA produzido	NBR 15823 (2010)	Gomes (2009)
<i>Slump-flow</i>	603 mm	600 a 800 mm	600 a 800 mm
Funil V	7 s	5 a 10 s	6 a 15 s
Caixa L	0,89	0,8 a 1,0	≥ 0,8

**Fonte: Autoria própria (2014)**

Portanto, o concreto elaborado como produto final do estudo em questão, atendeu aos requisitos estabelecidos por norma para os testes de trabalhabilidade e classificou-se como auto-adensável.

A reorganização do traço do CAA resultou nas proporções finais expostas na Tabela 9.

**Tabela 9 - Traço final do CAA em laboratório**

CIMENTO	AREIA NATURAL	AREIA ARTIFICIAL	BRITA	FILER CALCÁRIO	ÁGUA	ADITIVO SUPERPL.
1	1,19	1,09	1,58	0,24	0,43	0,01

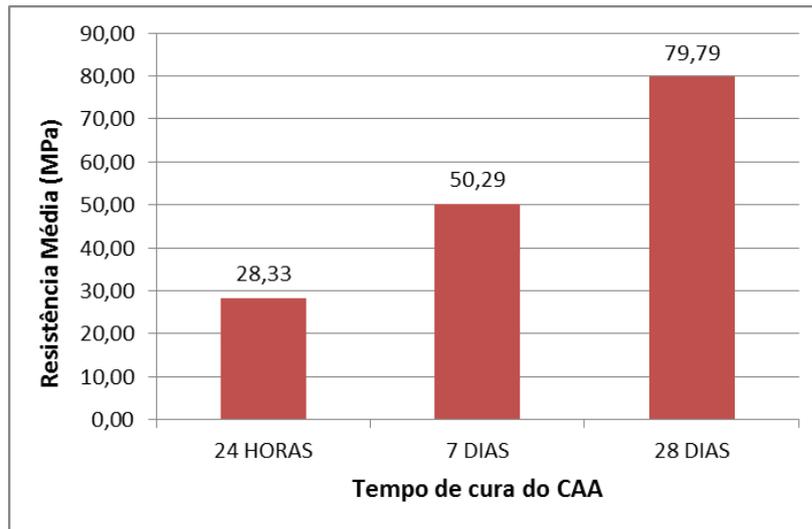
**Fonte: Autoria própria (2014)**

Através da pesagem dos corpos-de-prova moldados com o CAA, foi obtida a massa específica aparente do concreto no estado fresco, conforme descrito no Apêndice L.

#### 4.6.1 Resistência à compressão do CAA

Os corpos-de-prova foram ensaiados à compressão segundo as orientações da metodologia em três diferentes idades de cura do CAA, sendo estas, 24 horas, 7 dias e 28 dias após moldados. Os resultados alcançados constam no Apêndice M e as resistências médias foram dispostas no gráfico da Figura 30.

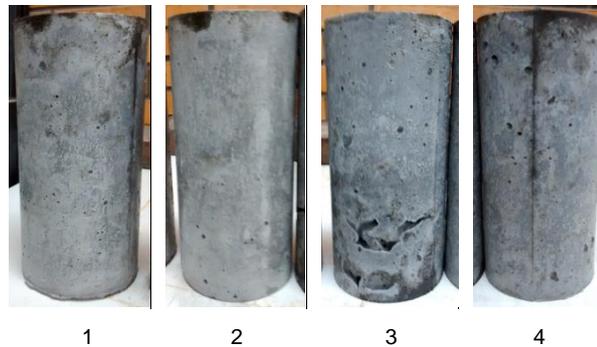
**Figura 30 - Resistência média do CAA**



**Fonte: Autoria própria (2014)**

As figuras 31 e 32 apresentam os primeiros corpos-de-prova antes e depois do rompimento, respectivamente.

**Figura 31 - Cp's antes do rompimento**



**Fonte: Autoria própria (2014)**

**Figura 32 - Cp's depois do rompimento**



**Fonte: Autoria própria (2014)**

De posse dos valores alcançados para a resistência do CAA em diferentes idades, pôde-se perceber que com 24 horas depois de produzido, o mesmo apresentou uma resistência inicial média elevada. Isso comprovou a adequação do produto de estudo à indústria de pré-fabricados por proporcionar uma desforma rápida em relação ao momento da concretagem das peças. Também, obteve-se um coeficiente de variação reduzido quando da realização do ensaio, fato este que demonstrou a homogeneidade da mistura referente ao CAA estudado.

Ao fim dos 28 dias, estando com sua cura finalizada, o CAA apresentou resistência média de 79,79 MPa e demonstrou ser um produto de qualidade quanto às suas propriedades no estado endurecido.

#### 4.7 APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA DE PRÉ-FABRICADOS

Seguindo-se a descrição da metodologia, definiu-se o quantitativo dos materiais e os mesmos foram pesados e separados (Figura 33).

**Figura 33 - Pesagem e organização dos materiais**



**Fonte: Autoria própria (2014)**

Durante a produção industrial, o proporcionamento dos materiais necessitou passar por ajustes para que fosse observado um melhor resultado. Ao ser adicionada gradativamente a água, percebeu-se que uma proporção menor que a pesada para a produção resultou em um bom aspecto da mistura, dispensando o uso de toda a água.

Após isso, com a incorporação do aditivo superplastificante, foi observada a formação de segregação e exsudação dos materiais que, no entanto, não foi suficientemente corrigida pela quantidade de filer calcário apresentada no traço do CAA. Dessa forma, houve a necessidade de se acrescentar adição mineral até o total controle da segregação e exsudação apresentadas (Figura 34). Os ajustes proporcionaram ao CAA uma adição de água referente à relação a/c de 0,38 e um teor de filer calcário de 13,79%.

**Figura 34 - CAA sendo produzido na indústria de pré-fabricados**



**Fonte: Autoria própria (2014)**

A Tabela 10 comporta a comparação entre o traço planejado e o traço final do CAA produzido em escala industrial, sendo que este apresentou a redução em massa da umidade dos agregados e a compensação da mesma na relação a/c. Considerou-se ainda o teor de finos apenas do filer calcário, mantendo-se o teor de material pulverulento nos agregados devido ao proporcionamento ser em obra sem lavagem dos mesmos.

**Tabela 10 - Traço final do CAA produzido industrialmente**

TRAÇO	CIMENTO	AREIA NATURAL	AREIA ARTIFICIAL	BRITA	FILER CALCÁRIO	ÁGUA	ADITIVO SUPERPL.	CONSUMO DE CIMENTO (Kg/m <sup>3</sup> )
Planejado	1	1,20	1,20	1,60	0,10	0,43	0,01	461,25
Final	1	1,17	1,16	1,57	0,14	0,48	0,008	450,05

**Fonte: Autoria própria (2014)**

Os ajustes se fizeram necessários devido à maior granulometria apresentada pelo lote de areia artificial utilizada, demandando um acréscimo no teor de fino em relação ao planejado, além da consideração da umidade dos agregados que elevou a relação a/c final.

O CAA produzido passou ainda pelos ensaios de trabalhabilidade no estado fresco, conforme a Figura 35, sendo alcançados resultados satisfatórios para os três testes, como apresentado na Tabela 11.

**Figura 35 - Ensaios no estado fresco com o CAA na indústria**



**Fonte: Autoria própria (2014)**

**Tabela 11 - Resultados dos ensaios do CAA no estado fresco na indústria**

Ensaio	CAA produzido	NBR 15823 (2010)	Gomes (2009)
<i>Slump-flow</i>	735 mm	600 a 800 mm	600 a 800 mm
Funil V	7 s	5 a 10 s	6 a 15 s
Caixa L	0,9	0,8 a 1,0	≥ 0,8

**Fonte: Autoria própria (2014)**

A peça pré-fabricada definida foi então concretada (Figura 36) com o CAA, após este satisfazer as recomendações quanto a sua trabalhabilidade. O processo foi realizado por meio de um balde (Figura 37) e o concreto transportado até próximo à forma por carrinhos de mão.

Durante a concretagem, percebeu-se que o CAA rapidamente perdeu fluidez, isso pode ser comprovado comparando-se as figuras 36 e 37, do início e fim de concretagem, respectivamente.

**Figura 36 - Concretagem da viga pré-fabricada**



**Fonte: Autoria própria (2014)**

**Figura 37 - Sistema de concretagem utilizado**



**Fonte: Autoria própria (2014)**

Após 20 horas da concretagem, foi feita a desforma da viga pré-fabricada com o CAA (Figura 38) e observou-se que a mesma apresentou um preenchimento

total da fôrma sem nenhum método de adensamento, além de bom acabamento superficial, exibindo somente pequenas falhas na lateral próximo à borda superior.

**Figura 38 - Desforma da viga pré-fabricada com CAA**



Fonte: Autoria própria (2014)

As figuras 39 e 40 apresentam a peça pré-fabricada com o CAA após a desforma.

**Figura 39 - Viga pré-fabricada com CAA**



Fonte: Autoria própria (2014)

**Figura 40 - Viga pré-fabricada com CAA e forma metálica**



**Fonte: Aatoria própria (2014)**

Os corpos-de-prova moldados com o CAA produzido na indústria foram ensaiados à compressão ao completarem 24 horas de cura do concreto, apresentando uma resistência média de 17,16 MPa, conforme apresentado no Apêndice N. As resistências referentes às demais idade do CAA não foram determinadas devido à indisponibilidade de tempo para a sequência do trabalho.

## 4.8 COMPARAÇÃO ENTRE O CAA E O CCV

### 4.8.1 Estudo de custos

Como descrito na metodologia, fez-se o estudo comparativo do custo do processo produtivo do CAA e do CCV e foram obtidos os resultados em uma divisão de mão-de-obra, tempo e custo, sendo todos referenciados por uma produção de 1,0 m<sup>3</sup> de concreto, conforme exposto na Tabela 12.

Tabela 12 - Custos de produção de peça pré-fabricada em CAA e CCV

ETAPA	CAA			CCV		
	Funcionários	Tempo (min)	Custo (R\$/m <sup>3</sup> )	Funcionários	Tempo (min)	Custo (R\$/m <sup>3</sup> )
Quantitativo de materiais	\	\	361,96	\	\	324,37
Produção do concreto	2	30	15,00	2	30	15,00
Transporte até a fôrma	3	15	10,94	3	15	10,94
Concretagem	1	25	6,83	3	45	32,81
Adensamento	0	0	0,00	2	20	9,35
Desforma	2	40	20,10	2	40	20,10
Acabamento Superficial	0	0	0,00	1	60	13,75
<b>TEMPO TOTAL</b>		<b>110</b>			<b>210</b>	
<b>CUSTO TOTAL</b>			<b>414,83</b>			<b>426,32</b>

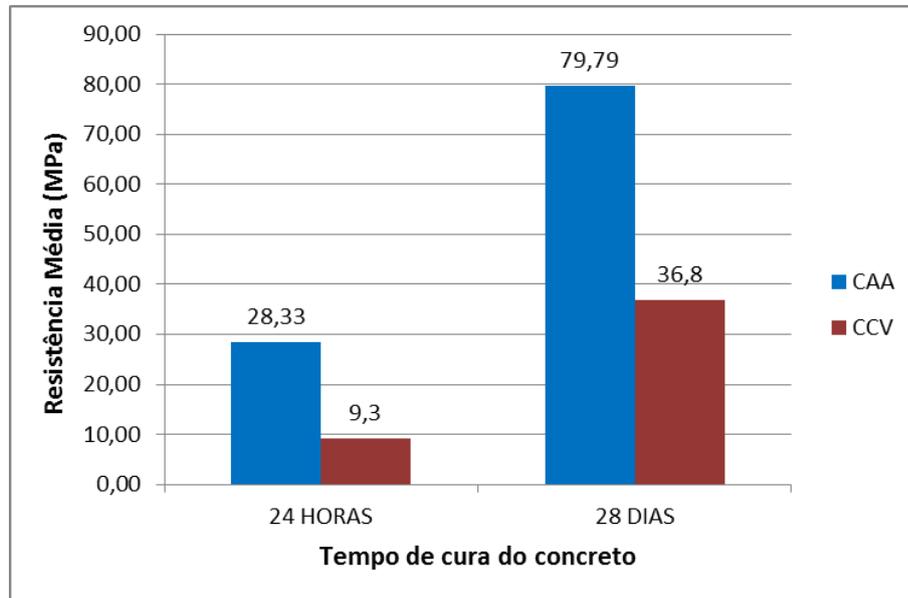
Fonte: Autoria própria (2014)

Com a análise dos resultados descritos na Tabela 12, foi possível observar que o CAA tem um custo total de produção 2,69% menor em comparação ao CCV. Além disso, quando comparados os tempos gastos com cada etapa, evidenciou-se um tempo total 47,62% menor quando do uso do CAA, beneficiando a agilidade e, conseqüentemente, maior produtividade no setor. A economia apresentada pelo CAA foi proporcionada pela eliminação das etapas de adensamento externo e dos reparos em acabamento superficiais, somada a menor demanda de funcionários durante a concretagem.

#### 4.8.2 Estudo da resistência à compressão

Ao realizar-se o comparativo dos valores encontrados com os referenciados no procedimento metodológico, obteve-se o gráfico da Figura 41. Para isso selecionou-se apenas as resistência médias das idades inicial e final da cura dos concretos.

**Figura 41 - Resistências médias à compressão do CCV com o CCA**



**Fonte: Autoria própria (2014)**

Como resultado desse estudo, constatou-se que o CAA desenvolvido em laboratório teve um desempenho 67,17% melhor ao CCV no ganho de resistência inicial e 46,12% quando do final no processo de cura, a 28 dias. Tal fato pode ser explicado devido à maior relação a/c empregada no concreto convencional, bem como, ao menor consumo de cimento apresentado por este.

Mediante a consideração da não adoção de métodos alternativos para a cura dos concretos e a análise das resistências iniciais alcançadas, constatou-se que o CAA apresentou característica que atende à necessidade da indústria pré-fabricada em buscar uma desforma rápida, acelerando o sistema produtivo.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O crescimento da indústria da construção civil impulsiona o desenvolvimento de técnicas que direcionem o setor à eficiência construtiva. Dessa forma, é possível perceber que o incentivo do concreto auto-adensável no mercado é um passo de relevante importância na busca por melhores condições de trabalho nos canteiros de obras, devido às propriedades que esse apresenta. Atrelado a isso, vem o conceito da pré-fabricação e sua necessidade constante em vencer o tempo na busca por ganho de produtividade. Isso proporciona a combinação do sistema construtivo com o produto, podendo gerar resultados vantajosos proporcionados pelo encaixe das propriedades exigidas por um e fornecidas pelo outro.

Há ainda a possibilidade de aperfeiçoamento de técnicas que combinem materiais alternativos, ampliando as vantagens da utilização de um produto como o CAA. Nesse contexto, destaca-se a incorporação da areia de britagem em substituição parcial à natural para a formação do agregado miúdo do concreto. No entanto, para que isso reverta resultados satisfatórios, as características do concreto auto-adensável devem ser criteriosamente determinadas e mantidas durante sua dosagem e aplicação.

Após a realização do estudo, foram feitas as considerações finais a cerca dos resultados obtidos.

Durante a análise granulométrica dos agregados percebeu-se que ambas as areias não apresentaram distribuição de granulometria que se enquadrasse totalmente na faixa descrita por Melo (2005) como recomendada para o uso do agregado miúdo em CAA, estando ambas acima do limite superior e classificando-se como grossas para a finalidade. Isso se deu devido ao excesso de material retido na peneira 1,20 mm, o que caracterizou uma descontinuidade granulométrica. Contudo, a composição com 50% de cada areia melhorou a distribuição dos grãos, reduzindo a quantidade de grãos maiores presentes na areia britada e elevando a quantidade de finos em relação à natural, o que forneceu uma melhor adequação do agregado miúdo. Apesar de ainda não atender às recomendações, a composição foi mantida para que o CAA fosse desenvolvido somente com os materiais já utilizados pela empresa de pré-fabricados no CCV. O agregado graúdo utilizado apresentou uma dimensão máxima característica que atendeu ao indicado para uso em CAA.

Ao se alterar o aditivo de Tec-flow 7030 para Glenium 3400 NV, no estudo em argamassas, observou-se que uma pequena variação de efeitos entre os mesmos, o que validou a manutenção do estudo em pasta. O ponto de saturação do aditivo superplastificante encontrado no estudo em pasta determinou apenas o teor do material tido como parâmetro de início para o estudo em argamassa e deste para o desenvolvimento do concreto. Foram necessários ainda ajustes nesses parâmetros para a obtenção do CAA.

A partir de tais ajustes concluiu-se que a definição do traço de um concreto auto-adensável é essencialmente experimental. Sendo que, através dos ensaios de trabalhabilidade identificaram-se os ajustes e o concreto foi devidamente dosado para atender às propriedades de um CAA, mantendo-se coeso no teste da caixa L, fluido no funil em V e resistente à segregação no *Slump-flow*, para assim, atender às especificações recomendadas pela NBR 15823 (2010).

Percebeu-se que a incorporação da areia artificial intensificou a formação de segregação e exsudação dos materiais, podendo ser explicada pela descontinuidade granulométrica apresentada pelo agregado, pois a falta de grãos com diâmetros menores implicou em um empacotamento de agregados com 33,88% de vazios e fez com que a viscosidade da argamassa presente no concreto diminuísse. Entretanto, a quantidade de finos presente na areia artificial supriu parte do material fino demandado pelo CAA, representando 57,97% do teor de finos total necessário na dosagem do CAA. Com isso, observou-se a viabilidade da substituição parcial da areia natural por areia britada, lembrando que os resultados podem ser melhorados se houver a devida adequação da granulometria dos agregados aos limites de referência.

Quanto ao ganho de resistência, percebeu-se que este foi mais acentuado nas primeiras horas de cura do CAA, devido à utilização do cimento CPV – ARI e ao alto consumo deste apresentado na dosagem. Nas primeiras 24 horas, o CAA produzido em laboratório adquiriu 28,33 MPa de resistência à compressão, o equivalente 35,51% da resistência final apresentada aos 28 dias de cura, 79,79 MPa, representando uma taxa de ganho de resistência de 1,18 MPa/hora. No entanto, a produção industrial do CAA forneceu uma resistência média inicial consideravelmente menor, que pode ser justificada pelo aumento na relação a/c e pela redução no consumo de cimento demandados durante a aplicação do concreto.

A proposta do desenvolvimento e aplicação do CAA na indústria de pré-fabricados selecionada proporcionou um comparativo com relação ao CCV, expondo a realidade do menor custo direto, ao se optar pelo emprego de uma melhor tecnologia, aliado ao benefício da maior produtividade. Ou seja, o trabalho resultou em um produto 2,69% mais barato e que ofereceu um tempo de produtividade 47,62% menor que o usual da empresa. A redução no custo do CAA mediante o CCV se deu apenas através da economia de tempo e mão-de-obra, que representaram 12,98% do valor total de produção por m<sup>3</sup>. Isso se justifica pela eliminação das etapas de adensamento e reparos em acabamentos superficiais, além da maior agilidade na concretagem

Com isso, comprovou-se a adequação do produto de estudo à indústria de pré-fabricados por esse apresentar um custo/benefício significativamente menor que o convencional, bem como, por proporcionar condições para a otimização do uso de fôrmas por meio da agilidade comprovada no processo produtivo e pelo ganho de resistência inicial elevado. O CAA ofereceu ainda bons acabamentos superficiais, decorrentes da sua fluidez no interior das formas, e melhor preenchimento em áreas densas de armadura. Ainda, é relevante destacar a limpeza e a segurança no canteiro de obras, pois os controles de produção exigidos tornam o processo de produção organizado e reduzido.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

\_\_\_\_\_ **NBR NM 26.** Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2009.

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

\_\_\_\_\_ **NBR NM 45.** Agregados – Determinação da Massa Unitária e do Volume de Vazios. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_ **NBR NM 52.** Agregado miúdo – Determinação da Massa Específica e da Massa Específica Aparente. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_ **NBR NM 248.** Agregados – Determinação da Composição Granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_ **NBR 5739:** Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_ **NBR 7211:** Agregado para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_ **NBR 7219:** Agregados – Determinação do Teor de Material Pulverulento. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_ **NBR 7680:** Concreto – Extração, preparo e ensaio de testemunhos de concreto. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_ **NBR 9062:** Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-Moldado. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_ **NBR 9479:** Argamassa e concreto - Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_ **NBR 11768:** Aditivos para Concreto de Cimento Portland. Rio de Janeiro, 1992.

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

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

\_\_\_\_\_ **NBR 15823-4:** Concreto auto-adensável – Determinação da habilidade passante – Método da caixa L. Rio de Janeiro, 2010.

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

AÏTCIN, Pierre-Claude. **Concreto de Alto-desempenho**. 1ª ed. São Paulo: PINI, 2000.

ALMEIDA, Salvador L. M. et al. **Produção de Areia Manufaturada em Usina Piloto**. In: Anais do II SUFFIB – Seminário: O Uso da Fração Fina da Britagem. São Paulo, 2005.

BRÜCK, M. **New perspectives por precast concrete for na innovative low cost housing system**. In: Cape town international concrete conference & Exhibition, 2007.

DALFOVO, Michael Samir; LANA, Rogério Adilson; SILVEIRA, Amélia. Métodos quantitativos e qualitativos: um resgate teórico. **Revista Interdisciplinar Científica Aplicada**. Blumenau, v.2, Sem II. 2008.

DOMONE, P. L. **Self-compacting concrete: an analysis of eleven years of case studies**. 2006. Cement and Concrete Composites. 2006.

EFNARC – THE EUROPEAN FEDERATION OF SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS. **The European guidelines for selfcompacting concrete. Specification, production and use**. Maio, 2005.

GIL, Antonio C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GOMES, Paulo C. C.; BARROS, Alexandre R. **Métodos de dosagem de concreto auto-adensável**. São Paulo: PINI, 2009.

LIMA, Paulo G. **Tendências Paradigmáticas na Pesquisa Educacional**. 301 f. Dissertação (mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Educação. Campinas, 2001. Disponível em: <<http://www.do.ufgd.edu.br/PauloLima/arquivo/mestrado.pdf>>. Acesso em: 23 jan. 2014.

LISBÔA, Edvaldo M. **Obtenção do concreto auto-adensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas**. 2004. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2004.

LODI, Victor H. **Viabilidade técnica e econômica do uso de areia de britagem em concretos de cimento Portland na região de Chapecó-SC**. 2006. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.

MANUEL, P. J. **Estudo da influência do teor de argamassa no desempenho de concretos auto-adensáveis**. Dissertação de mestrado, UFRGS, Porto Alegre, 2005.

MARANGON, Ederli. **Desenvolvimento e caracterização de concretos auto-adensáveis reforçados com fibra de aço**. 2006. Dissertação – Programa de Pós-Graduação de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

MELO, Karoline A. **Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de fíler calcário**. 2005. Dissertação – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

NUNES, Sandra C. B. **Betão auto-compactável: Tecnologia e propriedades**. 2001. Dissertação – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2001.

OKAMURA Hajime; OUCHI Masahiro. **Self-Compacting Concrete**. Journal of Advanced Concrete Technology. Japan Concrete Institute, Japão, 2003.

PENNA, Paulo C. V. **Expansão da Mineração de Agregados para a Construção Endossa Crescimento da Economia**. IBRAM, Brasília, 2010.

PHILIPPSEN, André Luiz Andreoni, e SHIMOSAKA, Tobias Jun. **Estudo do efeito da cura térmica na resistência inicial do concreto para aplicação na indústria**

**de pré-moldados de concreto.** 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2014.

REPETTE, W. L.; ISAIA, GC. **Concreto: Ciência e Tecnologia.** IBRACON, Foz do Iguaçu, 2001.

SAMPIERI, Roberto H.; COLLADO Carlos F.; LUCIO, Pilar B. **Metodología de la Investigación.** México: McGraw Hill, 1994.

SERRA, S.M.B.; FERREIRA, M. A.; PIGOZZO, B. N. **Evolução dos Pré-fabricados de Concreto.** 1º Encontro Nacional de Pesquisa- Projeto- Produção em Concreto Pré-Moldado. São Carlos, 2005.

TUTIKIAN, Bernardo; F. DAL MOLIN, Denise C. **Concreto auto-adensável.** 1ª ed. São Paulo: PINI, 2008.

VALVERDE, Fernando M. **Agregados para Construção Civil.** In: Balanço Mineral Brasileiro 2001. Brasília: DNPM, 2001.

VASCONCELOS, A. C. **O Concreto no Brasil: pré-fabricação, monumentos, fundações.** Volume III. Studio Nobel. São Paulo, 2002.

WALRAVEN, J. **SCC applied in the precast concrete industry.** In: Cape town international concrete conference & Exhibition, 2007.

**APÊNDICE A – Procedimentos para a realização da composição granulométrica dos agregados**

Seguindo o especificado pela NBR NM 248 (ABNT, 2003), os agregados passaram pelo processo de determinação de suas composições granulométricas.

Depois de realizada a amostragem do material o mesmo foi seco em estufa e dividido em duas novas amostras. As peneiras utilizadas foram as da série normal, com fundo e tampa, sendo dispostas com abertura de malha em ordem crescente da base para o topo. Para os agregados miúdos natural e de britagem, as peneiras empregadas comportaram a sequência com aberturas de: 6,30 mm; 4,80 mm; 2,40mm; 1,20 mm; 0,600 mm; 0,300 mm; 0,150 mm e 0,075 mm. Enquanto que para o ensaio do agregado graúdo as peneiras utilizadas foram as de aberturas: 25,00 mm; 19,00 mm; 12,70 mm; 9,50 mm; 6,30 mm, 4,80 mm e 2,40 mm.

A amostra de agregado miúdo, previamente separada e seca, foi depositada sobre a peneira superior do conjunto, de modo a evitar que fosse formada uma camada muito espessa. Na sequência, o conjunto de peneiras foi agitado mecanicamente, por um tempo razoável de forma a promover a separação e classificação granulométrica do material em seu interior. Ainda, cada peneira com tampa foi acoplada na peneira de malha imediatamente inferior e ao fundo, sendo agitada manualmente.

Em seguida, o material retido em cada peneira e no fundo passou por pesagem. De posse dessa informação, fez-se o cálculo da porcentagem de partículas de igual dimensão retidas em cada peneira, em relação à massa total da amostra peneirada, bem como, as porcentagens retidas acumuladas. Sendo que, ao fim, o somatório de todas as massas não deve diferir em mais de 0,3% da massa inicial peneirada.

Além disso, objetivou-se determinar o módulo de finura de cada agregado, através da soma das porcentagens retidas acumuladas em massa, nas peneiras da série normal, dividida por 100. Também, foi definida a dimensão máxima característica do agregado, que corresponde à abertura nominal, em milímetros, da malha na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.

O procedimento foi repetido com a segunda amostra preparada.

**APÊNDICE B – Procedimentos para a determinação da massa específica dos agregados**

Com o material coletado na amostragem e reduzido para ensaio segundo as especificações, tomou-se por base os procedimentos da NBR NM 52 (ABNT, 2009) e aplicou-se o método do picnômetro para a determinação da massa específica dos agregados.

Para os agregados miúdos, inicialmente, foram separadas amostras para cada tipo de areia. Na sequência, as amostras foram pesadas e reservadas individualmente. O picnômetro foi completado com água e também se retirou a massa do conjunto frasco/água. Após isso, tomou-se uma amostra e a mesma foi depositada no frasco aferido específico do ensaio, completando-se com água e registrando-se a massa do conjunto. O sistema foi movido para a eliminação das bolhas de ar e depois mantido em repouso por aproximadamente 1 hora. Após isso, o nível da água foi novamente completado até a borda do frasco, determinando-se a massa total. O ensaio foi repetido com três amostras de areia natural e três de areia artificial. A partir de tais dados foi possível a determinação da massa específica dos agregados miúdos.

Para o agregado graúdo, aplicou-se o método do frasco graduado. Selecionou-se a amostra seca e aferiu-se a massa da mesma, preencheu-se um frasco graduado com água até um volume conhecido e após isso, depositou-se a amostra dentro do mesmo, conferindo o volume final alcançado. Reproduziu-se o ensaio com três amostras de massas de aproximadamente iguais. Dividindo-se a massa da amostra pela variação de volume provocada pela mesma, obteve-se a massa específica do material.

**APÊNDICE C – Procedimentos para a determinação da massa unitária dos agregados**

A determinação da massa unitária dos agregados teve por base a NBR NM 45 (ABNT, 2006). Utilizou-se um pote plástico para realização do ensaio, sendo que o recipiente passou por pesagem e uma calibração para que seu volume fosse devidamente conhecido. Para isso, preencheu-se o mesmo com água e cobriu-se com uma placa de vidro a fim de eliminarem-se as bolhas de ar e o excesso da água. Assim, determinou-se a massa do recipiente cheio e a temperatura da água. Através da temperatura, encontrou-se a massa específica da água e com esta, o volume do recipiente, dividindo-se a massa de água por sua massa específica.

Com os agregados devidamente secos, iniciou-se o ensaio. O recipiente foi preenchido individualmente pelos materiais em questão com lançamento de uma altura de aproximadamente 50 cm até o transbordamento, seguido do nivelamento da superfície e da pesagem do conjunto. Ao ser dividida a massa do material pelo volume do recipiente definiu-se a massa unitária do mesmo. O procedimento foi repetido com três amostras de cada material.

**APÊNDICE D – Procedimentos para a determinação do teor de material pulverulento dos agregados**

Como o controle de material fino é importante para a produção de um concreto auto adensável de qualidade, os agregados necessitaram passar por uma análise da porcentagem de material pulverulento contida em suas composições. Para o desenvolvimento de tal processo foram consideradas as orientações da NBR 7219 (1987).

As peneiras a serem utilizadas neste ensaio, para os agregados miúdos, foram as de aberturas 1,20 mm e 0,075 mm, sendo que, a peneira 1,20 mm foi posicionada sobre a peneira 0,075 mm, para protegê-la contra esforços provocados por excesso de material ou por partículas de grandes dimensões que eventualmente fossem carregadas pela água de lavagem. Já para o agregado graúdo utilizou-se as peneiras de aberturas 6,30 mm e 4,80 mm.

Devidamente feita a amostragem, o material foi colocado em estufa para secagem até constância de massa, seguida da pesagem. Então, o agregado seco passou para um recipiente, sendo recoberto por água e agitado, com o auxílio de uma haste, de forma a provocar a separação e suspensão das partículas finas. Feito isso, a água foi despejada cuidadosamente através das peneiras para não perder material. Retornando o material retido nas peneiras para o recipiente, o processo repetiu-se até que a água de lavagem tornou-se límpida.

Ao terminar a lavagem, todo o agregado retornou ao recipiente, sendo recoberto com água e permanecendo em repouso o tempo necessário para decantar as partículas. Após, o excesso de água foi eliminado e a amostra novamente direcionada à estufa, sem perda de material, até alcançar constância de massa e ser pesada.

O teor de material pulverulento contido em cada amostra foi obtido pela diferença entre as massas das amostras antes e depois da lavagem e expresso em porcentagem da massa inicial da amostra ensaiada.

## **APÊNDICE E – Composição granulométrica dos agregados**

### Composição granulométrica da areia natural

Peneiras # (mm)	Amostra 1			Amostra 2			Média	
	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada	% retida	% retida acumulada
6,3	5,83	0,57	0,57	4,70	0,46	0,46	0,52	0,52
4,8	13,66	1,34	1,91	12,14	1,19	1,65	1,26	1,78
2,4	59,26	5,80	7,71	62,25	6,09	7,74	5,95	7,72
1,2	101,86	9,97	17,68	105,98	10,37	18,11	10,17	17,89
0,6	131,65	12,89	30,57	132,98	13,01	31,12	12,95	30,84
0,3	438,87	42,96	73,53	443,64	43,41	74,53	43,19	74,03
0,15	241,93	23,68	97,21	232,28	22,73	97,26	23,21	97,24
0,075	22,91	2,24	99,46	21,01	2,06	99,31	2,15	99,38
Fundo	5,56	0,54	100,00	7,02	0,69	100,00	0,62	100,00
<b>Total</b>	<b>1021,53</b>	<b>100,00</b>		<b>1022,00</b>	<b>100,00</b>		<b>100,00</b>	

Fonte: Autoria própria (2014)

### Composição granulométrica da areia artificial

Peneiras # (mm)	Amostra 1			Amostra 2			Média	
	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada	% retida	% retida acumulada
6,3	2,82	0,21	0,21	2,97	0,22	0,22	0,21	0,21
4,8	37,96	2,77	2,97	35,48	2,58	2,80	2,67	2,88
2,4	318,49	23,21	26,18	320,75	23,34	26,13	23,27	26,15
1,2	330,84	24,10	50,28	331,76	24,14	50,27	24,12	50,28
0,6	230,98	16,83	67,11	235,66	17,14	67,41	16,99	67,26
0,3	159,65	11,63	78,74	161,45	11,75	79,16	11,69	78,95
0,15	106,72	7,78	86,52	105,44	7,67	86,83	7,72	86,67
0,075	82,51	6,01	92,53	79,61	5,79	92,62	5,90	92,58
Fundo	102,53	7,47	100,00	101,41	7,38	100,00	7,42	100,00
<b>Total</b>	<b>1372,50</b>	<b>100,00</b>		<b>1374,53</b>	<b>100,00</b>		<b>100,00</b>	

Fonte: Autoria própria (2014)

### Composição granulométrica da brita

Peneiras # (mm)	Amostra 1			Amostra 2			Média	
	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada	% retida	% retida acumulada
25,0	0	0	0	0	0	0	0	0
19,0	113,61	4,73	4,73	33,97	1,41	1,41	3,07	3,07
12,5	1659,50	69,16	73,90	1708,00	70,88	72,29	70,02	73,10
9,5	541,52	22,57	96,46	583,58	24,22	96,51	23,39	96,49
6,3	71,83	2,99	99,46	74,06	3,07	99,59	3,03	99,52
4,8	0	0	99,46	0	0	99,59	0	99,52
2,4	0	0	99,46	0	0	99,59	0	99,52
Fundo	13,01	0,54	100,00	9,95	0,41	100,00	0,48	100,00
<b>Total</b>	<b>2399,47</b>	<b>100,00</b>		<b>2409,56</b>	<b>100,00</b>		<b>100,00</b>	

Fonte: Autoria própria (2014)

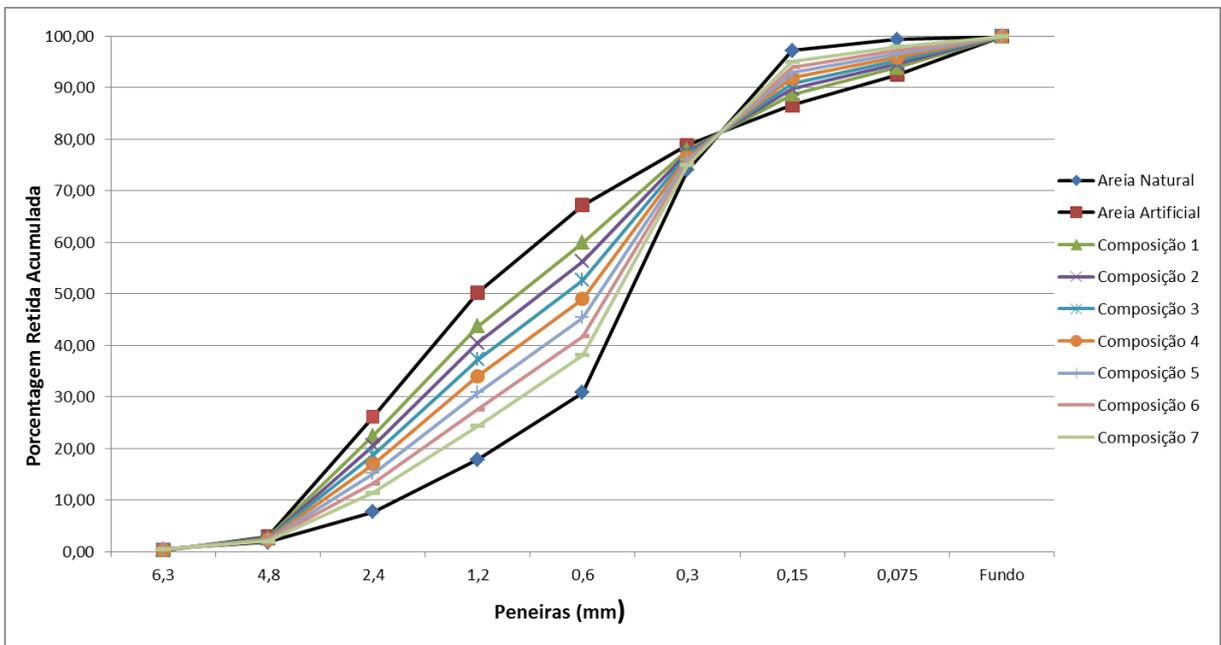
**APÊNDICE F – Composições e curvas granulométricas das mesclas das areias**

**Composições granulométricas das mesclas das areias**

Peneiras (#)	% Retida Acumulada		Porcentagens Retidas Acumuladas das Misturas das Areias Natural - Artificial						
	Natural	Artificial	20% - 80%	30% - 70%	40% - 60%	50% - 50%	60% - 40%	70% - 30%	80% - 20%
6,3	0,51	0,21	0,27	0,30	0,33	0,36	0,39	0,42	0,45
4,8	1,78	2,88	2,66	2,55	2,44	2,33	2,22	2,11	2,00
2,4	7,72	26,13	22,45	20,61	18,77	16,92	15,08	13,24	11,40
1,2	17,88	50,23	43,76	40,53	37,29	34,06	30,82	27,59	24,35
0,6	30,82	67,20	59,93	56,29	52,65	49,01	45,37	41,74	38,10
0,3	73,97	78,88	77,90	77,41	76,92	76,43	75,94	75,45	74,96
0,15	97,16	86,60	88,71	89,77	90,82	91,88	92,94	93,99	95,05
0,075	99,31	92,49	93,86	94,54	95,22	95,90	96,58	97,26	97,95
Fundo	99,93	99,91	99,91	99,91	99,92	99,92	99,92	99,92	99,92

Fonte: Autoria própria (2014)

**Curvas granulométricas das mesclas das areias**



Fonte: Autoria própria (2014)

## **APÊNDICE G – Massas específicas dos agregados**

**Massa específica da areia natural**

Amostra	Massas (g)			Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Média (g/cm <sup>3</sup> )
	Areia Natural	Frasco + Água	Frasco + Água + Areia		
1	200,00	612,53	736,67	2,636	2,640
2	195,42	612,81	734,02	2,633	
3	205,36	612,63	740,48	2,649	

Fonte: Autoria própria (2014)

**Massa específica da areia artificial**

Amostra	Massas (g)			Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Média (g/cm <sup>3</sup> )
	Areia Artificial	Frasco + Água	Frasco + Água + Areia		
1	213,34	613,48	754,65	2,956	2,942
2	211,17	613,73	752,92	2,934	
3	212,79	613,68	753,97	2,935	

Fonte: Autoria própria (2014)

**Massa específica da brita**

Amostra	Massa (g)	Volume Inicial (cm <sup>3</sup> )	Volume Final (cm <sup>3</sup> )	Massa Esp. (g/cm <sup>3</sup> )	Média (g/cm <sup>3</sup> )
1	202,25	300,0	372,0	2,809	2,802
2	205,02	300,0	375,0	2,734	
3	200,47	300,0	370,0	2,864	

Fonte: Autoria própria (2014)

## **APÊNDICE H – Massas unitárias dos agregados**

**Massa unitária areia natural**

<b>Amostra</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa Unit. (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Média (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>1</b>	4376,5	2769,5	1,580	1,579
<b>2</b>	4374,5	2769,5	1,580	
<b>3</b>	4369,5	2769,5	1,578	

**Fonte: Autoria própria (2014)**

**Massa unitária areia artificial**

<b>Amostra</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa Unit. (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Média (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>1</b>	5190,5	2769,5	1,874	1,870
<b>2</b>	5178,0	2769,5	1,870	
<b>3</b>	5169,5	2769,5	1,867	

**Fonte: Autoria própria (2014)**

**Massa unitária da brita**

<b>Amostra</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa Unit. (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Média (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>1</b>	4336,0	2769,5	1,566	1,565
<b>2</b>	4320,5	2769,5	1,560	
<b>3</b>	4344,5	2769,5	1,569	

**Fonte: Autoria própria (2014)**

## **APÊNDICE I – Teor de material pulverulento dos agregados**

**Material pulverulento areia natural**

<b>Amostra</b>	<b>Massa Inicial (g)</b>	<b>Massa Final (g)</b>	<b>% Finos</b>	<b>% Média de Finos</b>
<b>1</b>	500	496,32	0,736	0,80
<b>2</b>	500	495,68	0,864	

**Fonte: Autoria própria (2014)**

**Material pulverulento areia artificial**

<b>Amostra</b>	<b>Massa Inicial (g)</b>	<b>Massa Final (g)</b>	<b>% Finos</b>	<b>% Média de Finos</b>
<b>1</b>	500	454,12	9,176	9,45
<b>2</b>	500	451,36	9,728	

**Fonte: Autoria própria (2014)**

**Material pulverulento brita**

<b>Amostra</b>	<b>Massa Inicial (g)</b>	<b>Massa Final (g)</b>	<b>% Finos</b>	<b>% Média de Finos</b>
<b>1</b>	3054,0	3026,0	0,917	0,93
<b>2</b>	3052,0	3023,5	0,934	

**Fonte: Autoria própria (2014)**

## **APÊNDICE J – Estudo em pasta de cimento**

**Espalhamento e tempo de escoamento das pastas de cimento**

Ensaio	Teor de Aditivo (%)	Tempo de Escoamento (s)	Espalhamento (mm)		
			A	B	Média
1	0,00	—	140,0	135,0	137,5
2	0,05	144,0	195,0	193,0	194,0
3	0,10	16,0	267,0	265,0	266,0
4	0,15	11,0	368,0	368,0	368,0
5	0,20	7,0	443,0	438,0	440,5
6	0,25	6,0	517,0	520,0	518,5

Fonte: Autoria própria (2014)

## **APÊNDICE K – Estudo em argamassa**

**Espalhamento das argamassas – Primeiro ensaio**

Ensaio	Teor de Aditivo (%)	Espalhamento (mm)		
		A	B	Média
1	0,20	110,0	120,0	115,00
2	0,25	135,0	130,0	132,5
3	0,35	280,0	285,0	282,5
4	0,45	365,0	370,0	367,5
5	0,55	425,0	413,0	419,00
6	0,60	430,0	425,0	427,5

Fonte: Autoria própria (2014)

**Espalhamento das argamassas – Segundo ensaio**

Ensaio	Teor de Aditivo (%)	Espalhamento (mm)					
		Tec-Flow 7030			Glenium 3400 NV		
		A	B	Média	A	B	Média
1	0,60	27,0	27,5	27,3	37,0	37,5	37,3
2	0,65	33,5	34,0	33,8	38,0	38,0	38,0
3	0,70	36,5	36,5	36,5	42,0	42,5	42,3

Fonte: Autoria própria (2014)

**APÊNDICE L – Massa específica do CAA produzido em laboratório**

**Massa específica aparente do CAA no estado fresco**

<b>Corpo de Prova</b>	<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Tara do Molde (g)</b>	<b>Massa Total (g)</b>	<b>Massa de Concreto (g)</b>	<b>Massa Específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>
1	1570,0	2863,0	6877,5	4014,5	2,557
2	1570,0	2845,0	6759,5	3914,5	2,493
3	1570,0	2870,0	6858,5	3988,5	2,540
4	1570,0	2871,0	6901,5	4030,5	2,567
5	1570,0	2869,0	6844,0	3975,0	2,532
6	1570,0	2870,0	6906,0	4036,0	2,571
7	1570,0	2845,0	6781,5	3936,5	2,507
8	1570,0	2844,0	6760,5	3916,5	2,495
9	1570,0	2845,0	6738,5	3893,5	2,480
10	1570,0	2871,0	6951,5	4080,5	2,599
11	1570,0	2863,0	6767,5	3904,5	2,487
12	1570,0	2870,0	6915,0	4045,0	2,576
<b>MÉDIA</b>					<b>2,534</b>

**Fonte: Autoria própria (2014)**

**APÊNDICE M – Resistências à compressão do CAA produzido em laboratório**

## Resistência à compressão do CAA aos 7 dias

CORPO DE PROVA	CARGA (tf)	RESISTÊNCIA (MPa)	DESVIO PADRÃO (MPa)	COEF. DE VARIAÇÃO (%)
5	40,0	50,93	8,08	16,06
6	44,0	56,02		
7	29,0	36,92		
8	45,0	57,30		
<b>RESISTÊNCIA MÉDIA</b>		<b>50,29</b>		

Fonte: Autoria própria (2014)

## Resistência à compressão do CAA aos 28 dias

CORPO DE PROVA	CARGA (tf)	RESISTÊNCIA (MPa)	DESVIO PADRÃO (MPa)	COEF. DE VARIAÇÃO (%)
9	60,0	76,39	2,40	3,01
11	64,0	81,49		
12	64,0	81,49		
<b>RESISTÊNCIA MÉDIA</b>		<b>79,79</b>		

Fonte: Autoria própria (2014)

## Resistência à compressão do CAA às 24 horas

CORPO DE PROVA	CARGA (tf)	RESISTÊNCIA (MPa)	DESVIO PADRÃO (MPa)	COEF. DE VARIAÇÃO (%)
1	23,0	29,28	0,55	1,95
2	22,0	28,01		
3	22,0	28,01		
4	22,0	28,01		
<b>RESISTÊNCIA MÉDIA</b>		<b>28,33</b>		

Fonte: Autoria própria (2014)

**APÊNDICE N – Resistência à compressão do CAA produzido da indústria de pré-fabricados**

**Resistência à compressão do CAA às 24 horas**

<b>CORPO DE PROVA</b>	<b>CARGA (tf)</b>	<b>RESISTÊNCIA (MPa)</b>	<b>DESVIO PADRÃO (MPa)</b>	<b>COEF. DE VARIAÇÃO (%)</b>
1	13,2	16,81	0,60	3,49
2	13,4	17,06		
3	14,4	18,33		
4	13,3	16,93		
5	13,1	16,68		
<b>RESISTÊNCIA MÉDIA</b>		<b>17,16</b>		

**Fonte: Autoria própria (2014)**