

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
COECI – COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ANA CLAUDIA BERGMANN**

**COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO  
DE DOIS TRAÇOS DE CONCRETO: CONVENCIONAL E  
AUTOADENSÁVEL**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**TOLEDO**

**2016**

**ANA CLAUDIA BERGMANN**

**COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO  
DE DOIS TRAÇOS DE CONCRETO: CONVENCIONAL E  
AUTOADENSÁVEL**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito parcial à  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Civil da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Savaris

**TOLEDO**

**2016**



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Câmpus Toledo  
Coordenação do Curso de Engenharia Civil



---

---

## TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de Nº 35

### **Comparação das propriedades no estado endurecido de dois traços de concreto: convencional e autoadensável**

por

**Ana Claudia Bergmann**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 10:20 h do dia **10 de Novembro de 2016** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

---

Profª Dra Lucia Bressiani  
(UTFPR – TD)

---

Prof Me. Carlos Eduardo Tino Balestra  
(UTFPR – TD)

---

Prof Dr. Gustavo Savaris  
(UTFPR – TD)  
Orientador

---

Visto da Coordenação  
Profª Me. Silvana da Silva  
Coordenadora da COECI

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

## **AGRADECIMENTOS**

Em especial agradeço ao meu companheiro, Guilherme Leme, pela ajuda, apoio, compreensão e carinho. Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento aos meus pais Clarice e Luiz C. Bergmann e aos meus irmãos Izabella e Luiz E. M. Bergmann, pois deles recebi estímulos para buscar minha vitória e conquistar meu sonho.

Certamente agradeço à dedicação e orientação do Professor Dr. Gustavo Savaris para o desenvolvimento deste trabalho, o qual não mediu esforços para me auxiliar.

Agradeço aos Professores da banca examinadora, Dr<sup>a</sup>. Lúcia Bressiani e Me. Carlos Eduardo Tino Balestra pela atenção e contribuição a este estudo.

No geral, agradeço a Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Toledo, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram este momento.

Aos amigos agradeço a compreensão pelos momentos de ausência, suporte fornecido, e vibrações com a evolução de cada passo desta batalha.

Aos colegas de trabalho, sou grata pela experiência compartilhada.

Enfim, acredito que nenhuma batalha é vencida sozinha, então gostaria de agradecer a todos os envolvidos no desenvolvimento deste trabalho, direta ou indiretamente, e as pessoas que fizeram parte desta fase importante de minha vida.

*"A verdadeira viagem de descobrimento  
não consiste em procurar novas paisagens,  
mas em ter novos olhos".*

*(Marcel Proust)*

## RESUMO

BERGMANN, Ana C. **Comparação das propriedades no estado endurecido de dois traços de concreto: convencional e autoadensável.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo. 2016.

Entende-se a importância da contínua melhoria no setor da construção civil, com o intuito de aumentar a qualidade de peças estruturais de concreto armado e resolver problemas relacionados à disponibilidade de mão-de-obra nos canteiros, destaca-se o concreto com características autoadensáveis desenvolvido no Japão em meados da década de 80. Apresentando três características essenciais: capacidade de preenchimento, habilidade passante e resistência à segregação, este concreto apresenta uma série de vantagens como a redução da quantidade de mão de obra na construção, o aumento da qualidade de peças, a facilidade e rapidez de lançamento. Contudo, para obtenção de suas características essenciais, um fator é imprescindível: a utilização de materiais finos. Esses materiais, chamados de adições, controlam os efeitos negativos de segregação e exsudação que o concreto fluído é suscetível a apresentar. Além disso, destaca-se a importância do controle ao desenvolver e aplicar novos materiais, entendendo suas características e aplicações adequadas. Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo comparar as propriedades de um concreto autoadensável com concreto convencional em seu estado endurecido. Dessa forma, desenvolve-se um concreto autoadensável com materiais disponíveis na região de Toledo-PR e utilização de cinza volante como material fino. Este concreto fluído serve como base para a obtenção de dois traços de concreto convencional, sendo, enfim, os três traços passíveis de comparação. Por fim, fica evidente que, nos parâmetros de resistência à compressão axial, resistência à tração e módulo de elasticidade o concreto autoadensável apresenta melhor desempenho perante aos demais concretos. Uma vez que, sua quantidade de vazios e absorção são reduzidos. Ao final, compara-se a microestrutura do concreto por meio de ensaios de microscopia eletrônica de varredura, analisando os três concretos atendidos neste trabalho.

Palavras chave: Concreto autoadensável. Materiais de construção civil. Propriedades mecânicas.

## ABSTRACT

BERGMANN, Ana C. **Comparison between the solid state properties of two concrete traces: conventional and self-compacting.** Undergraduate Thesis (Bachelor in Civil Engineering) – Federal University of Technology – Paraná. Toledo. 2016.

The importance of the continuous improvement of the civil construction sector, objectifying the increase of the quality of the reinforced concrete structural elements and solving the problems related to the availability of work force on the building sites, highlighting the concrete with self-compacting characteristics, developed in Japan, in the mid 80's. Presenting three essential characteristics: flowability, passing ability and segregation resistance, this concrete presents a series of advantages, like the amount of used work force, the increase of quality of the structural elements, the easiness and launching rapidity. However, to achieve these characteristics, one factor is indispensable: the use of fines. These materials, called additions, control the negative effects of segregation and bleeding that are susceptible to appear on the fluid state of concrete. Additionally, the control of the creation and application of new materials are important factors, helping to understand its characteristics and suitable applications. In that context, the present paper objectifies the comparison of the properties of a self-compacting concrete with a conventional concrete, in their solid state. Therefore, a self-compacting concrete is developed making use of materials available on the region of the city of Toledo-PR and using fly ash as the powder. This fluid concrete is used as a base to obtain two conventional concrete traces, finally being subjects of comparison. Thus, it is evident that the self-compacting concrete performs better than the other concrete subjects, mainly on the parameters of tensile strength, compressive strength and elasticity module, once its number of holes and absorption ratio are reduced. Lastly, the microstructure of the concretes are compared, making use of scanning electron microscopy to analyze the three concretes produced in this paper.

Key-words: Self-compacting concrete. Construction materials. Solid state properties of concrete.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Razões para a necessidade do concreto autoadensável .....	18
Figura 2 – Ponte Shin-kiba Ohashi.....	19
Figura 3 – Concretagem de parede antirradiação em São Bernardo do Campo (SP) .....	20
Figura 4 – Propriedades do CAA para vários tipos de aplicação Fonte: Walraven (2003) apud EFNARC (2005), adaptado. ....	24
Figura 5 – Comparação da proporção de materiais entre o CAA e CCV .....	26
Figura 6 – Relação entre tamanho e formato do agregado miúdo com tensão de compressão e tensão de cisalhamento .....	28
Figura 7 – Fluxograma para a dosagem do concreto autoadensável.....	33
Figura 8 – Parâmetros de composição dos concretos estudados .....	35
Figura 9 – Fluxograma de obtenção dos CAA, CCV-C e CCV-S .....	37
Figura 10 – Curva granulométrica – Brita 0.....	39
Figura 11 – Curva granulométrica – Areia Natural .....	39
Figura 12 – Difractometria de Raios-X da amostra de cinza volante .....	41
Figura 13 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) da amostra de cinza volante .....	42
Figura 14 – Ilustração do Cone de Marsh e curva de saturação do aditivo.....	44
Figura 15 – Ilustração do mini-slump .....	44
Figura 16 – Esqueleto granulométrico dos agregados graúdo e miúdo. ....	48
Figura 17 – Curva de saturação do aditivo.....	49
Figura 18 – Espalhamento obtido através do mini-slump.....	51
Figura 19 – Ensaio realizado no CAA.....	55
Figura 20 – CCV-C com 10 mm de abatimento.....	55
Figura 21 – Aparência dos corpos-de-prova obtidos.....	56
Figura 22 – Problemas de adensamento observados no CCV-C.....	57
Figura 23 – Evolução da resistência à compressão axial dos concretos ensaiados .	59
Figura 24 – Evolução da resistência à compressão axial dos concretos ensaiados .	60
Figura 25 – MEV do CAA aumentado em 500 e 1000 vezes .....	65
Figura 26 – MEV do CAA aumentado em 500 e 1000 vezes .....	66
Figura 27 – MEV do CCV-C aumentado em 500 e 1000 vezes .....	67
Figura 28 – MEV do CCV-C aumentado em 1000 vezes .....	68
Figura 29 – MEV do CCV-S aumentado em 500 e 1000 vezes .....	68
Figura 30 – MEV do CCV-S aumentado em 500 e 1000 vezes .....	69



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classes do CAA no Estado Fresco .....	23
Quadro 2 – Parâmetros e Características do CAA no Estado Endurecido.....	25
Quadro 3 – Especificações da cinza volante em relação à NBR 12653 (ABNT, 2014) .....	40
Quadro 4 – Comparação estatística entre os concretos pelo método de Tukey- Kramer.....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dado de espalhamento obtido através do mini-slump .....	50
Tabela 2 – Traço do CAA obtido pelo método de Gomes, Gettu e Agulló.....	52
Tabela 3 – Traço do CAA corrigido .....	52
Tabela 4 – Traço do CCV-C .....	53
Tabela 5 – Traço do CCV-S .....	53
Tabela 6 – Trabalhabilidade do CAA.....	54
Tabela 7 – Massa específica dos concretos analisados no estado fresco .....	56
Tabela 8 – Resistência à compressão axial (continua) .....	57
Tabela 9 – Análise de variância: fator único.....	59
Tabela 10 – Resistência à tração aos 28 dias .....	61
Tabela 11 – Comparação dos valores reais com os valores estimados para resistência à tração aos 28 dias .....	62
Tabela 12 – Módulo de elasticidade aos 28 dias.....	62
Tabela 13 – Comparação dos valores reais com os valores estimados para o módulo de elasticidade aos 28 dias .....	63
Tabela 14 – Índices de absorção de água e vazios dos concretos no estado endurecido.....	64
Tabela 15 – Massa específica dos concretos analisados no estado endurecido .....	64

## **LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS**

### **LISTA DE ABREVIATURAS**

a/c	Relação água/cimento
sp/c	Relação superplastificante/cimento
f/c	Relação finos/cimento
MPa	Mega Pascal ( $10^6$ )
GPa	Giga Pascal ( $10^9$ )

### **LISTA DE SIGLAS**

EFNARC	European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Técnica Brasileira
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura

### **LISTA DE ACRÔNIMOS**

CAA	Concreto autoadensável
CCV	Concreto convencional
CCV-C	Concreto convencional com adição de cinza volante
CCV-S	Concreto convencional sem adição de cinza volante

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1 OBJETIVOS.....	15
1.1.1 Objetivo Geral.....	15
1.1.2 Objetivos Específicos.....	15
1.2 JUSTIFICATIVA.....	16
1.3 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	17
<b>2 CONCRETO AUTOADENSÁVEL</b> .....	<b>18</b>
2.1 HISTÓRICO E APLICAÇÕES.....	18
2.2 DEFINIÇÃO E CARACTERÍSTICAS.....	20
2.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS.....	21
2.4 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO.....	22
2.4.1 Trabalhabilidade do concreto.....	23
2.5 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO.....	24
2.6 COMPONENTES.....	25
2.6.1 Cimento.....	26
2.6.2 Agregados.....	27
2.6.3 Agregado graúdo.....	27
2.6.4 Agregado miúdo.....	28
2.6.5 Adições minerais.....	29
2.6.6 Aditivos.....	30
2.6.7 Água.....	31
2.7 MÉTODOS DE DOSAGEM DO CAA.....	31
2.7.1 MÉTODO DE DOSAGEM DE GOMES, GETTU E AGULLÓ (GOMES, 2002) 31	
2.8 HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO DE TRAÇOS DE CAA.....	34
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>37</b>
3.1 SELEÇÃO DOS MATERIAIS.....	38
3.1.1 Cimento.....	38
3.1.2 Agregados.....	38
3.1.3 Adições.....	40
3.1.4 Aditivos.....	42
3.2 ENSAIOS EM PASTA.....	42
3.3 ESQUELETO GRANULAR.....	45
3.4 COMPOSIÇÃO DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL.....	45
3.5 OBTENÇÃO DO CONCRETO CONVENCIONAL.....	46
3.6 ENSAIOS DO CONCRETO.....	47
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>48</b>
4.2.1 Curva de Saturação do Aditivo.....	49
4.2.2 Espalhamento da pasta.....	50

4.3.1 Concreto Autoadensável (CAA) .....	52
4.3.2 Concreto Convencional com Cinza Volante (CCV-C) .....	53
4.3.3 Concreto Convencional sem Cinza Volante (CCV-S) .....	53
4.4.1 Propriedades no Estado Fresco.....	54
4.4.1.1 Trabalhabilidade.....	54
4.4.2 Massa específica no estado fresco.....	56
4.4.3 Propriedades no Estado Endurecido .....	56
4.4.4 Resistência à compressão axial.....	57
4.4.5 Tração por compressão diametral .....	61
4.4.6 Módulo de elasticidade .....	62
4.4.7 Absorção e Índice de Vazios.....	63
4.4.8 Massa específica no estado endurecido .....	64
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>70</b>
<b>6 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>71</b>
<b>ANEXO I – TABELA COM CARACTERÍSTICAS DOS CONCRETOS ANALISADOS POR DOMONE (2005) .....</b>	<b>75</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A partir de seu desenvolvimento no Japão, na década de 80, o concreto autoadensável (CAA) possibilitou a solução de um dos problemas enfrentados na época e que repercutem até aos dias atuais, no Brasil: a falta de mão de obra qualificada nos canteiros de obra. Paralelamente, a busca por estruturas mais duráveis e resistentes se intensificou, tornando essencial seguir a técnica apropriada para a construção de cada elemento estrutural em uma edificação.

O concreto desenvolvido propôs a criação de uma mistura capaz de fluir sob a ação de seu próprio peso, de modo a dispensar a etapa de vibração ou compactação presente no processo de execução do concreto convencional (CCV) (OKAMURA, 1997). Com isso, a eficiência nas atividades relacionadas à concretagem de uma peça estrutural se torna mais satisfatória, uma vez que a utilização do CAA está relacionada à sua facilidade de aplicação, reduzindo os esforços durante as fases de lançamento, espalhamento e adensamento da mistura.

É essencial garantir ao concreto as seguintes características para que o mesmo seja classificado como autoadensável: capacidade de preenchimento, habilidade passante e resistência à segregação (EFNARC, 2005). Contudo, para que se obtenha uma mistura com as características mencionadas, faz-se da utilização de adições minerais e aditivos superplastificantes ou modificadores de viscosidade, além dos materiais já utilizados no CCV.

O uso de adições minerais promove tanto benefício técnico quanto ambiental, pois, normalmente, são resíduos provenientes de atividades industriais. O benefício técnico se refere à minimização dos efeitos negativos de segregação e exsudação do concreto, enquanto o ambiental está relacionado a uma forma adequada de reaproveitamento destes materiais. Um exemplo de adição mineral é a cinza volante, originada da queima do carvão mineral em termoelétricas (MALHOTRA; MEHTA, 1996).

No Brasil, os parâmetros para a caracterização de um concreto como autoadensável são definidos por ensaios normatizados pela NBR 15283 (ABNT, 2010), a qual propõe os ensaios de espalhamento pelo método do cone de *Abrams*, do tempo de escoamento  $T_{500}$  e do funil V, afim de avaliar a fluidez e a viscosidade

plástica; anel J ou método da caixa L para garantir a habilidade passante do concreto; e, a coluna de segregação para medir a segregação da composição.

Neste sentido, com a intenção de avaliar o desempenho do concreto, o presente trabalho compara um traço de um CAA, dosado pelo método de Gomes (GOMES, 2002), com a utilização da adição mineral de cinza volante, com dois traços de CCV com mesmos materiais. A comparação foi realizada pela análise das propriedades no estado endurecido de corpos-de-prova dos concretos obtidos, através de ensaios de módulo de elasticidade, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e absorção.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Comparar as propriedades mecânicas do estado endurecido entre um traço de concreto autoadensável com dois traços de concreto convencional desenvolvidos com os mesmos materiais.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a influência da adição mineral no controle de exsudação e da segregação do CAA.
- Avaliar a influência da adição de superplastificante e da cinza volante no tempo de escoamento e no espalhamento da pasta utilizada para o concreto autoadensável.
- Comparar a microestrutura entre os traços de concreto autoadensável e de concreto convencional por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

- Comparar as propriedades mecânicas: resistência à compressão, resistência à tração diametral, módulo de elasticidade e absorção dos concretos desenvolvidos.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Tendo em vista o histórico da construção civil, verifica-se a busca por estruturas cada vez mais duráveis. É neste cenário que se enquadra a intensa utilização de estruturas de concreto. Assim, nota-se a importância em desenvolver novas composições e buscar diferentes componentes para a obtenção deste material.

Considerando as questões supra-apresentadas e com o intuito de prover uma destinação adequada para resíduos finos gerados em determinadas atividades, investe-se no reaproveitamento dos mesmos em misturas de concreto, com o objetivo de beneficiamento econômico e ambiental. São exemplos destes resíduos: a cinza volante, o filer calcário, o pó de mármore, a escória de alto forno, o filer cerâmico, entre outros.

Ao mesmo tempo em que as buscas para a destinação de resíduos gerados em várias áreas ganham espaço na esfera da construção civil, continua-se o desenvolvimento de componentes nela já existentes, como é o caso do concreto autoadensável, o qual pode apresentar problemas relacionados à exsudação e à segregação, que são suavizados com a adição de materiais com propriedades finas.

Dessa forma, unem-se as questões apresentadas e parte-se para o estudo da influência que estes materiais podem causar nesta categoria de concreto, de modo a justificar a elaboração do presente trabalho.

Ademais, justifica-se o presente trabalho pela necessidade de estudar as propriedades do CAA com a adição de cinza volante, e comparar essas propriedades com um produto que já se tem conhecimento, o CCV.



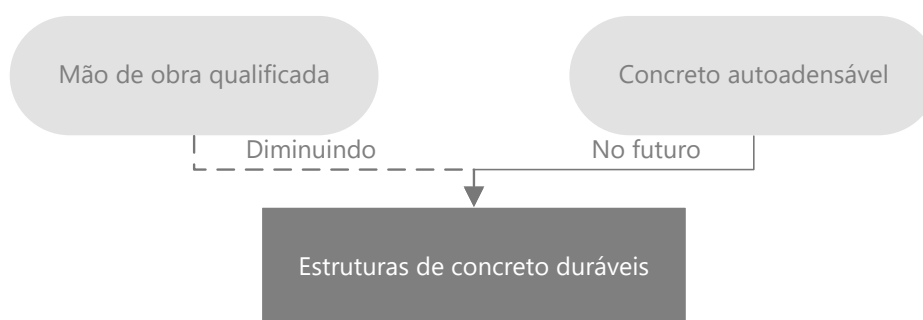
### 1.3 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

O presente trabalho compreende o desenvolvimento de um traço de concreto autoadensável por meio do método de Gomes (GOMES, 2002) e dois traços de concreto convencional por meio da modificação da composição do CAA obtido. Os traços de concreto são elaborados com materiais disponíveis na região oeste do Paraná, mais especificamente no município de Toledo/PR. Após obtenção dos traços mencionados, compara-se as características tanto no estado fresco quanto no estado endurecido dos concretos.

## 2 CONCRETO AUTOADENSÁVEL

### 2.1 HISTÓRICO E APLICAÇÕES

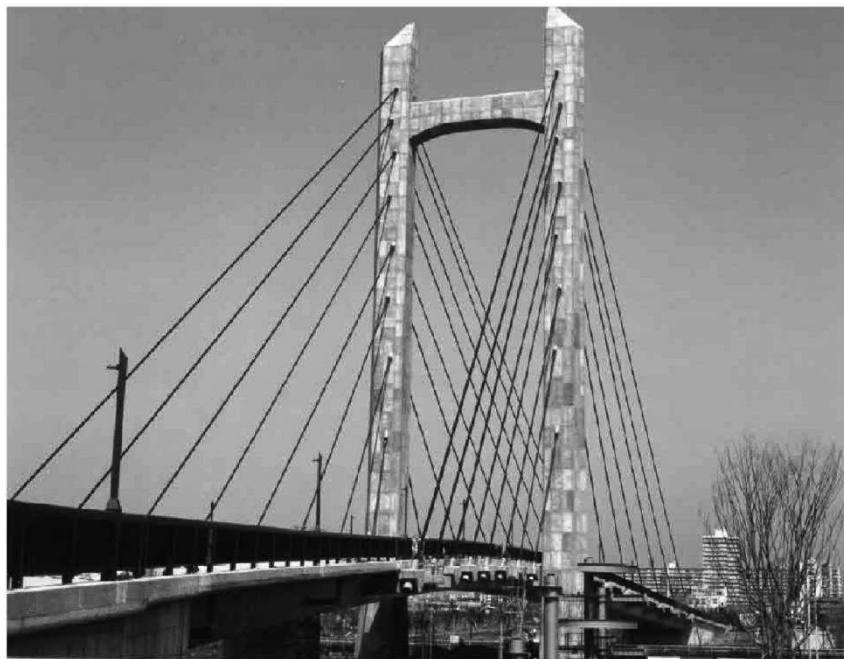
No ano de 1983, o Japão deparou-se com o seguinte cenário: redução significativa de mão de obra qualificada nos canteiros e necessidade de melhorar a durabilidade das estruturas de concreto. Esse cenário direcionou as pesquisas para desenvolver um concreto que tivesse menores vazios internos, aumentando sua durabilidade, e que utilizasse um número reduzido de mão de obra; o que resultou em um concreto autoadensável. A Figura 1 ilustra a sequência descrita até resultar no CAA (OKAMURA; OUCHI, 2003).



**Figura 1 – Razões para a necessidade do concreto autoadensável**  
 Fonte: Okamura et. al. (2000), adaptado.

Okamura e Ouchi (2003) afirmam que as utilizações primordiais de CAA foram no ano de 1988, no Japão, com um protótipo desenvolvido com os materiais já existentes no mercado e nomeado, inicialmente, de “Concreto de Alto Desempenho”. Contudo, o nome inicial de concreto de alto desempenho passou a indicar concretos com alta durabilidade e o concreto desenvolvido com a capacidade de se espalhar com o próprio peso passou a ser chamado de autoadensável.

Após a apresentação do protótipo do CAA, diversas pesquisas foram desenvolvidas no mundo, afim de estudá-lo e aprimorá-lo. Okamura e Ouchi (2003) alegam que a primeira utilização do CAA se deu no ano de 1990, em uma edificação no Japão, e em 1991, fora utilizado nas torres da Ponte Estaiada Shin-kiba Ohashi (Figura 2).

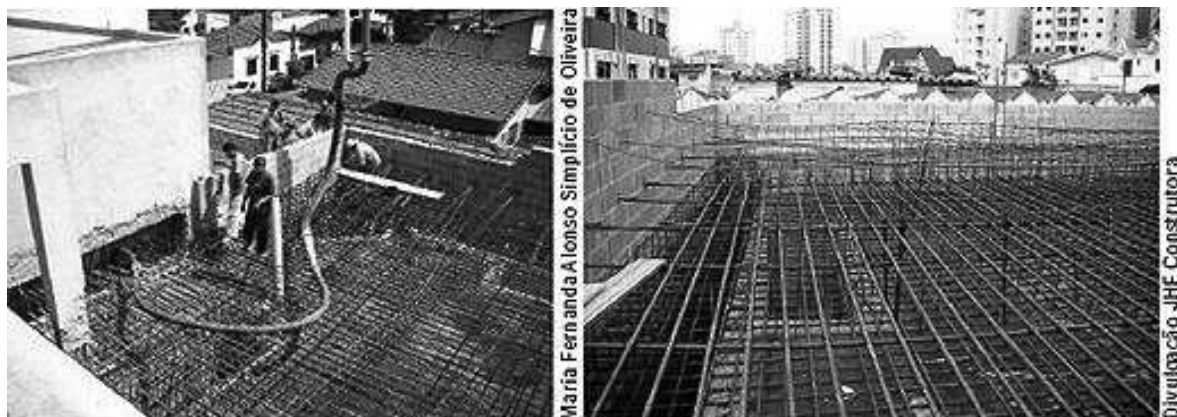


**Figura 2 – Ponte Shin-kiba Ohashi**  
**Fonte: Okamura e Ouchi (2003).**

A partir de então, o concreto autoadensável está presente em diversos países, sendo frequentemente utilizado. Kraus (2006) afirma que, no Brasil, o uso e estudo do CAA já são empregados em várias localidades, sendo, segundo a Revista Técnica (2008), amplamente utilizado por construtoras, em conjunto com concreteiras, para execução de grandes estruturas; para concretagem simultânea de pilares, vigas e lajes; para reforços estruturais em edifícios antigos; em estruturas mistas metálicas e de concreto, e, em paredes antirradiação (Figura 3).

De mais a mais, Tutikian e Dal Molin (2015) afirmam que grandes empresas brasileiras da indústria de estruturas pré-moldadas estão aderindo o CAA e dispensando a utilização de CCV em sua produção. Uma vez que os materiais e equipamentos são mantidos os mesmos, observam-se mudanças nas técnicas de execução, mais evidentemente na fase de adensamento. Os autores relatam que após a mudança, uma das empresas atingiu aos seus objetivos de melhorar o acabamento final das peças, reduzindo a quantidade de mão de obra bem como seus custos.

Cabe mencionar que não há restrição do uso de CAA em relação ao CCV, sendo que, segundo Kraus (2006), o mesmo pode ser aplicado em: edifícios, pontes, pré-fabricados, barragens, túneis, pontes, tanques, CAA na forma de alta resistência, CAA na forma de concreto leve, entre outras.



**Figura 3 – Concretagem de parede antirradiação em São Bernardo do Campo (SP)**  
**Fonte: Revista Técnica (2008).**

## 2.2 DEFINIÇÃO E CARACTERÍSTICAS

Okamura (1997), um dos precursores do concreto autoadensável, o define como um concreto que possui condições de se moldar, preencher formas e passar por armaduras devido à sua capacidade de fluir sob a ação de seu próprio peso, dispensando a etapa de vibração ou compactação.

Dessa maneira, a *European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems* – EFNARC (2005) estabelece que um concreto pode ser classificado como autoadensável quando o mesmo apresentar três características fundamentais: capacidade de preenchimento, habilidade passante e resistência à segregação.

Tutikian e Dal Molin (2015) esclarecem que a capacidade de preenchimento se resume na facilidade de o concreto fluir na fôrma de modo a ocupar todos os seus espaços. Já a habilidade passante está relacionada com a capacidade de o concreto escoar na fôrma de modo a passar por entre as armaduras sem impedimentos ou causando segregação. Por último, que a resistência à segregação se refere à coesão do material, ou seja, à capacidade do material de se manter conexo independente do caminho percorrido.

Sendo assim, Perius (2009) cita que são empregadas elevadas quantidades de materiais finos na obtenção do CAA para garantir seus parâmetros reológicos, em outras palavras, para que os fenômenos de segregação e exsudação do concreto possam ser controlados.

Em suma, o CAA no estado fresco apresenta característica autoadensável, o qual, nas primeiras idades é livre de defeitos e no estado endurecido oferece proteção contra os fatores externos (OKAMURA; OUCHI, 2003).

## 2.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS

De acordo com Domone (2005), elevaram-se consideravelmente a quantidade de publicações acerca do entendimento do CAA durante as últimas duas décadas, dentre as principais razões se destacam benefícios econômicos e técnicos. À vista disso, Tutikian e Dal Molin (2015) listam as vantagens observadas pela utilização do CAA como:

- Redução do tempo de construção em virtude da facilidade e rapidez do lançamento do concreto, sem necessidade de adensamento;
- Redução da mão de obra na construção, uma vez que as fases de espalhamento e nivelamento do concreto são pouco trabalhosas ou inexistentes;
- Superfícies com acabamentos melhores;
- Maior durabilidade da estrutura, visto que falhas de concretagem e formação de vazios são reduzidas;
- Não há limitação com relação aos formatos e dimensões: curvas, esbeltas, altas taxas de armaduras;
- Reutilização de materiais provenientes de resíduos industriais como cinza volante, escória de alto forno, pó de granito, fíler cerâmico, fíler calcário;
- Redução de ruídos, posto que o uso do vibrador é dispensável.

Por outro lado, baseado nas características do CAA, Kraus (2006) aponta algumas desvantagens relacionadas ao uso e a aplicação do concreto em estudo:

- Garantir maior estanqueidade das fôrmas para o concreto não passar por eventuais orifícios e ser perdido devido à sua facilidade de adensamento;
- Controle tecnológico mais elaborado e minucioso;

- Dificuldades na rastreabilidade do CAA, uma vez que sua característica de autopreenchimento é capaz de promover seu espalhamento em várias direções, podendo se misturar ou atingir vários elementos estruturais, não sendo possível monitorar totalmente seu caminho, o que resulta no desconhecimento do mapeamento do concreto empregado para eventuais análises em seu estado endurecido;
- Maior probabilidade de ocorrência de retração e fissuração devido ao alto teor de aglomerante presente na quantidade de finos do traço do concreto.

Sob o mesmo ponto de vista, Lisbôa (2004) afirma que uma desvantagem de utilização do CAA é referente ao cuidado requerido em sua aplicação e transporte, devido à tendência de segregação do componente.

Após analisar os quesitos técnicos e econômicos, Nunes (2001) conclui que embora o custo da produção do CAA seja inicialmente alto, devido à sua concentração de finos, estes são compensados por meio da redução de mão de obra e do período de construção e pela economia de energia elétrica em função da dispensa da vibração do concreto.

Por fim, além dos benefícios mencionados, a redução de mão de obra acarreta em um ambiente de trabalho mais seguro e que há maior flexibilidade em termos de projeto no âmbito de disposição de armaduras, as quais podem apresentar altas densidades em função da utilização do CAA (NUNES, 2001).

## 2.4 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

De acordo com Perius (2009), o CAA difere do CCV nas seguintes características de estado fresco: alta deformabilidade, alta resistência à segregação e resistência à exsudação, paralelamente, a trabalhabilidade do CAA que é uma característica inerente desta categoria de concreto.

Entende-se por exsudação, o afloramento de água na superfície do concreto após seu lançamento e adensamento, característica esta que se destaca principalmente em misturas altamente fluidas. O efeito de segregação se refere à separação dos componentes do concreto, o qual é identificado principalmente nos processos de transporte e lançamento do CAA (PERIUS, 2009).

Tutikian e Dal Molin (2015) afirmam que as características de resistência à segregação são as responsáveis por manter o concreto coeso e que a resistência à exsudação garante melhor aderência do concreto com as barras de aço. Dessa forma, os materiais finos, como as adições, são utilizados afim de minimizar os efeitos da exsudação. Já para minimizar os efeitos de segregação, devem ser analisadas as propriedades dos esqueletos granulométricos da mistura e garantir um teor de pasta de cimento adequado: fluido e estável.

#### 2.4.1 Trabalhabilidade do concreto

A ABNT, por meio da NBR 15823 (ABNT, 2010) avalia e estabelece parâmetros para a fluidez, viscosidade plástica, habilidade passante e resistência à segregação do CAA por meio de ensaios padronizados. A fluidez e a viscosidade plástica podem ser avaliadas pelo ensaio de espalhamento,  $t_{500}$  e funil V, a habilidade passante pelo ensaio da caixa L, anel J ou caixa U e a resistência à segregação pelo ensaio de coluna de segregação.

Dessa forma, os ensaios mencionados resultam em classificações quanto aos parâmetros avaliados, conforme as classes que são apresentadas no Quadro 1.

Parâmetro	Classe
Espalhamento	SF1, SF2, SF3
Viscosidade plástica aparente – T500	VS1, VS2
Habilidade passante – Anel J	PJ1, PJ2
Habilidade passante – Caixa L	PL1, PL2
Viscosidade plástica aparente – Funil V	VF1, VF2
Resistência à segregação	SR1, SR2

**Quadro 1 – Classes do CAA no Estado Fresco**

Fonte: NBR 15823-1 (ABNT, 2010).

Em consequência, a separação por classes do CAA, A EFNARC (2005) apresenta um esquema relacionando à classe e à indicação para aplicação do concreto, o qual pode ser verificado na Figura 4.

Viscosidade				Resistência à segregação/ habilidade passante
VS 2 VF 2	Rampas			Habilidade passante SF 1 & 2
VS 1 or 2 VF 1 or 2 ou valor específico.		Paredes e pilares	Estruturas altas e esbeltas	SR para SF3
VS 1 VF 1	Pisos e lajes			SR para SF 2&3
	SF 1	SF 2	SF 3	
	Slump-flow			

**Figura 4 – Propriedades do CAA para vários tipos de aplicação**  
**Fonte: Walraven (2003) apud EFNARC (2005), adaptado.**

## 2.5 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

As propriedades do CAA no estado endurecido podem ser sintetizadas de modo a analisarem os seguintes parâmetros: microestrutura, resistência à compressão, módulo de elasticidade, aderência e durabilidade. O resumo entre os parâmetros analisados e suas características podem ser verificados no Quadro 2 (KLUG; HOLSHEMACHER; SKARENDAHL, 2003, apud MELO, 2005).

Ademais, Perius (2009) declara que outra propriedade do CAA no estado endurecido é a maior tendência à retração do concreto, que ocorre em função da grande quantidade de finos e elevados percentual de pasta de cimento.



Parâmetro	Características
1. Microestrutura	Homogênea em função da alta quantidade de materiais finos que resultam em uma melhor distribuição granulométrica dos sólidos, no aumento de retenção de água, no favorecimento do processo de nucleação no processo de hidratação do cimento, aumento da densidade da pasta melhorando a zona de transição entre pasta e agregados.
2. Resistência à compressão	Comparado ao CCV de mesma relação água/cimento, apresenta melhores resistências. As misturas de CAA são favorecidas pela baixa relação entre água/finos e pela utilização de aditivos superplastificantes. A adição utilizada interfere no desenvolvimento de resistência à compressão do CAA.
3. Módulo de elasticidade	Sofre influência do módulo de elasticidade de cada material, contudo tende a sofrer uma redução. É bastante influenciado pelos agregados, uma vez que no CAA são utilizados em menor proporção.
4. Aderência	O parâmetro aderência não está completamente entendido. Acredita-se que pode ser melhor ou igual à do concreto convencional, podendo ser favorecida pela baixa tendência de segregação e melhor retenção de água do CAA.
5. Durabilidade	Em função homogeneidade da microestrutura, o CAA apresenta boa durabilidade. Já que o aumento da densidade da pasta dificulta a penetração de agentes agressivos

**Quadro 2 – Parâmetros e Características do CAA no Estado Endurecido**  
**Fonte: Klug, Holshemachere Skarendahl (2003) apud Melo (2005).**

## 2.6 COMPONENTES

Os materiais constituintes do concreto do CAA são os mesmos utilizados no CCV, podendo ser: cimento, agregados, adições minerais, aditivos e água. Contudo, nota-se uma diferença significativa nas quantidades de finos e aditivos plastificantes que são mais elevadas no traço do CAA (TUTIKIAN E DAL MOLIN, 2015).

Okamura e Ouchi (2003) comparam a proporção dos materiais componentes entre o CCV e o CAA protótipo apresentado em 1988. Na Figura 5 é possível verificar que a quantidade de água (W) e de agregado miúdo (S) foi mantida, enquanto a proporção de agregado graúdo (G) e fino (C ou Finos) foi divergente, sendo que a proporção de finos é consideravelmente maior no CAA.

Perius (2009) esclarece que no caso do CAA, o teor de pasta deve ser suficiente para garantir a movimentação dos agregados graúdos da mistura, os quais devem apresentar uma distribuição uniforme no tamanho dos grãos. Em vista disso, Yahia *et. al.* (2005) afirmam que o desenvolvimento do CAA se dá pela combinação entre os agregados graúdos que estão suspensos em uma argamassa fluída, sendo esta a responsável pelo ajuste reológico da mistura.

**Concreto autoadensável**

(aditivo: superplastificante)

	Água (W)	Finos (C)	Agregado Miúdo (S)	Agregado Graúdo (G)
ca				
al	W	C	S	G

**Concreto convencional**

**Figura 5 – Comparação da proporção de materiais entre o CAA e CCV**  
 Fonte: Okamura e Ouchi (2003), adaptado.

### 2.6.1 Cimento

Assim como observado no CCV, a escolha do tipo de cimento a ser utilizado no CAA dependerá majoritariamente da finalidade de aplicação do concreto. Sendo que cada cimento possui suas características em função do fabricante e classificação de adições. Além do mais, cabe verificar a sensibilidade do CAA quanto às reações entre o cimento e os demais constituintes do traço (KRAUS, 2006).

Neville (1997, apud PERIUS, 2009) afirma que o cimento adequado para confecção do CAA não deve possuir finura muito elevada e deve apresentar baixo teor de C<sub>3</sub>A (Aluminato Tricálcico). GJORV (1992, apud TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015) esclarece que teores acima de 10% de C<sub>3</sub>A podem dificultar a aplicação do CAA, devido à acelerada perda de fluidez. Ainda, o autor afirma que utilizar materiais com alta superfície específica proporciona maior contato do material com a água, resultando na proximidade e colisões frequentes das partículas, de modo a reduzir a tensão de escoamento e aumentar a viscosidade do concreto.

Em suma, Tutikian e Dal Molin (2015) afirmam que embora não tenha uma normativa para definição do cimento para CAA, o mais adequado será o cimento que apresentar menor variabilidade quanto à sua resistência à compressão.

### 2.6.2 Agregados

A EFENARC (2005) sugere que haja controle rigoroso dos agregados a serem utilizados nas misturas de CAA, de maneira a verificar características como umidade, absorção de água, curva granulométrica e variação de quantidade de finos. Além disso, a forma e o tamanho dos agregados estão diretamente relacionados à quantidade de vazios no CAA, em consequência à sua compacidade.

Para que a adensabilidade do CAA seja garantida, Melo (2005) cita a necessidade de reduzir as proporções de agregado graúdo, já que é imperativo o aumento de partículas finas. Em síntese, a autora afirma que os principais aspectos que definem a reologia do concreto são as proporções de agregado graúdo e miúdo.

### 2.6.3 Agregado graúdo

Repette (2011) sugere que os agregados graúdos utilizados para a confecção do CAA apresentem características arredondadas, uma vez que grãos lamelares necessitam de maiores quantidades de pasta, já que causam intertravamento das partículas e absorvem maiores quantidades de água.

Um estudo realizado por Domone (2005) acerca do uso de CAA conclui que em cerca de 70% dos casos analisados, a dimensão máxima de agregado graúdo está no intervalo de 16 a 20 mm, cerca de 9% dos traços utilizaram dimensões maiores, como 22, 25, 32 ou 40 mm e aproximadamente 16% utilizaram no intervalo de 10 a 15 mm.

Por fim, a EFENARC (2005) especifica diâmetros máximos de 16 a 20 mm para o agregado graúdo a ser utilizado na composição do CAA. Cabe mencionar que quanto menor o diâmetro máximo do agregado graúdo, suas proporções podem ser maiores, de modo a garantir as características de adensabilidade do concreto (MELO, 2005).

#### 2.6.4 Agregado miúdo

Tanto areias naturais quanto as areias obtidas em meios industriais são adequadas para a confecção do CAA. Contudo, devido à sua textura mais lisa e formas mais arredondadas, as areias naturais são as mais indicadas (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015).

Nagamoto (1997, apud OKAMURA; OUCHI, 2003) alega que a resistência ao cisalhamento das argamassas é influenciada pelo formato das partículas do agregado miúdo, ou seja, quanto mais angulares as partículas forem, maior será a resistência ao cisalhamento de modo a dificultar a deformabilidade do concreto. A Figura 6 ilustra as relações de resistência ao cisalhamento e resistência à compressão dos agregados miúdos em função de seus tamanhos e formatos.

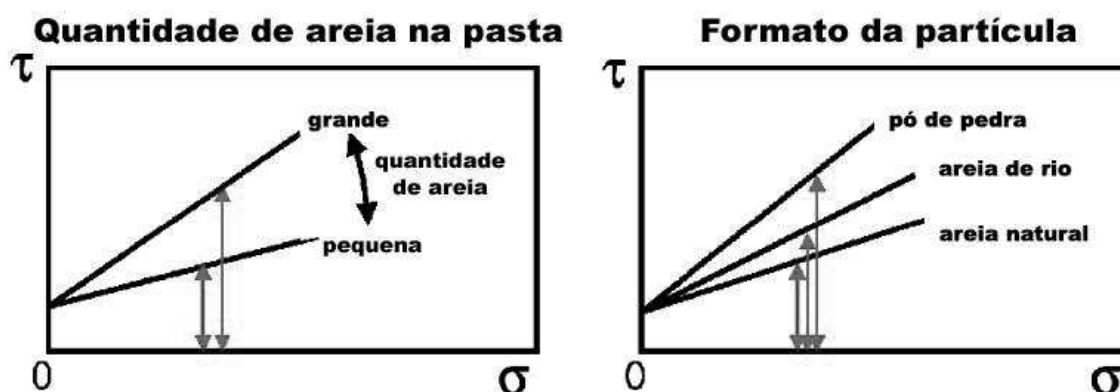


Figura 6 – Relação entre tamanho e formato do agregado miúdo com tensão de compressão e tensão de cisalhamento

Fonte: Okamura e Ouchi (2003), adaptado.

São recomendados uma boa distribuição e controle granulométrico do agregado miúdo, de modo a reduzir as fricções e colisões internas no concreto, além do conhecimento de suas propriedades como teor de umidade e absorção de água para um ajuste adequado de água no CAA (KRAUS, 2006).

Por fim, cabe citar que para efeitos de dosagem, os agregados finos com partículas menores a 0,125mm deverão ser considerados nos cálculos entre água/finos (EFNARC, 2005).

### 2.6.5 Adições minerais

Nunes (2001) define adição como um material inorgânico de característica fina, o qual garante melhorar ou adquirir propriedades ao concreto quando neste for adicionado. Essas adições podem ser classificadas em quimicamente ativas ou sem atividade química.

Malhotra e Mehta (1996) destacam os benefícios do uso de adições minerais no concreto, sendo eles: (1) econômicos, pois podem substituir uma parcela do cimento de modo a reduzir seu consumo, em consequência seu custo; (2) ambientais, já que a maioria das adições são provenientes de resíduos industriais evitando seu descarte no ambiente; (3) melhora de propriedades do CAA tanto no estado fresco, em termos de fluidez e controle da exsudação e segregação, quanto no estado endurecido, como maior resistência mecânica, permeabilidade e durabilidade em função da diminuição de poros, além de melhor resistência à fissuração térmica em função do baixo calor de hidratação.

As adições sem atividade química normalmente alteram os aspectos físicos do concreto relacionados ao empacotamento granulométrico da mistura. No geral, o fíler é classificado como um material sem atividade química, os quais substituem o agregado miúdo na mistura de modo a melhorar sua compactação e coesão. Os fileres podem ser naturais ou inorgânicos, no caso do CAA os mais utilizados tem sido: filer calcário, areia fina, pó granítico, entre outros (TUTIKIAN; DALMOLIN, 2015).

Por outro lado, as adições quimicamente ativas são separadas em duas categorias: materiais pozolânico e cimentante. Os materiais pozolânico apresentam a característica de reagir quimicamente no processo de hidratação do cimento, resultando em compostos mais resistentes. A cinza volante, pozolana natural, sílica ativa, metacalium e cinza de casca de arroz são exemplos de materiais pozolânico. Contudo, os materiais cimentante apresentam em sua composição o hidróxido de cálcio, de modo a não reagir no momento de hidratação do concreto, possuindo auto hidratação de forma lenta e não causando aumento da resistência do concreto. Um exemplo de material cimentante comumente utilizado na confecção de CAA é a escória de alto forno (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015).

### 2.6.6 Aditivos

Aditivos se referem aos produtos químicos adicionados em concretos e argamassas em baixas proporções, com o objetivo de ajustar suas propriedades para o fim esperado de trabalhabilidade, manuseio ou economia (ACI 212.3R, 1996).

Tutikian e Dal Molin (2015) afirmam que para a obtenção do CAA, normalmente, são empregados dois tipos de aditivos: superplastificantes e modificadores de viscosidade, afim de garantir suas características no estado fresco. Os superplastificantes proporcionam alta fluidez nas misturas e os modificadores aumento da coesão da mistura.

Os aditivos modificadores de viscosidade são produtos químicos que reduzem os efeitos negativos gerados pela dosagem referente à proporção de água e granulometria dos agregados. Estes aditivos substituem os materiais finos de modo que a mistura possua menor quantidade destes componentes, diminuindo a área superficial do material e o consumo de água (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015).

Os aditivos superplastificantes se dividem em quatro categorias: (1) lignossulfonatos ou lignossulfonados modificados (LS): incorpora ar, retarda a pega do concreto, e reduz a água em escala normal na mistura; (2) sais sulfonatos de policondensado de naftaleno e formaldeído (NS): não incorpora ar nem interfere no tempo de pega do concreto, reduz até 25% de água na mistura; (3) sais sulfonatos de policondensado de melanina ou formaldeído (MS): retarda a pega do cimento, incorpora ar, reduz até 25% de água na mistura; (4) policarboxilatos (PC): reduz até 40% de água na mistura, alta eficiência, o mais indicado para CAA (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015).

Melo (2005) sugere que devido à redução dos teores de água na mistura de CAA, o emprego de superplastificantes reduz os efeitos de exsudação e segregação do concreto. Contudo, deve ser observado o tempo de utilização do aditivo que está ativo por cerca de 30 a 60 minutos após sua aplicação.

### 2.6.7 Água

A NBR 15823-1 (ABNT, 2010) esclarece que a água para a confecção do CAA deve estar de acordo com o estabelecido na NBR 15900-1 (ABNT, 2009). Esta indica que a água potável cumpre os requisitos necessários previstos, podendo ser utilizada para o amassamento do concreto.

Nunes (2001) sugere que seja definido um ponto de equilíbrio entre a razão de água/finos e a quantidade de superplastificante, para garantir o espalhamento e a resistência à segregação do concreto.

## 2.7 MÉTODOS DE DOSAGEM DO CAA

Inicialmente, para a obtenção do concreto autoadensável, Okamura, Ozawa e Ouchi (2000) adotavam os seguintes critérios: limitação da quantidade de agregado, baixa relação entre água/cimento e uso de superplastificante.

Atualmente, dispõe-se de métodos desenvolvidos especificamente para a dosagem do CAA, como lista Gomes e Barros (2009): Método de Okamura, Ozawa, Maekawa e Ouchi; Método de Petersson, Billberg e Van; Modelo de Empacotamento Compressível; Método de Su et. al.; Método de Saak et. al.; Método de Repette-Melo; Método de Tutikian; Método da EFNARC; Método de Gomes, Gettu e Agulló.

Um método que se destaca na literatura é o método de Gomes, Gettu e Agulló (GOMES, 2002), devido sua forma experimental de obtenção do concreto partindo das características próprias dos materiais componentes da mistura.

### 2.7.1 MÉTODO DE DOSAGEM DE GOMES, GETTU E AGULLÓ (GOMES, 2002)

O método de dosagem em questão se trata de um procedimento experimental para obtenção do CAA apresentado em Gomes *et. al.* (2002). Divide-se a dosagem do CAA em duas etapas de arranjo: a pasta e o esqueleto granular, essas composições são dimensionadas e analisadas separadamente de modo que no final

da dosagem as características da mistura sejam adequadas ao enquadramento do concreto em autoadensável.

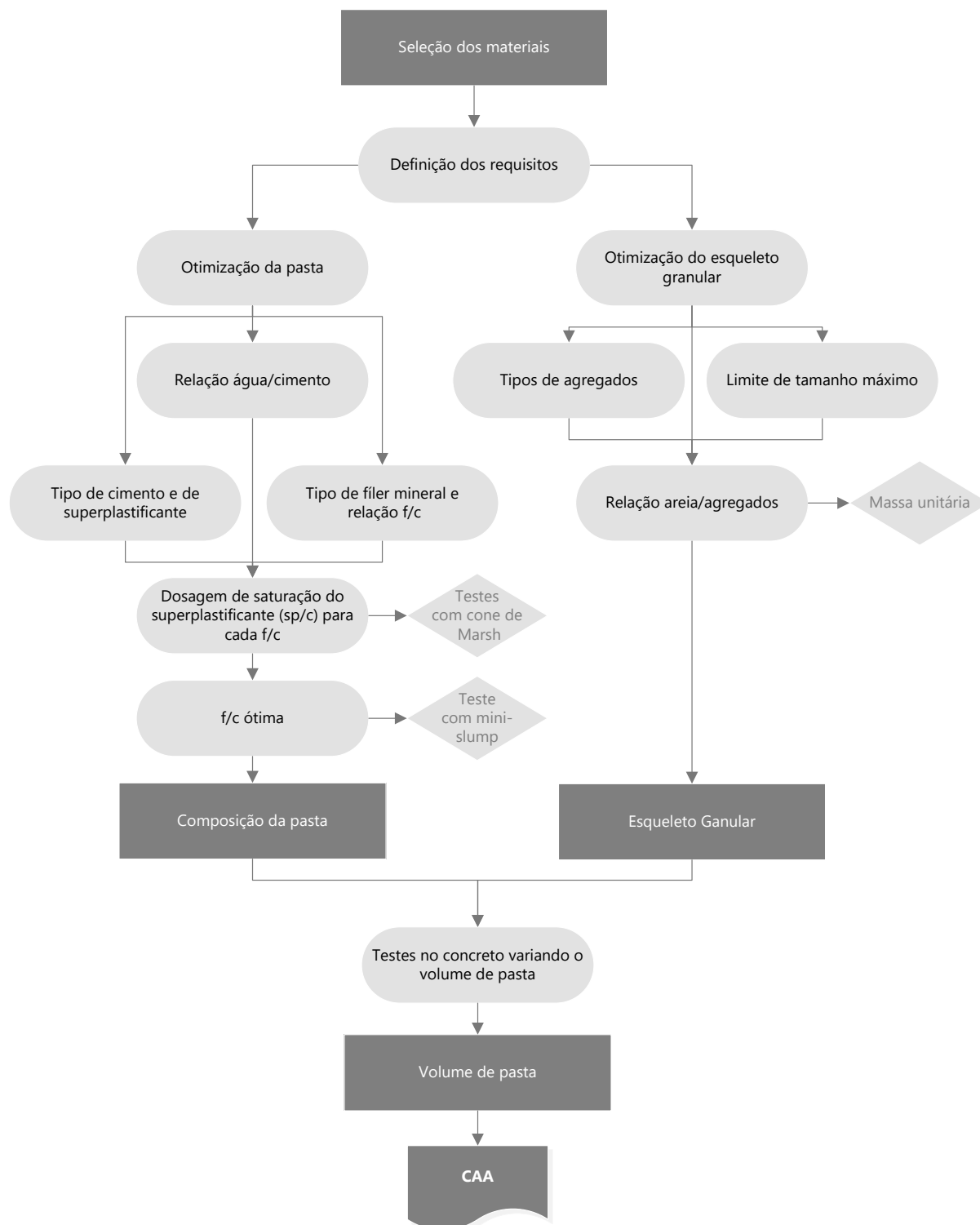
Executa-se o método em três fases: (1) seleção dos materiais; (2) composição da pasta; (3) esqueleto granular. Enfim, a Figura 7 apresenta o fluxograma que indica as fases e etapas para o desenvolvimento deste trabalho.

Na primeira etapa, como o nome sugere, são definidos os materiais que são utilizados para a obtenção do CAA, obtendo informações básicas para o progresso do trabalho, tais como: o tipo de cimento, a relação água/cimento, os tipos e dimensões máximas dos agregados e o fíler mineral.

O segundo passo é definir os parâmetros para a composição da pasta, sendo que, por meio de testes com o cone de Marsh e com o *mini-slump*, define-se a dosagem de saturação do superplastificante e o teor ótimo de finos. Restando apenas a determinação das relações entre agregado miúdo e graúdo, que aparecem na terceira fase, sendo esta definida pelo ensaio de empacotamento dos materiais, garantindo o menor índice de vazios.

Após as três fases e os parâmetros definidos, compõe-se a pasta definindo seu volume no concreto estudado. Enfim, são realizados os testes com o concreto com o objetivo de caracterizá-lo e realizar ajustes que possam ser necessários para sua obtenção.





**Figura 7 – Fluxograma para a dosagem do concreto autoadensável**  
 Fonte: Gomes e Barros (2009).

## 2.8 HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO DE TRAÇOS DE CAA

Conforme já mencionado, o CAA teve origem na década de 80, contudo ao decorrer do tempo diversos estudos e testes envolvendo este material foram realizados. Uma compilação de casos envolvendo o CAA foi realizada por Domone (2005), o qual analisou um histórico de 11 anos de estudos de concreto autoadensável.

Conforme disposto no Anexo I, o estudo citado englobou informações datadas de 1993 até 2003 com concretos desenvolvidos para diversas aplicações, tais como: obras de grande porte de infraestrutura, elementos estruturais em residências, pavimentações, peças pré-moldadas, entre outras. Os mais de 60 casos observados foram registrados em países como Japão, França, Canadá, Reino Unido, Suécia, Suíça, Noruega, Coreia, Alemanha, Argentina, Estados Unidos e Itália (DOMONE, 2005).

Domone (2005) afirma que o material fino mais utilizado, em 28 casos, foi o pó de calcário, contudo a variação do material utilizado como adição condiz com as disponibilidades e práticas das regiões na qual o concreto fora desenvolvido. Outra característica referente à composição dos concretos se remete à utilização de aditivos, sendo que, dentre eles, o superplastificante fora utilizado em todos os casos.

A Figura 8 resume as características de composição dos concretos analisados, como: porcentagem de agregado graúdo, volume de pasta, consumo de cimento e relação água/cimento.

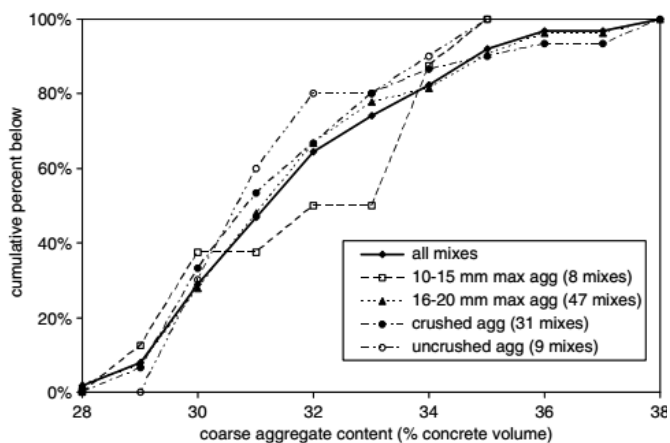


Fig. 4. Distribution of coarse aggregate contents.

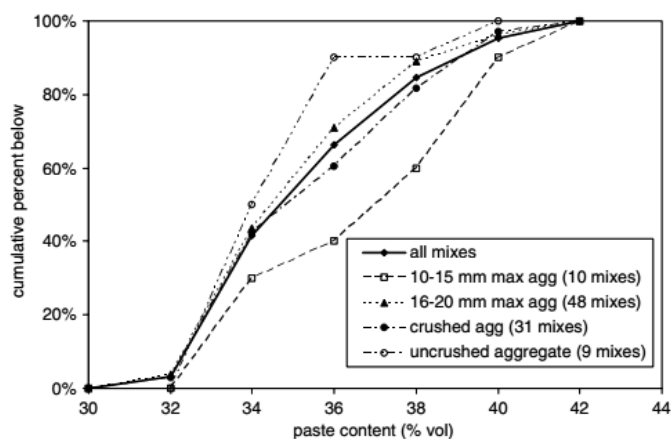


Fig. 5. Distribution of paste contents.

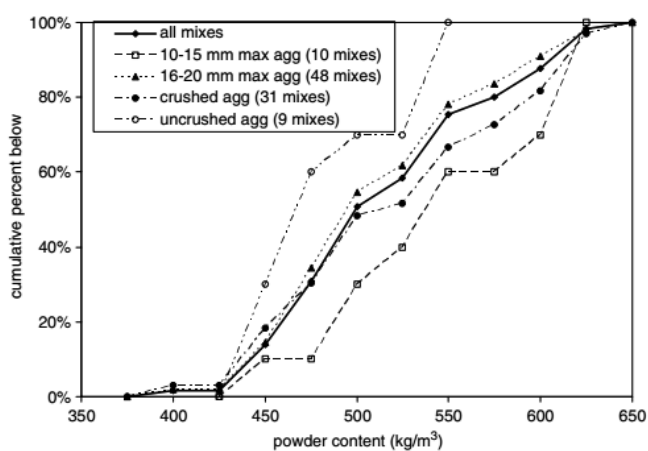


Fig. 6. Distribution of powder contents.

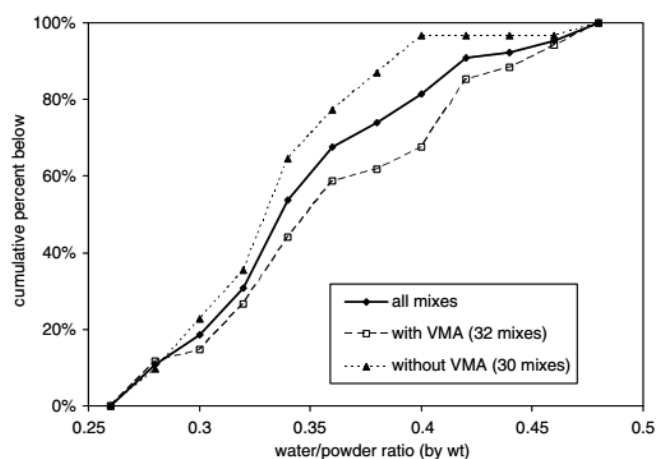


Fig. 8. Distribution of water/powder ratios.

### Figura 8 – Parâmetros de composição dos concretos estudados

Fonte: Domone (2005), adaptado.

As conclusões obtidas por Domone (2005) acerca do estudo realizado se resumem no seguinte:

- 90% dos concretos possuem espalhamento entre 600-750 mm;
- 80% das amostras apresentaram resistência à compressão superior a 40 MPa;
- A maioria dos casos (70%) utilizou agregados com dimensão máxima entre 16 e 20 mm;
- Todos os concretos possuem adição, sendo a mais comum, em 41% dos casos, o pó de calcário;
- A composição de um concreto com as médias dos traços estudados seria formada por:

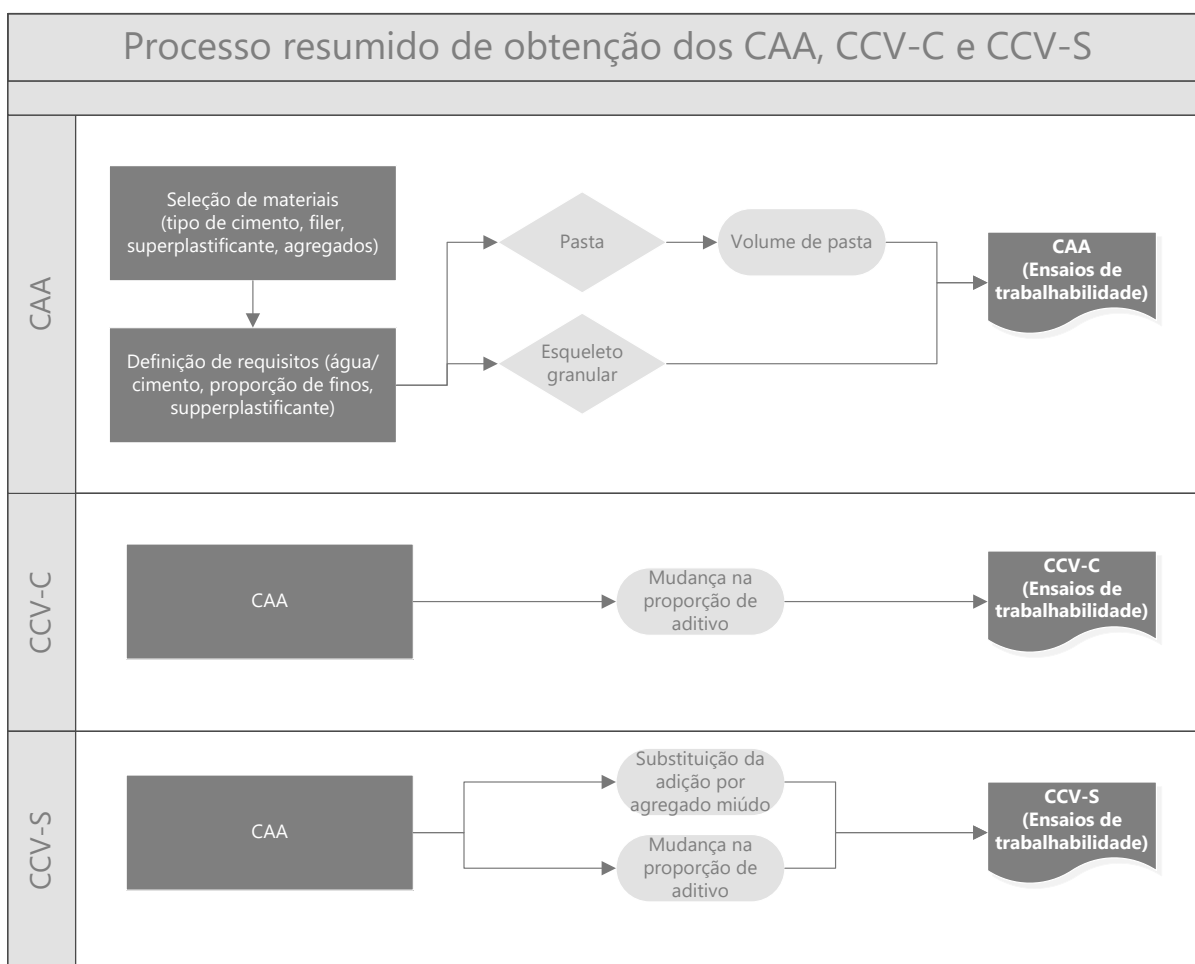
- Volume de agregado graúdo: 31,2%;
- Volume de pasta: 34,8%;
- Consumo de cimento: 500 kg/m<sup>3</sup>;
- Relação água/cimento: 0,34;

Enfim, Domone (2005) afirma que não existe uma única forma de se obter um concreto com propriedades autoadensáveis. Além disso, o autor alega que há necessidade de continuar analisando as mais diversas misturas com o intuito de apresentar melhores parâmetros com foco em eficiência e economia para o setor da construção civil.

### 3 METODOLOGIA

Com o intuito de verificar a influência dos materiais na estrutura granulométrica do concreto e compreender seus efeitos no comportamento do CAA, optou-se pelo método proposto por Gomes, Gettu e Agulló (GOMES; BARROS, 2009).

Cabe mencionar que a obtenção dos concretos convencionais, utilizados para comparação, são baseados no traço definido do CAA. Sendo assim, a Figura 9 apresenta um fluxograma que resume a sequência adotada neste trabalho.



**Figura 9 – Fluxograma de obtenção dos CAA, CCV-C e CCV-S**

### 3.1 SELEÇÃO DOS MATERIAIS

O processo de seleção de materiais focou em utilizar os materiais disponíveis na região de Toledo - Paraná. Dessa forma, a seguir são apresentadas as características dos materiais adotados para desenvolvimento deste trabalho.

#### 3.1.1 Cimento

O aglomerante utilizado foi o Cimento Portland II-Z-32. A composição deste cimento possui de 94 a 76% clínquer e sulfatos, 6 a 14 % de pozolana e 0 a 10% de material carbonático. Enquanto a classe 32 indica o mínimo de resistência à compressão aos 28 dias (ABNT, 1991).

#### 3.1.2 Agregados

Para a estrutura granulométrica foi utilizada brita 0 e areia natural. A brita é de origem basáltica proveniente de uma jazida implantada na cidade de Toledo – Paraná, a qual possui massa específica de 3,03 g/cm<sup>3</sup> e distribuição granulométrica conforme apresentada na Figura 10. Tais informações foram obtidas por meio de ensaios laboratoriais baseados na NBR NM 248 (ABNT, 2003) e NBR NM 45 (ABNT, 2006).

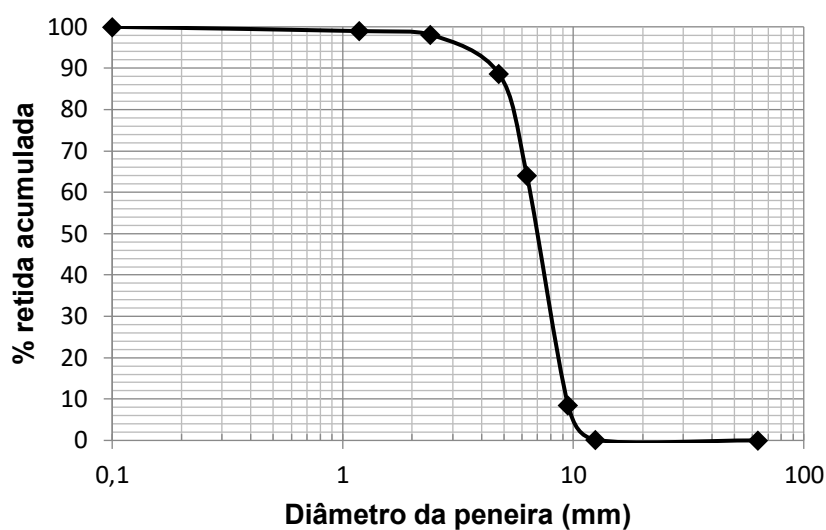


Figura 10 – Curva granulométrica – Brita 0

Na Figura 11, verifica-se a distribuição granulométrica da areia utilizada, de origem natural, proveniente da cidade de União da Vitória - Paraná. A massa específica da areia é de  $2,88 \text{ g/cm}^3$ , sendo que tais parâmetros foram determinados por meio dos ensaios normatizados NM 248 (ABNT, 2003) e NM 45 (ABNT, 2006).

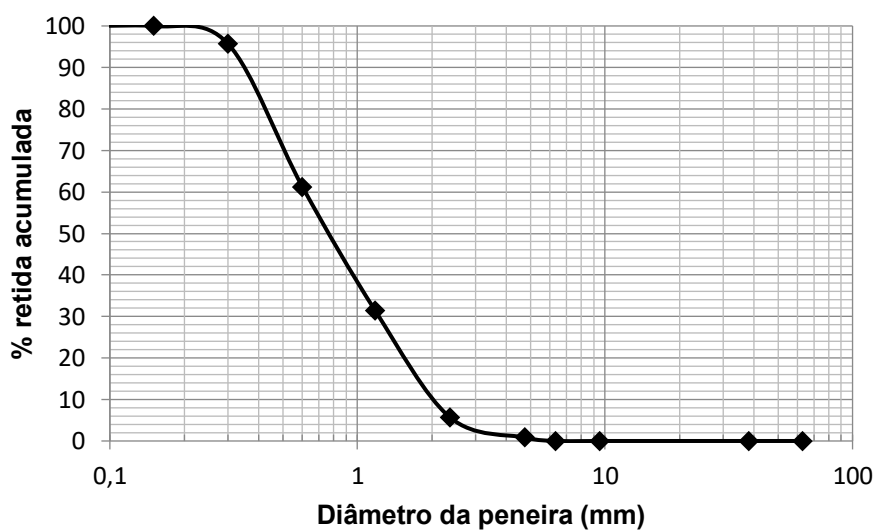


Figura 11 – Curva granulométrica – Areia Natural

### 3.1.3 Adições

Visando a redução dos efeitos negativos de segregação e exsudação, optou-se pela utilização de uma adição mineral de finura elevada, neste caso a cinza volante, que é uma adição mineral quimicamente ativa composta por material pozolânico de classe C. A cinza volante utilizada no presente trabalho foi disponibilizada pela empresa Pozo Fly®, oriunda da queima do carvão mineral comumente empregado em termoelétricas.

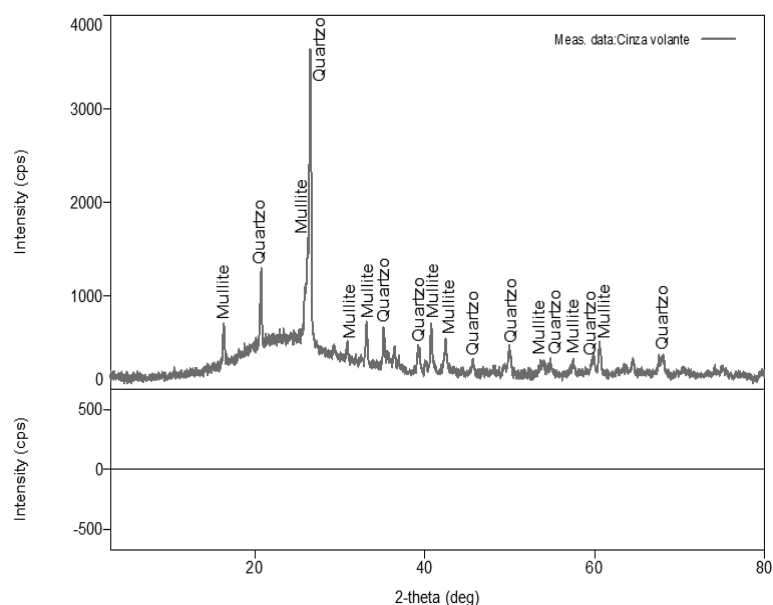
No Quadro 3 estão apresentadas as especificações da cinza volante compreendendo informações sobre sua composição química e características de classificação. As informações foram cedidas pela empresa fornecedora do material e são equiparadas com as especificações previstas pela NBR 12653 (ABNT, 2014).

Propriedades	Especificações da NBR 12653	Especificações da Cinza Volante
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	> 70 %	> 70 %
$\text{SO}_3$	< 5%	< 5%
Teor de umidade	< 3%	< 0,05%
Perda ao fogo	< 6%	< 2%
Álcalis disponíveis em $\text{Na}_2\text{O}$	< 1,5%	< 1,5%
Índice de atividade pozolânica com o cimento aos 28 dias	> 75%	> 75%
Índice de atividade pozolânica com o cal aos 7 dias	> 6,0Mpa	> 6,0Mpa
Água requerida	< 110%	< 110%

**Quadro 3 – Especificações da cinza volante em relação à NBR 12653 (ABNT, 2014)**  
**Fonte: Pozo Fly® (s/d).**

Para determinar a composição da cinza volante foram realizadas análises de difração de raios-X em difratômetro Paranalytical Empyrean utilizando radiação  $\text{CuK}\alpha$  com 40 kV no intervalo de  $5^\circ$  a  $70^\circ$  de  $2\theta$ , com passos de  $0,02^\circ$  e tempo de contagem 10 segundos. Obtendo-se como resultado que a cinza volante utilizada é constituída principalmente por mullita ( $3(\text{Al}_2\text{O}_3).2(\text{SiO}_2)$ ) e quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), comprovando novamente as informações fornecidas pelo fabricante (Figura 12).

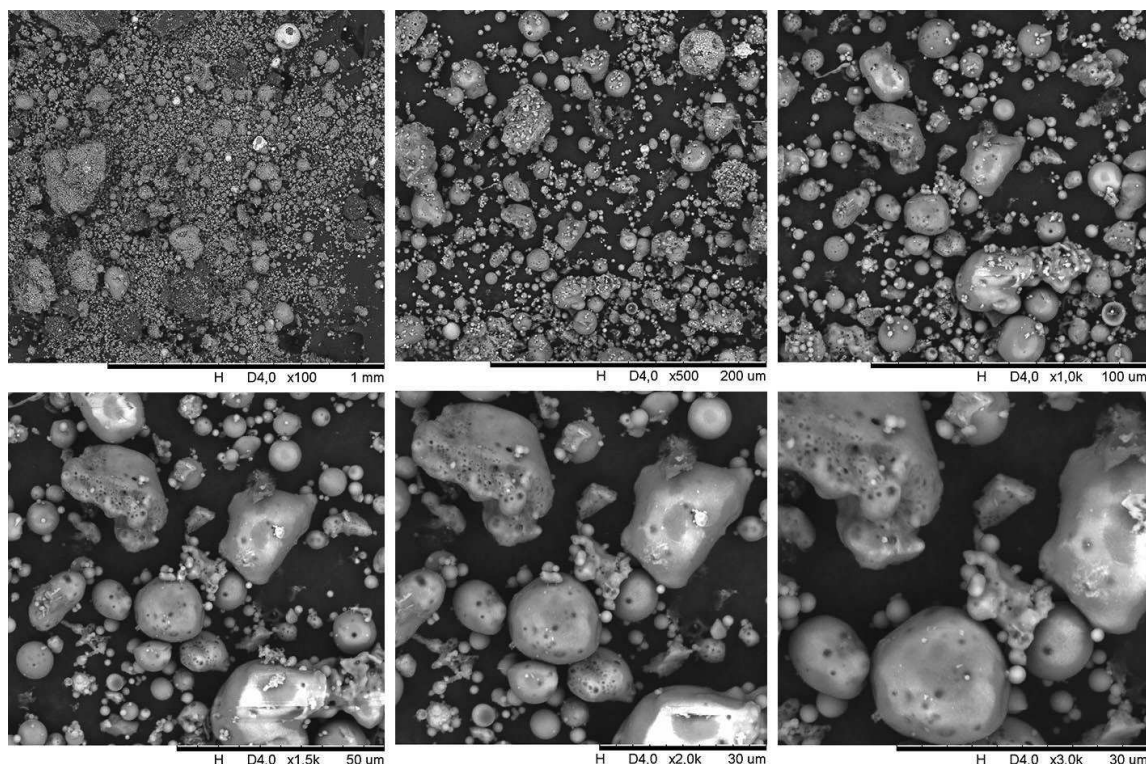




**Figura 12 – Difractometria de Raios-X da amostra de cinza volante**

Na Figura 13 é possível observar imagens de alta resolução da superfície das amostras da adição mineral de cinza volante. Nota-se nas imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) que as partículas de cinza volante são esféricas e lisas, apresentando porosidade no material.

Ainda, a critério de caracterização do material, fora ensaiada a amostra pelo método de Blaine (NBR NM 76, ABNT1998), com o intuito de obter seu valor de superfície específica, o qual resultou em 2586,31 cm<sup>2</sup>/g. Enfim, a união das informações comprova que o material é fino e esférico, sendo este capaz de prover propriedades de aumento de coesão, redução da exsudação e segregação e maior fluidez do concreto autoadensável.



**Figura 13 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) da amostra de cinza volante**

#### 3.1.4 Aditivos

Com o intuito de ajustar as propriedades do CAA, o aditivo superplastificante utilizado foi o Tecflow 7030, desenvolvido pela empresa Grace.

O aditivo em questão é indicado para concretos em geral, fluidos ou autoadensáveis de modo a proporcionar redução da demanda de água e elevadas resistências finais e iniciais para o concreto. O mesmo possui aspecto alaranjado e massa específica entre 1,040 a 1,080 g/cm<sup>3</sup> e é recomendada utilização de 0,6 a 2,0% na dosagem do concreto.

#### 3.2 ENSAIOS EM PASTA

Inicialmente, conforme previsto no método de Gomes (2002), definiu-se a relação entre água/cimento para a mistura, de modo a obter uma pasta com fluidez

satisfatória. Usualmente, a relação a/c está compreendida entre o intervalo de 0,35 a 0,40 e depende da resistência e durabilidade esperadas.

Em sequência, foram definidos o ponto de saturação do aditivo e a quantidade de finos da pasta, de modo a verificar os teores ideais capazes de promover a fluidez da mistura. O método apresentado propõe dois ensaios para esta verificação: Cone de Marsh e o *mini-slump* (Gomes, 2002).

O ensaio do Cone de Marsh para verificação da pasta é sugerido por EN 445 (1996, *apud* LISBOA, 2004) e consiste em determinar o tempo que 500 ml da pasta escoam pelo funil, com abertura de 8 mm, a partir dos 1000 ml inicialmente disposto no recipiente. Dessa forma, obteve-se uma curva log do tempo de escoamento *versus* a dosagem do superplastificante (sp/c), a partir da qual foi determinado o ponto de saturação do aditivo. Este ponto de saturação é definido como a porcentagem na qual um incremento de aditivo não é capaz de melhorar a fluidez da pasta, no caso da curva, este ponto corresponde a um ângulo de  $140^\circ \pm 10^\circ$ , conforme verificado na Figura 14.

Além disso, para determinar um ponto de saturação adequado foi necessário verificar o teor da adição adequado. Dessa forma, diferentes proporções entre as relações f/c e sp/c foram testadas.

Após o ponto de saturação determinado, foi possível examinar a fluidez da pasta, de modo a verificar com o teste de *mini-slump* (Figura 15) sua segregação e coesão. O teste com *mini-slump* foi realizado com um molde em forma de tronco de cone, no qual se mediu: o tempo para a pasta atender ao diâmetro de 115 mm ( $T_{115}$ ) e o espalhamento final da pasta. As referências indicam que o tempo recomendado para atender ao  $T_{115}$  compreende o intervalo de 2 a 3,5 segundos e o espalhamento final compreende o intervalo de 170 a 190 mm (GOMES; BARROS, 2009).

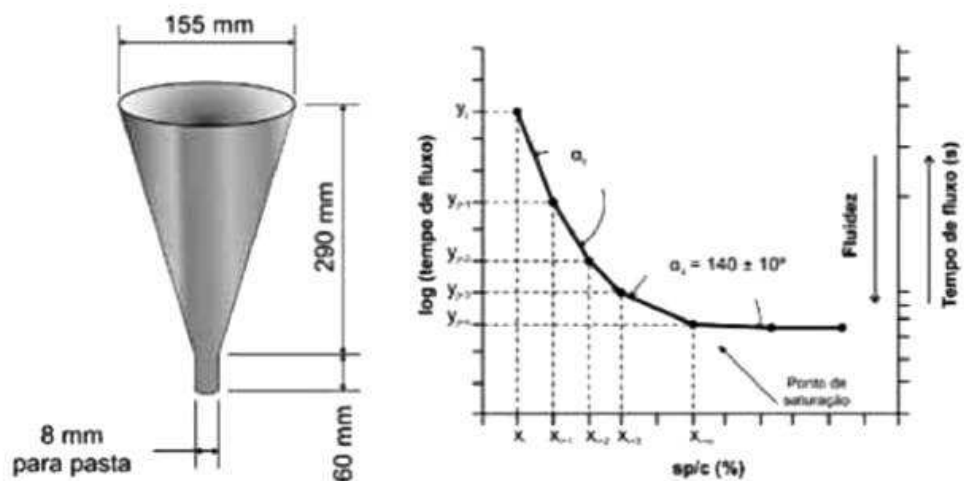


Figura 14 – Ilustração do Cone de Marsh e curva de saturação do aditivo  
Fonte: Gomes e Barros (2009).

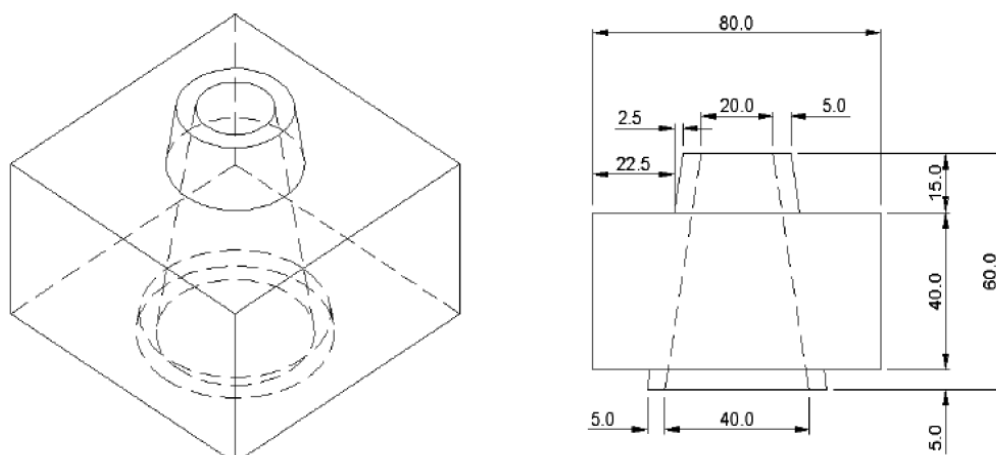


Figura 15 – Ilustração do *mini-slump*  
Fonte: Monte (2003).

Enfim, nesta etapa foram permitidos ajustes necessários para a composição da pasta, alterando as relações entre  $sp/c$  e  $f/c$  para adequação da fluidez e possível segregação da mistura.

### 3.3 ESQUELETO GRANULAR

O esqueleto granular foi obtido por meio do empacotamento experimental entre os agregados que compõem a mistura. Diversas proporções dos materiais foram misturadas de modo a obter sua densidade e teor de vazios descritos na NM 45 (2006). Dessa forma, o empacotamento se resumiu em misturar os agregados e dispô-los, sem compactá-los, em um recipiente de volume conhecido. Os dados de massa unitária e as proporções dos materiais foram empregados na determinação do teor de vazios.

O teor de vazios foi encontrado através da aplicação das equações (1), (2) e (3), definidas abaixo.

$$v(\%) = \left( \frac{\rho_{dm} - \bar{\omega}_u}{\rho_{dm}} \right) \cdot 100 \quad \text{Equação (1)}$$

$$\rho_{dm} = \frac{[\rho_s \cdot s/a(\%) + \rho_b \cdot b/a(\%)]}{100} \quad \text{Equação (2)}$$

$$\bar{\omega}_u = \bar{\omega}_t / v_t \quad \text{Equação (3)}$$

### 3.4 COMPOSIÇÃO DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL

Após o processo de determinação das proporções de materiais na pasta e o esqueleto granular, há a necessidade de definir a quantidade de pasta necessária para finalizar a composição do concreto. Entende-se que o volume de pasta deva ser o suficiente para preencher o volume de vazios entre os agregados e causar a dispersão dos mesmos (GOMES; BARROS, 2009).

Além do mais, a quantidade da pasta determinada deve ser suficiente para atender às propriedades relacionadas ao CAA: habilidade passante, capacidade de preenchimento e resistência à segregação. Sendo assim, foi utilizada a equação (4) para determinar o volume de pasta necessário para obtenção do CAA.

$$V_p = \frac{C}{\rho_c} + \frac{P_a}{\rho_a} + \frac{P_f}{\rho_f} + \frac{P_{sf}}{\rho_{sf}} + \frac{P_{sp}}{\rho_{sp}} - \frac{P_{asp}}{\rho_a} \quad \text{Equação (4)}$$

Em sequência, Gomes (2002) apresenta a equação (5), pela qual é possível determinar o consumo de cimento utilizado no traço do CAA.

$$C = \frac{V_p}{\frac{1}{\rho_c} + \frac{a/c}{\rho_a} + \frac{f/c}{\rho_r} + \frac{sf/c}{\rho_{sf}} + \frac{(sp/c) \cdot (100/T_{sp})}{\rho_{sp}} - \frac{(sp/c) \cdot [(100/T_{sp}) - 1]}{\rho_a}} \quad \text{Equação (5)}$$

Posteriormente aos parâmetros mencionados serem obtidos, os ensaios de caracterização do CAA foram realizados de acordo com a NBR 15823 (ABNT, 2010): espalhamento, funil V e caixa L.

### 3.5 OBTENÇÃO DO CONCRETO CONVENCIONAL

À critério de comparação houve necessidade de obter traços de concreto convencional que fossem compostos pelos mesmos materiais que o CAA. Com esse intuito, dois procedimentos foram realizados mantendo os seguintes parâmetros: relação água/cimento e materiais.

O primeiro traço obtido consistiu em definir o concreto convencional com adição de cinza volante (CCV-C), sendo somente retirada a proporção de aditivo.

O segundo procedimento se baseou na substituição, em volume, do material fino, cinza volante, por agregado miúdo e redução do aditivo. Neste concreto (CCV-S) reduziu-se a quantidade de materiais finos, provendo um contexto favorável ao desenvolvimento do CCV.

A trabalhabilidade dos concretos foi acompanhada durante a produção dos mesmos. Previamente definiram-se duas formas de corrigir a trabalhabilidade dos concretos, caso não apresentassem características satisfatórias para emprego em estruturas, sendo: aumento na dosagem de aditivo ou aumento do volume da pasta da mistura.

Cabe mencionar que além de produzir concretos com os mesmos materiais, foram mantidos os consumos de cimento por m<sup>3</sup> como outro critério de aproximação e assimilação entre os concretos.

### 3.6 ENSAIOS DO CONCRETO

Com o objetivo de comparar os concretos produzidos, foram realizados os seguintes ensaios de caracterização mecânica com os corpos-de-prova obtidos.

- Ensaio de resistência à compressão axial – NBR5739 (ABNT, 2007);
- Ensaio de resistência à tração por compressão diametral – NBR7222 (ABNT, 2010);
- Ensaio de determinação do módulo de elasticidade – NBR8522 (ABNT, 2008);
- Ensaio de determinação da absorção de água por imersão – NBR 9778 (ABNT, 2009).

Cabe mencionar, que foram moldados seis corpos-de-prova para os ensaios de resistência à compressão, três corpos-de-prova para compressão diametral e três corpos-de-prova para determinação do módulo de elasticidade em cada idade; e, quatro corpos-de-prova para ensaios de absorção aos vinte e oito dias. Totalizando quarenta corpos-de-prova para cada traço desenvolvido.

Outro recurso, a critério de comparação, utilizado neste trabalho fora a microscopia eletrônica de varredura com amostras dos traços de concreto endurecido aos 28 dias, de modo a compreender as diferenças entre a microestrutura dos concretos produzidos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 ESQUELETO GRANULOMÉTRICO

Sabe-se que o esqueleto granulométrico é composto pelos agregados graúdos e miúdos, sendo este definido pelo empacotamento. Para o desenvolvimento do concreto autoadensável, destaca-se a importância em estudar o empacotamento, pois minimizar os vazios entre os grãos dos agregados diminui a necessidade de pasta para a lubrificação, atenuando a retração e a porosidade do concreto (TUTIKIAN, 2004). Sendo assim, a relação areia/brita-0 foi obtida experimentalmente, através da massa unitária de várias misturas. Adotou-se o maior valor, ou seja, a mistura com menor quantidade de vazios.

A curva do esqueleto granulométrico utilizado nas misturas de concreto desta pesquisa se resume na proporção de 50% de agregado graúdo e 50% de agregado miúdo, conforme apresentado na Figura 16.

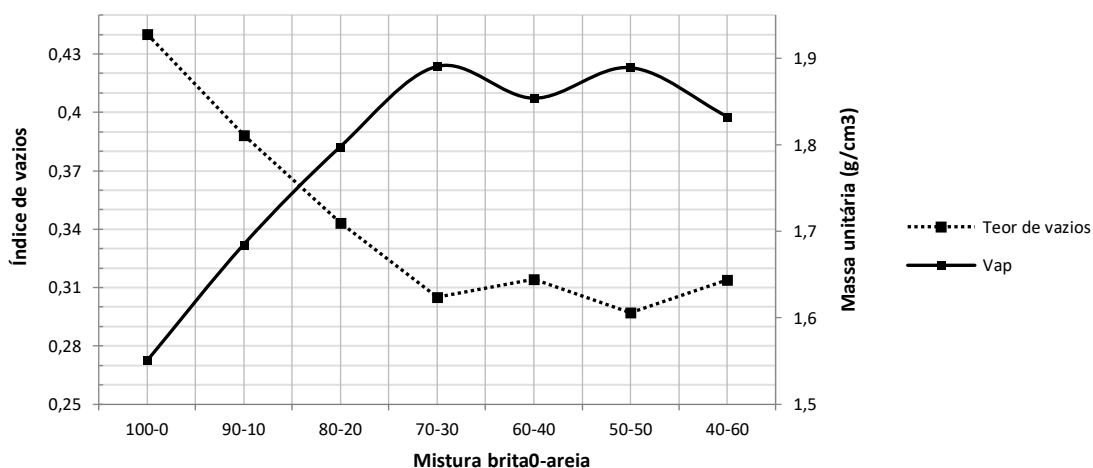


Figura 16 – Esqueleto granulométrico dos agregados graúdo e miúdo.

### 4.2 ENSAIOS EM PASTA

Segundo o método proposto por Gomes (2002) há necessidade de entender e definir os parâmetros a serem utilizados no desenvolvimento do concreto



autoadensável. Sendo assim, para análise da composição da pasta determinou-se o estudo de diferentes proporções de adição de cinza volante, respectivas a 10, 20 e 30%.

#### 4.2.1 Curva de Saturação do Aditivo

Conforme as definições de proporção do teor de adição a ser utilizado no desenvolvimento do concreto em estudo, foi realizada análise da proporção de aditivo capaz de atingir o ponto de saturação, realizada para proporções de 10%, 20% e 30% de adição, e para uma mistura de referência sem adição, sendo mantida a relação entre água e cimento inicialmente definidas de 0,4. A Figura 17 apresenta os valores obtidos no ensaio de escoamento com o cone de Marsh.

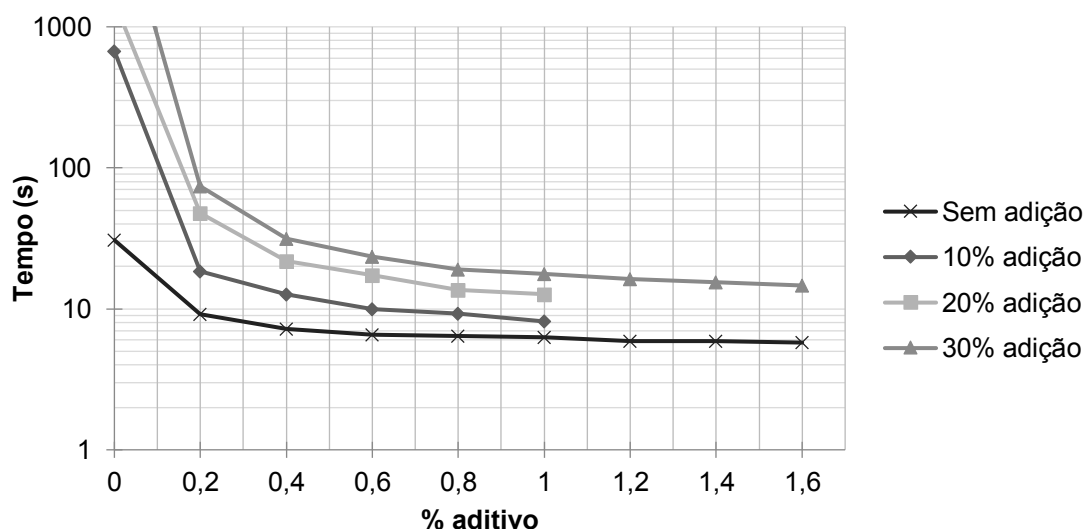


Figura 17 – Curva de saturação do aditivo

Observa-se que quanto maior a proporção de material fino, maior o tempo de escoamento da mistura, de modo a reduzir sua fluidez. Além disso, é possível constatar, por meio da angulação da reta apresentada no gráfico, que o ponto de saturação do aditivo corresponde a 0,2% nos casos sem e com 10% de adição, enquanto para as misturas com 20 e 30% de adição é de 0,4%.

#### 4.2.2 Espalhamento da pasta

A Tabela 1 apresenta o resumo dos valores obtidos para os ensaios de escoamento e espalhamento da pasta.

**Tabela 1 – Dado de espalhamento obtido através do *mini-slump***

Teor de adição	Teor de aditivo	Tempo de Espalhamento ( $T_{115}$ ) (min)	Espalhamento (mm)
0%	0,00%	-	85
	0,20%	00:01:09	170
10%	0,00%	-	57
	0,20%	0:01:47	150
	0,40%	0:00:34	260
<b>20%</b>	0,20%	-	104
	<b>0,40%</b>	<b>0:02:04</b>	<b>176</b>
	0,60%	0:01:10	185
30%	0,20%	-	109
	0,40%	0:01:19	180
	0,60%	0:00:58	200

Observa-se que apenas uma das misturas cumpre simultaneamente as sugestões propostas por Gomes (2002) – espalhamento final entre 170 e 190 mm e tempo de espalhamento  $T_{115}$  de 2 a 3,5 segundos – sendo esta a mistura com 20% de adição e 0,40% de teor de aditivo, resultando em um tempo de espalhamento  $T_{115}$  de 2,04 segundos e um espalhamento final de 176 mm. Com base nos dados apresentados, define-se a pasta com a seguinte composição: 20% de adição, 0,4% de aditivo e relação água/cimento de 0,4.

Através do espalhamento da pasta, ainda é possível obter informações referentes aos efeitos de segregação e exsudação (Figura 18), conforme o teor de aditivo aumenta, notam-se irregularidades na borda da pasta, indicando segregação do material, como verificado na mistura com 10% de adição e 0,4% de aditivo. Como não foi observada a presença de água nas bordas nem a separação dos materiais, afirma-se que as misturas não apresentaram ocorrência de exsudação.

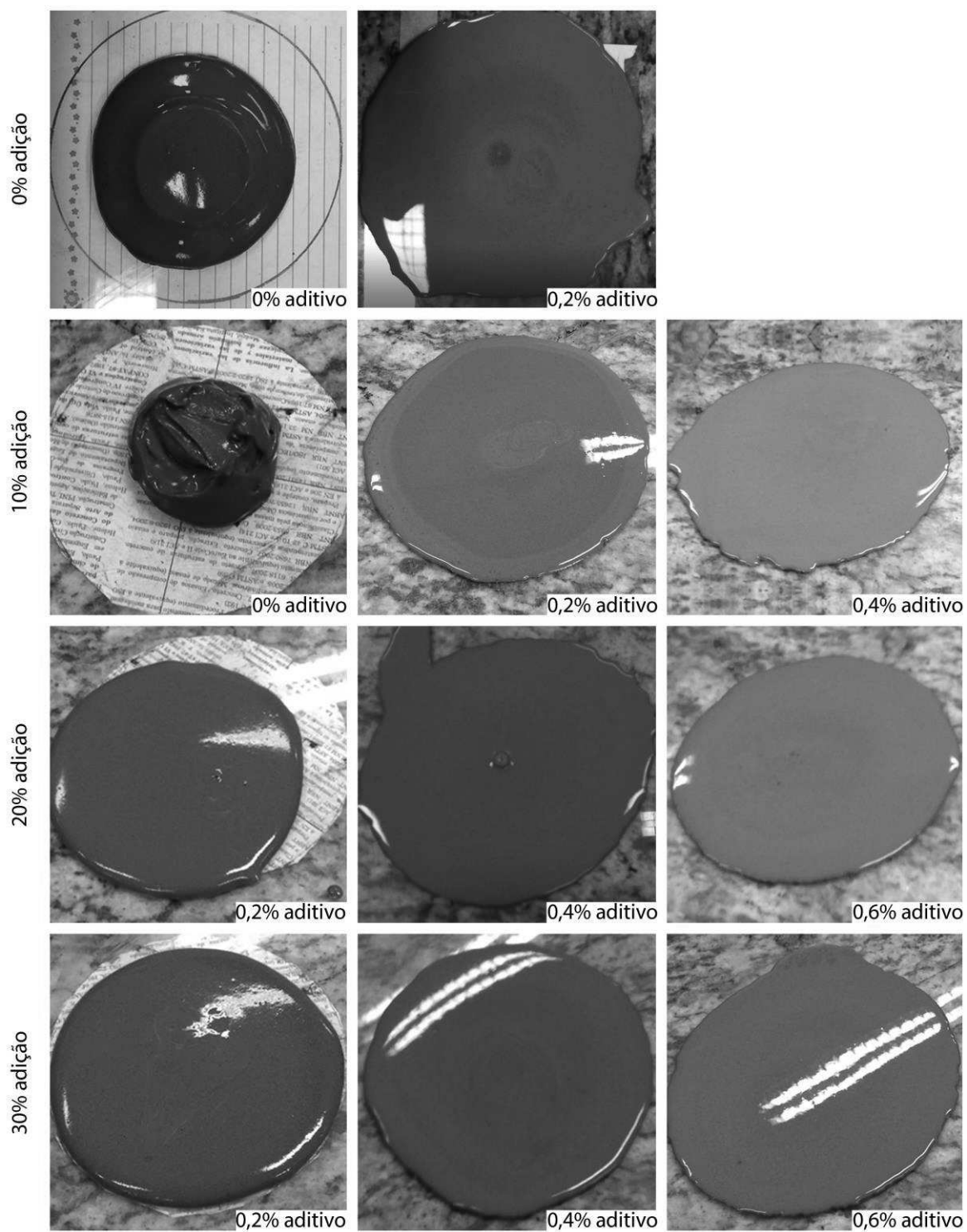


Figura 18 – Espalhamento obtido através do *mini-slump*

### 4.3 TRAÇOS DE CONCRETO OBTIDOS

#### 4.3.1 Concreto Autoadensável (CAA)

Com base nos dados anteriores, o volume de pasta necessário, obtido através da Equação (4), representa 84,69% da composição do concreto. Com essa informação, aplica-se a Equação (5), concluindo que o consumo de cimento para o desenvolvimento adequado de um concreto com características autoadensáveis seja de 474,04kg/m<sup>3</sup>.

Dessa forma, a Tabela 2 apresenta o traço obtido, para a produção de 1m<sup>3</sup> de concreto, por meio do método proposto por Gomes (2002).

**Tabela 2 – Traço do CAA obtido pelo método de Gomes, Gettu e Agulló**

Material	Cimento	Areia	Brita	Adição	Aditivo	Água	Teor de argamassa
Relação	1	1,78	1,78	20%	0,40%	0,4	60,96%
Consumo (kg/m <sup>3</sup> )	475,25	844,17	844,17	94,85	1,90	189,70	

Contudo, durante a execução do traço obtido, obteve-se baixa trabalhabilidade do concreto e como medida corretiva, fora aumentado o teor de aditivo superplastificante Tecflow 7030, proporcionando as características de autoadensabilidade requeridas para este trabalho.

A Tabela 3 resume o traço do concreto corrigido que apresentou a trabalhabilidade de um concreto autoadensável. Nota-se que o mesmo difere na proporção de aditivo, superando em 0,6% o valor definido inicialmente. Além disso, observa-se uma redução diminuta no consumo dos demais materiais.

**Tabela 3 – Traço do CAA corrigido**

Material	Cimento	Areia	Brita	Adição	Aditivo	Água	Teor de argamassa
Relação	1	1,78	1,78	20%	1,00%	0,4	60,96%
Consumo (kg/m <sup>3</sup> )	472,93	841,84	841,84	94,62	4,75	189,23	

#### 4.3.2 Concreto Convencional com Cinza Volante (CCV-C)

Com o intuito de gerar um concreto convencional com propriedades equivalentes ao CAA, optou-se por retirar o aditivo no processo de obtenção do concreto. Dessa forma, previa-se uma mistura com características semelhantes ao CAA. Contudo, ao retirar o aditivo, deparou-se com uma mistura com nenhuma trabalhabilidade e sem textura de um concreto convencional.

Como forma de obter um concreto com o mínimo de trabalhabilidade, fora adicionada uma proporção de 0,72% de aditivo, garantindo ao concreto o mínimo de trabalhabilidade, resultando na a composição apresentada na Tabela 4.

**Tabela 4 – Traço do CCV-C**

Material	Cimento	Areia	Brita	Adição	Aditivo	Água	Teor de argamassa
Relação	1	1,78	1,78	20%	0,72%	0,4	60,96%
Consumo (kg/m <sup>3</sup> )	473,54	842,93	842,93	94,74	2,29	189,48	

#### 4.3.3 Concreto Convencional sem Cinza Volante (CCV-S)

Uma vez que o CCV-C não apresentou um desempenho satisfatório, optou-se por desenvolver um concreto convencional sem adição de cinza volante, substituindo-a por agregado miúdo. O fato de reduzir a quantidade de finos na mistura garantiu uma leve melhora na trabalhabilidade do concreto, sendo possível moldar corpos-de-prova íntegros.

Enfim, nota-se uma redução no consumo de aditivo em comparação aos CAA e CCV-C. Além disso, verifica-se um aumento na proporção do agregado miúdo. Tais proporções do traço podem ser observadas na Tabela 5.

**Tabela 5 – Traço do CCV-S**

Material	Cimento	Areia	Brita	Adição	Aditivo	Água	Teor de argamassa
Relação	1	2,08	1,78	-	0,53%	0,4	63,37%
Consumo (kg/m <sup>3</sup> )	473,72	985,33	843,22	-	2,53	189,49	

## 4.4 PROPRIEDADES DO CONCRETO

### 4.4.1 Propriedades no Estado Fresco

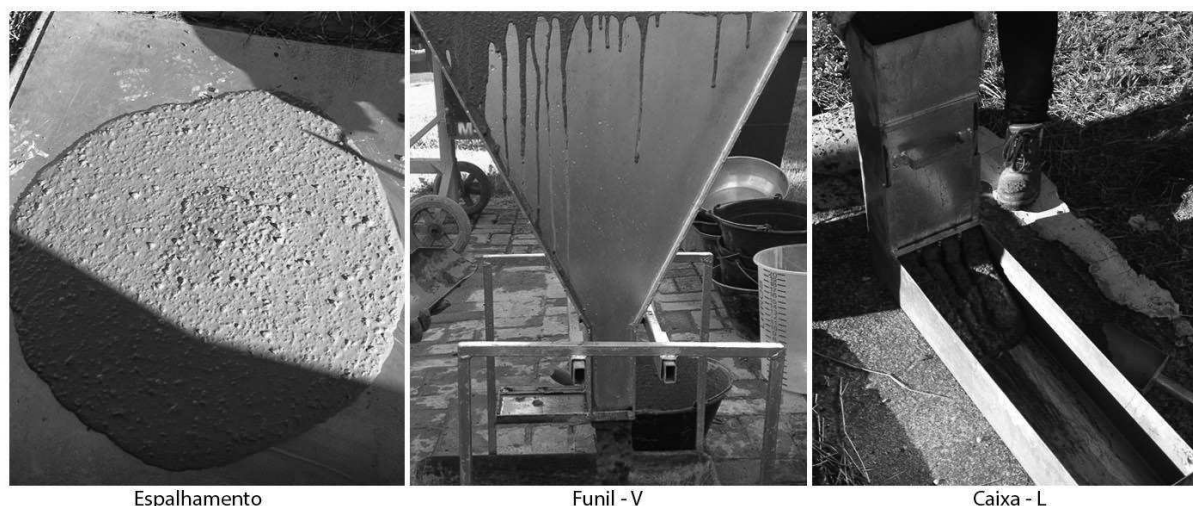
#### 4.4.1.1 Trabalhabilidade

De acordo com a NBR 15823 (ABNT, 2010), os resultados de trabalhabilidade obtidos, Tabela 6, indicam que o CAA é recomendado para aplicações em estruturas como paredes, vigas e pilares, devido sua classe de espalhamento SF2. Além disso, a combinação entre os resultados obtidos para o Funil – V, VF2, e tempo de espalhamento ( $T_{500\text{mm}}$ ), VS2, confirmam a recomendação de uso.

**Tabela 6 – Trabalhabilidade do CAA**

Ensaio	Referência da NBR 15823 (ABNT, 2010)	Características do CAA
Espalhamento	550 a 650mm – SF1 660 a 750mm – SF2 760 a 850mm – SF3	730mm – SF2
Tempo de Espalhamento ( $T_{500\text{mm}}$ )	$\leq 2\text{s}$ – VS1 $> 2\text{s}$ – VS2	5,57s – VS2
Funil-V	$< 9\text{s}$ – VF1 9 a 25s – VF2	9,37s – VF2
Caixa-L	$\geq 0,80$ com duas barras de aço – VF1 $\geq 0,80$ com três barras de aço – VF2	0,95 – VF2

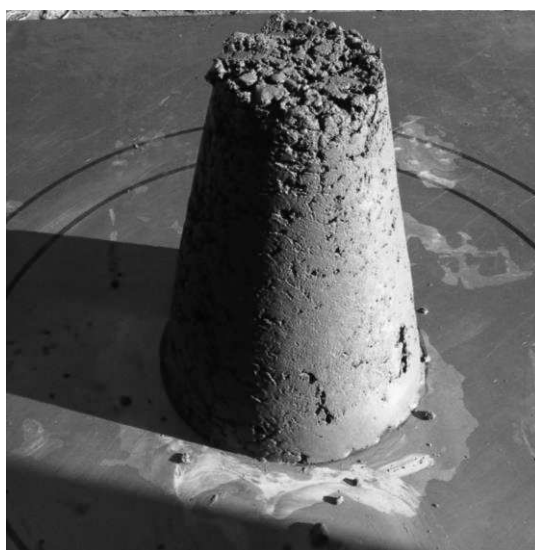
A classificação garante que esse traço seja utilizado nas diversas aplicações correntes e que devido ao seu efeito tixotrópico, acarreta em uma menor pressão sobre as formas. Além de proporcionar maior resistência à segregação (ABNT, 2010). Em suma, a Figura 19 comprova a inexistência de segregação no CAA obtido, equiparando-se ao sugerido pela NBR 15823 (ABNT, 2010).



**Figura 19 – Ensaio realizados no CAA**

Conforme mencionado anteriormente, a trabalhabilidade dos concretos convencionais desenvolvidos neste trabalho não foi extremamente satisfatória. Sendo que o CCV-C (Figura 20) apresentou abatimento de apenas 10 mm e o CCV-S de 40 mm.

Neville (1997) classifica concretos que apresentam abatimento na faixa de 0 a 25 mm com muito baixa trabalhabilidade (o caso do CCV-C) e concretos com abatimento entre 25 a 50 mm com trabalhabilidade baixa (o caso do CCV-S). Enfim, o autor explica que a trabalhabilidade está conexas com a facilidade de adensamento do concreto, destacando sua relação com a facilidade no molde de peças eliminando os efeitos negativos em suas superfícies de acabamento.



**Figura 20 – CCV-C com 10 mm de abatimento**

#### 4.4.2 Massa específica no estado fresco

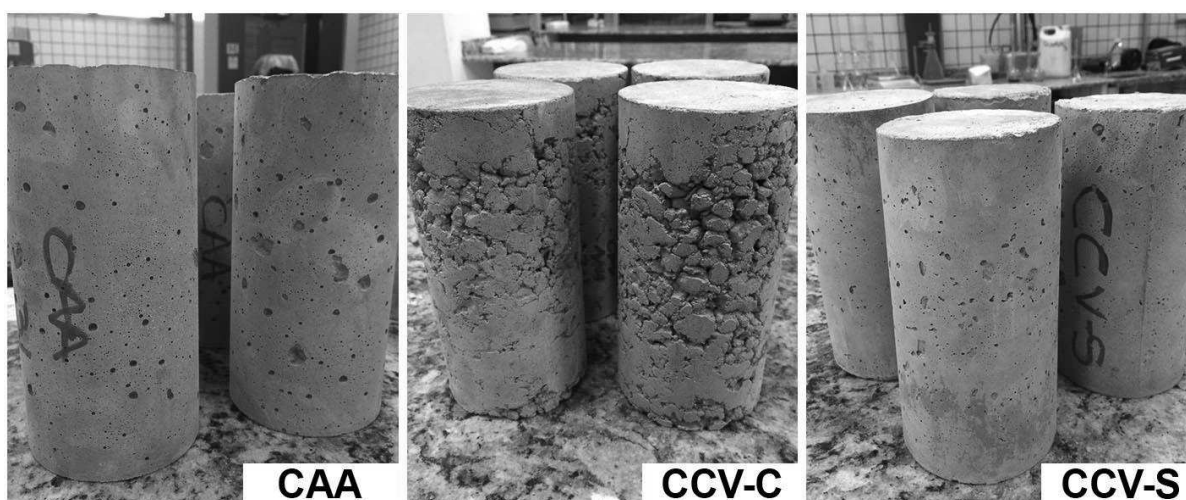
As massas específicas dos traços de concreto no estado fresco estão apresentadas na Tabela 7. Observa-se que os valores são próximos, contudo o CAA possui o maior valor, condizente com sua característica adensável, dentre os concretos, o CCV-C, apresenta menor valor de massa específica, o que está relacionado ao fato de apresentar a pior adensabilidade dentre os três traços.

**Tabela 7 – Massa específica dos concretos analisados no estado fresco**

Traço	CAA	CCV-C	CCV-S
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,40	2,32	2,38

#### 4.4.3 Propriedades no Estado Endurecido

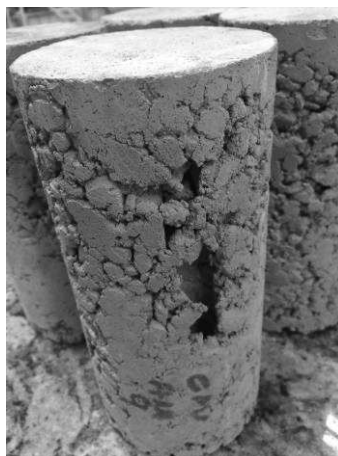
Na Figura 21 são apresentados os corpos-de-prova, na qual se observa a aparência dos concretos, notando elevada quantidade de ar aprisionado no traço de CAA. Sendo esta característica prevista pela NBR 15823 (ABNT, 2010) e indicada como ponto negativo do CAA. Além disso, observa-se que o CCV-S apresenta estrutura homogênea e integridade para com os corpos-de-prova, possuindo poucas patologias acerca de seu adensamento.



**Figura 21 – Aparência dos corpos-de-prova obtidos**



Confrontando as informações obtidas anteriormente, a respeito da trabalhabilidade dos concretos, com as imagens apresentadas, observa-se que o CCV-C apresentou dificuldade de adensamento, de modo a possuir grandes vazios internos (Figura 22).



**Figura 22 – Problemas de adensamento observados no CCV-C**

Conclui-se que a dificuldade de adensamento no CCV-C reflete nos resultados de resistência à compressão axial e tração por compressão, sendo que há grande heterogeneidade dentre os resultados obtidos, conforme apresentado a seguir.

#### 4.4.4 Resistência à compressão axial

Na Tabela 8 são apresentados os resultados de resistência à compressão axial ( $f_c$ ), compreendendo os valores de média ( $\bar{x}$ ), desvio padrão (S) e coeficiente de variação (CV) dos corpos-de-prova ensaiados.

**Tabela 8 – Resistência à compressão axial (continua)**

Idade	7 Dias				14 Dias				28 Dias				
	$f_c$ (MPa)	$\bar{x}$ (MPa)	S (MPa)	CV (%)	$f_c$ (MPa)	$\bar{x}$ (MPa)	S (MPa)	CV (%)	$f_c$ (MPa)	$\bar{x}$ (MPa)	S (MPa)	CV (%)	
	CP1	46,9			54,7				51,4				
	CP2	47,2			52,1				50,5				
CAA	CP3	43,2	45,1	1,81	4,01%	55,1	53,2	3,22	6,04%	55,8	56,4	4,52	8,02%
	CP4	43,6			55,2				56,7				
	CP5	43,1			46,5				62,5				

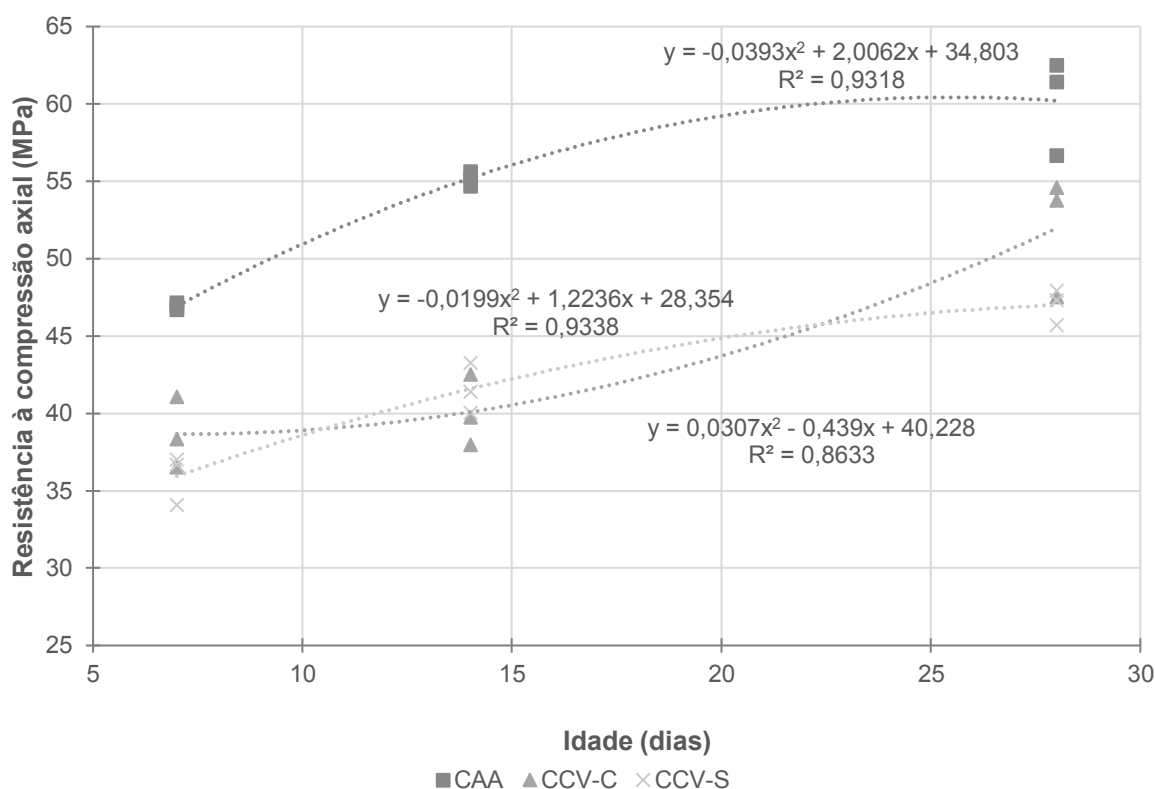
	CP6	46,7				55,7				61,4			
<b>Tabela 8 – Resistência à compressão axial (continuação)</b>													
	CP1	38,3				17,3				53,8			
	CP2	20,5				38,0				16,2			
CCV-	CP3	36,5				20,2				54,6			
C	CP4	28,8	30,2	9,34	30,90%	23,2	30,16	10,16	33,68%	38,7	15,1	38,97%	
	CP5	41,1				39,7				21,4			
	CP6	16,0				42,5				47,5			
	CP1	23,5				43,3				40,1			
	CP2	34,1				38,5				45,7			
CCV-	CP3	28,5				40,1				42,7			
S	CP4	37,0	32,1	4,78	14,88%	41,4	39,5	2,31	5,84%	44,4	2,83	6,37%	
	CP5	36,7				36,7				42,5			
	CP6	32,9				37,3				47,3			

Observa-se, primeiramente, que o CAA apresentou melhor desempenho dentre os concretos ensaiados. Uma vez que este concreto obteve maiores valores de resistência para as idades ensaiadas.

O elevado coeficiente de variação para os resultados do CCV-C reflete seu mau desempenho, em função da sua dificuldade de adensamento. Percebe-se a veracidade desta afirmação através do alto valor do desvio padrão dentre os corpos-de-prova ensaiados.

Além do mais, a Figura 23 ilustra o comportamento da resistência à compressão axial dos concretos considerando suas idades. A elaboração do gráfico e da linha de tendência considerou os três maiores valores de resistência obtidos para cada concreto, com o objetivo de reduzir o desvio padrão e coeficiente de variação da amostra.

Os dados obtidos para o CCV-S são os que possuem maior correlação, 0,9338, seguido pelo CAA com 0,9318. Enfim, como esperado, o CCV-C apresenta a menor correlação entre os dados alcançados, 0,8633, em função de seu problema de adensamento.



**Figura 23 – Evolução da resistência à compressão axial dos concretos ensaiados**

O tratamento estatístico de análise de variância: fator único, realizado pelo software Excel, resultou nas informações contidas na Tabela 9 para a idade de 28 dias dos concretos.

**Tabela 9 – Análise de variância: fator único**

Idade	Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
28D	Entre grupos	979,4163111	2	489,7082	4,78541	0,024691	3,68232
	Dentro dos grupos	1535,00385	15	102,3336			
	Total	2514,420161	17				

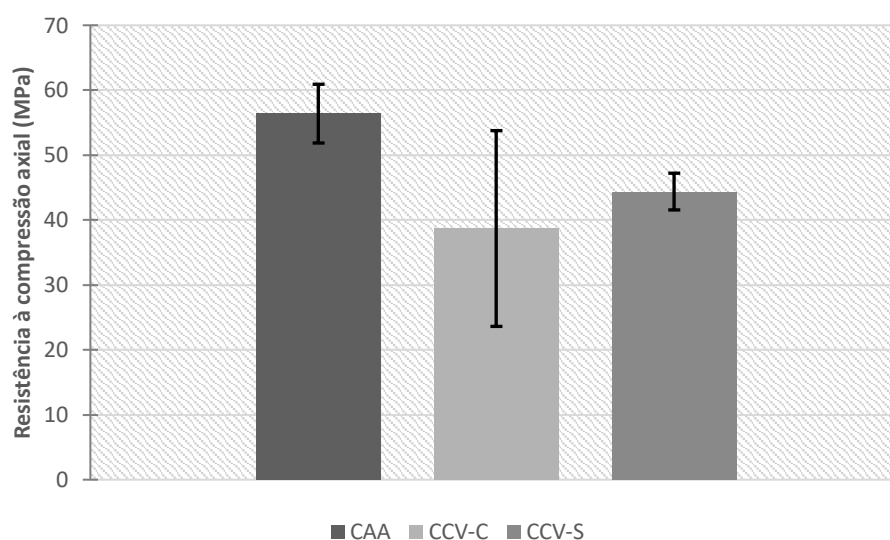
Uma vez que a análise realizada identifica as condições de igualdade, observam-se os valores de  $F_{crítico}$  e  $F$ . Esta indicação garante que haja possibilidade de considerar não apenas a hipótese 0, onde todas as amostras seriam iguais, mas também compreender quais concretos apresentam o mesmo comportamento estatístico.

Enfim, o Quadro 4 apresenta o resultado do teste de comparação entre os concretos, testado pelo método de Tukey-Kramer (NAVIDI, 2012).

Comparação	28 Dias
CAA x CCV-C	Diferente
CAA x CCV-S	Igual
CCV-C x CCV-S	Igual

**Quadro 4 – Comparação estatística entre os concretos pelo método de Tukey-Kramer**

Com intuito de compreender o teste estatístico, apresenta-se na Figura 24 o gráfico de barras com a média da resistência à compressão axial juntamente com o desvio padrão dos dados.



**Figura 24 – Evolução da resistência à compressão axial dos concretos ensaiados**

Ao unir as informações do Quadro 4 com a Figura 24, conclui-se que a comparação estatística entre CAA x CCV-S e CCV-C x CCV-S garantem que suas médias de resistência à compressão podem ser equivalentes, se tornando inconclusivo qual o concreto com melhor desempenho.

Contudo, a comparação estatística entre CAA x CCV-C garante que as médias de resistência sejam diferentes. Sendo assim, é possível afirmar que o CAA apresenta um melhor desempenho que o CCV-C.

#### 4.4.5 Tração por compressão diametral

O desempenho dos concretos com relação à resistência à tração está apresentado na Tabela 10. Nota-se que, no geral, os concretos apresentam o mesmo comportamento verificado na resistência à compressão axial, no qual o CAA apresenta o maior valor de resistência em comparação aos concretos convencionais.

**Tabela 10 – Resistência à tração aos 28 dias**

Concreto		x (MPa)	S (MPa)	CV (%)
CAA	CP1	4,49	0,53	11,88
	CP2			
	CP3			
CCV-C	CP1	3,43	0,58	16,96
	CP2			
	CP3			
CCV-S	CP1	3,36	0,58	17,35
	CP2			
	CP3			

Verifica-se que o desempenho dos concretos convencionais são muito próximos, variando cerca de 2%, enquanto o CAA se destaca por uma média elevada com relação aos demais, aproximadamente 23,5% a mais que os demais concretos.

Cabe mencionar que a NBR 6118 (ABNT, 2014) sugere que o valor de tração do concreto possa ser estimado através da Equação (6), a qual depende da resistência à compressão axial.

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad \text{Equação (6)}$$

Contudo, com base nas informações contidas nas Tabelas 8 e 10, observa-se que a resistência à tração real apresenta variação de 27,21%, em média, a menos do que o valor sugerido pela NBR 6118 (ABNT, 2014). Ao analisar separadamente os concretos (Tabela 11), verifica-se que a variação da resistência estimada com a real para o CAA é elevada em até 23,70%, para o CCV-C em até 25,03% e para o CCV-S em até 32,92%.

**Tabela 11 – Comparação dos valores reais com os valores estimados para resistência à tração aos 28 dias**

Concreto	Média (MPa)	Estimativa (MPa)	Varição (%)
CAA	4,49	5,88	<b>-23,70</b>
CCV-C	3,43	4,58	<b>-25,03</b>
CCV-S	3,36	5,01	<b>-32,92</b>

#### 4.4.6 Módulo de elasticidade

O ensaio de módulo de elasticidade resultou nos valores apresentados na Tabela 12.

**Tabela 12 – Módulo de elasticidade aos 28 dias**

Concreto		Módulo (GPa)	Média (GPa)	S (GPa)	CV (%)
CAA	CP1	32,0	32,23	0,49	1,53
	CP2	32,8			
	CP3	31,9			
CCV-C	CP1	29,4	28,10	1,30	4,63
	CP2	28,1			
	CP3	26,8			
CCV-S	CP1	32,7	29,73	2,57	8,64
	CP2	28,3			
	CP3	28,2			

Através dos dados apresentados, verifica-se que o CAA possui o maior valor de módulo, representando cerca de 8% a mais do que os dados observados para o CCV-S e CCV-C.

Ainda, obtêm-se da tabela, a informação de que o CCV-S possui maior valor de módulo de elasticidade que o CCV-C, variando em cerca de 6% os valores apresentados.

Cabe mencionar que a norma NBR 6118 (ABNT, 2014) sugere que o valor de módulo de elasticidade inicial do concreto possa ser estimado através das Equações (7) e (8), o qual depende da resistência à compressão axial, origem do agregado utilizado, no caso basalto ( $\alpha_E = 1,2$ ).

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}, \text{ para } f_{ck} \text{ de 20MPa a 50MPa}$$

Equação (7)

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25\right)^{1/3}, \text{ para } f_{ck} \text{ de } 55\text{MPa a } 90\text{MPa} \quad \text{Equação (8)}$$

Em sequência, o módulo de deformação secante se obtém pelas Equações (9) e (10).

$$E_{ci} = E_{ci} \cdot \alpha_i \quad \text{Equação (9)}$$

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80} \quad \text{Equação (10)}$$

Contudo, com base nas informações contidas nas Tabelas 8 e 12, observa-se que o módulo de elasticidade real apresenta variação de até 30,23%, em média, a menos do que o valor sugerido pela NBR 6118 (ABNT, 2014). Ao analisar separadamente os concretos (Tabela 13), verifica-se que a variação da resistência real com a estimada para o CAA é elevada em até 30,23%, para o CCV-C em até 25,03% e para o CCV-S em até 27,10%.

**Tabela 13 – Comparação dos valores reais com os valores estimados para o módulo de elasticidade aos 28 dias**

Concreto	Média (GPa)	Estimativa (GPa)	Varição (%)
CAA	32,23	46,19	<b>30,23</b>
CCV-C	28,10	37,48	<b>25,03</b>
CCV-S	29,73	40,78	<b>27,10</b>

#### 4.4.7 Absorção e Índice de Vazios

O ensaio de absorção e índice de vazios fora realizado na idade de 28 dias dos concretos e resultaram nos dados observados na Tabela 14. Ao que se notam, os valores obtidos condizem com os demais ensaios realizados no concreto em seu estado endurecido.

Destaca-se que a absorção e o índice de vazios são diretamente proporcionais, ou seja, na medida em que a absorção aumenta, o índice de vazios também aumenta. De forma crescente obteve-se o CAA, CCV-S e CCV-C, como esperado.

Devido sua característica autoadensável, o CAA possui a tendência ao apresentar o menor índice de vazios e conseqüentemente menor absorção de água. Já o CCV-C, em função de sua má trabalhabilidade, apresentou altos valores de índice de vazios e absorção.

**Tabela 14 – Índices de absorção de água e vazios dos concretos no estado endurecido**

Traço	CP	Absorção (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Coefficiente de Variação (%)	Índice de Vazios (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Coefficiente de Variação (%)
CAA	01	3,80				8,67			
	02	3,64	4,02	0,56	14,01	8,46	9,18	1,20	13,03
	03	4,86				10,97			
	04	3,79				8,62			
CCV-S	01	5,91				13,13			
	02	5,96	5,84	0,22	3,74	13,21	12,92	0,42	3,28
	03	5,51				12,29			
	04	5,96				13,05			
CCV-C	01	6,74				14,92			
	02	6,18	6,34	0,29	4,59	13,78	14,09	0,60	4,26
	03	6,08				13,55			
	04	6,37				14,09			

#### 4.4.8 Massa específica no estado endurecido

As massas específicas dos traços de concreto estudados, no estado endurecido, estão apresentadas na Tabela 15.

**Tabela 15 – Massa específica dos concretos analisados no estado endurecido**

Traço	CAA	CCV-C	CCV-S
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,28	2,22	2,21

Observa-se que os valores são próximos, contudo o CAA possui uma suave variação, sendo esta superior aos demais concretos. Em sequência, tem-se o CCV-C e o CCV-S. Essa ordem se justifica pela quantidade de materiais finos presentes em cada um dos concretos verificados.

Como apresentado na Tabela 14, o CAA possui menor índice de vazios e conseqüentemente a maior massa específica. Embora o CCV-C tenha apresentado



má adensabilidade, a quantidade de materiais finos é maior que no CCV-S atribuindo-o uma massa específica ligeiramente maior.

#### 4.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A microscopia eletrônica de varredura é o recurso utilizado para compreender e comparar a microestrutura dos concretos desenvolvidos. As imagens foram obtidas através da análise de MEV, TESCAN VEGA 3. O preparo da amostra se deu pelo espalhamento na porta amostras sobre uma fita de carbono dupla face, posteriormente secas e metalizadas com uma fina cama de ouro na superfície (“sputtering”). As micrografias foram obtidas em diversos aumentos em módulo SE com detector de elétrons secundários.

As Figuras 25 e 26 apresentam as imagens obtidas para o CAA, as Figuras 27 e 28 mostram a análise realizada no CCV-C e as Figuras 29 e 30, a análise do CCV-C.

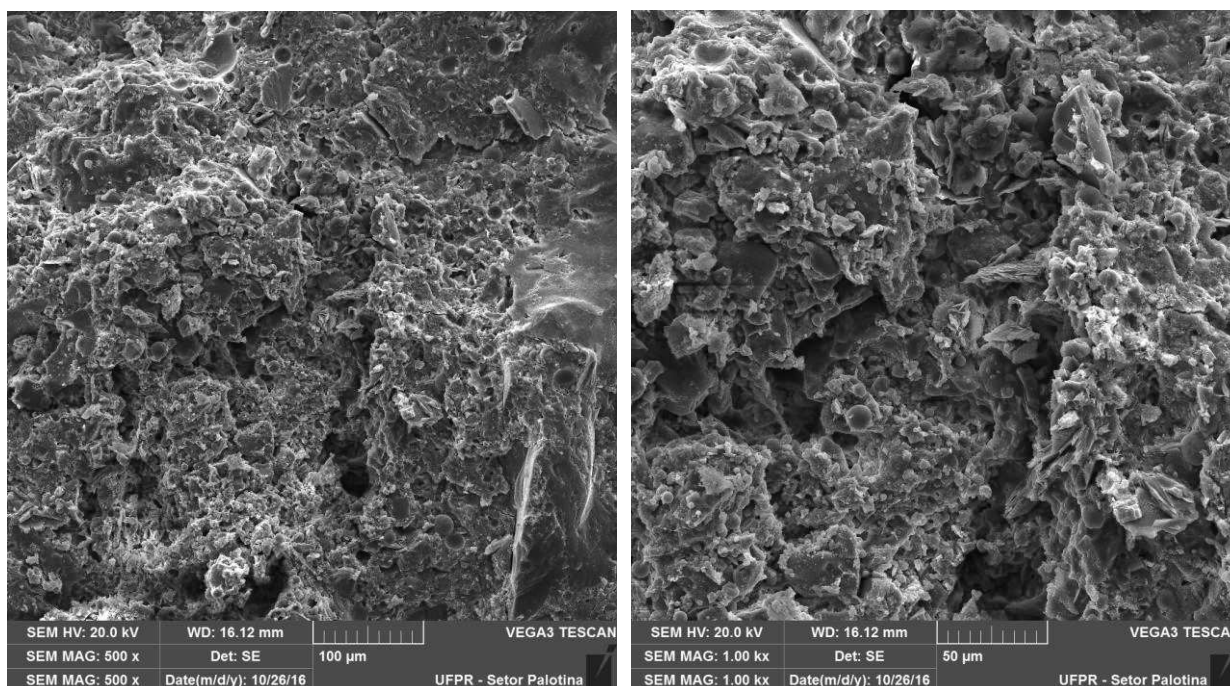
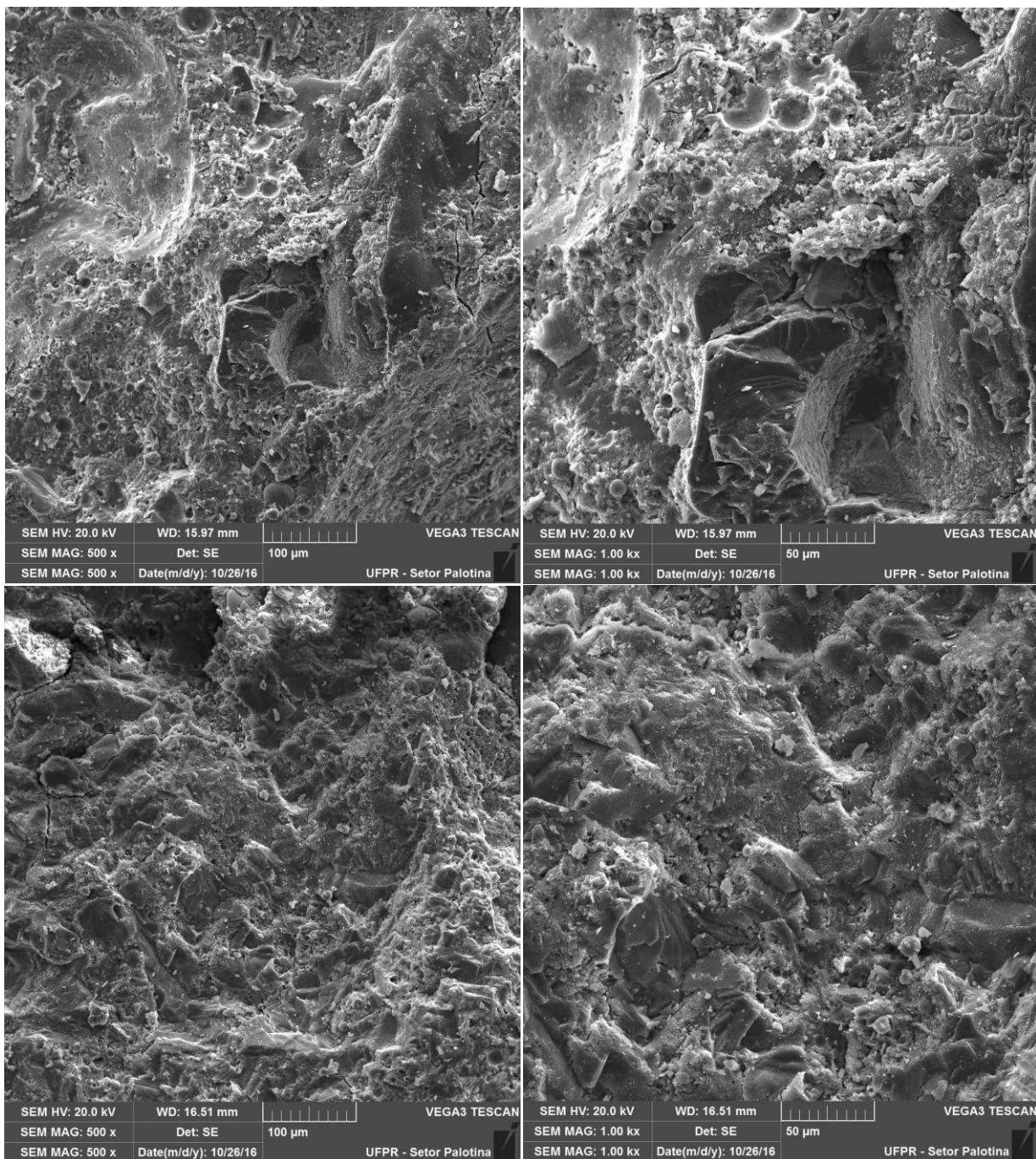
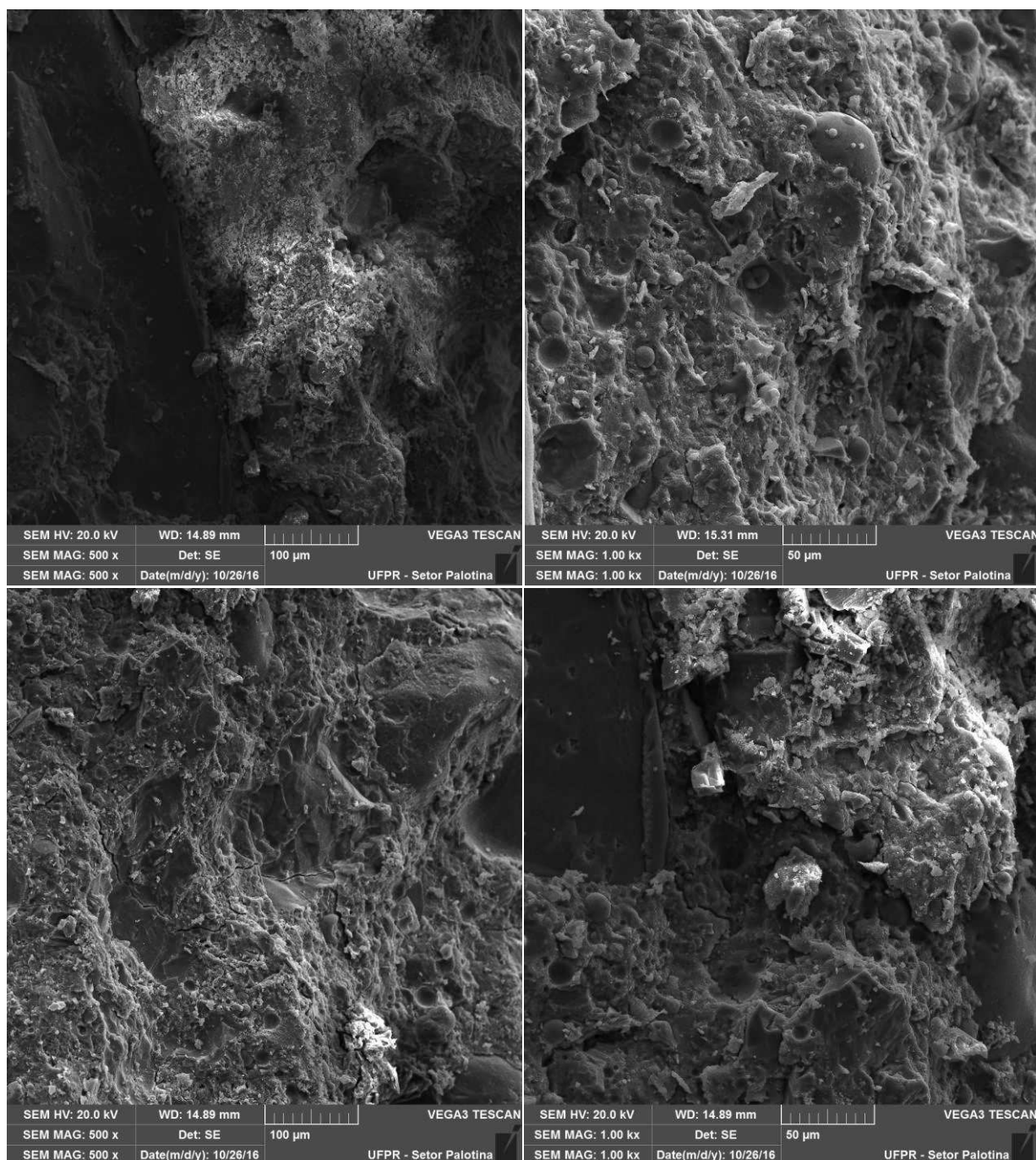


Figura 25 – MEV do CAA aumentado em 500 e 1000 vezes



**Figura 26 – MEV do CAA aumentado em 500 e 1000 vezes**

Do que se observa das imagens a microestrutura do CAA é densa, possuindo a presença de microporos. Isso garante uma permeabilidade extremamente baixa da pasta, condizente aos resultados de absorção e índice de vazios apresentados na Tabela 14. Em alguns pontos é possível identificar a localização de partículas de cinza volante, pois as mesmas possuem formato esférico se destacando na microestrutura do CAA. Outra característica é acerca de seções esféricas não preenchidas, as quais indicam bolhas de ar incorporado no CAA.



**Figura 27 – MEV do CCV-C aumentado em 500 e 1000 vezes**

Com relação às imagens obtidas para o CCV-C é possível concluir que, embora sua macroestrutura tenha apresentado falhas devido ao adensamento, sua microestrutura é próxima ao que se observa no CAA. Os poros são muito pequenos e as partículas esféricas de cinza volante também podem ser identificadas. Nota-se que uma característica bastante presente são as fissuras no concreto, além de serem observados grãos soltos sobre a superfície analisada.

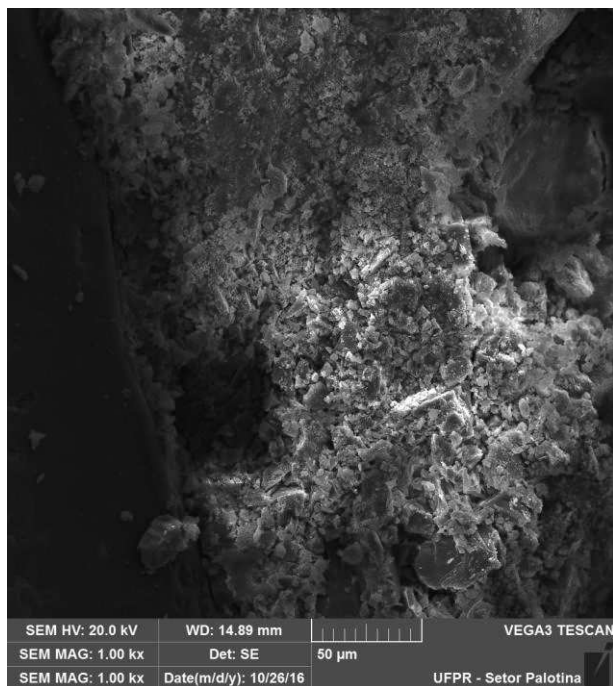


Figura 28 – MEV do CCV-C aumentado em 1000 vezes

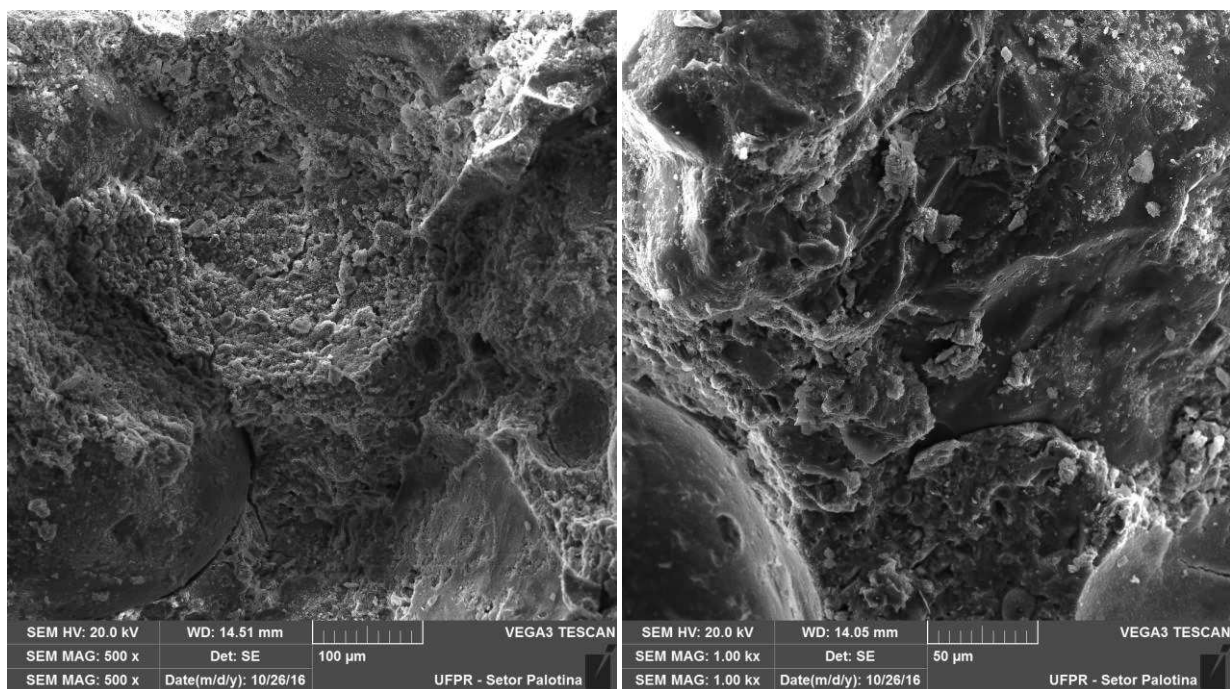
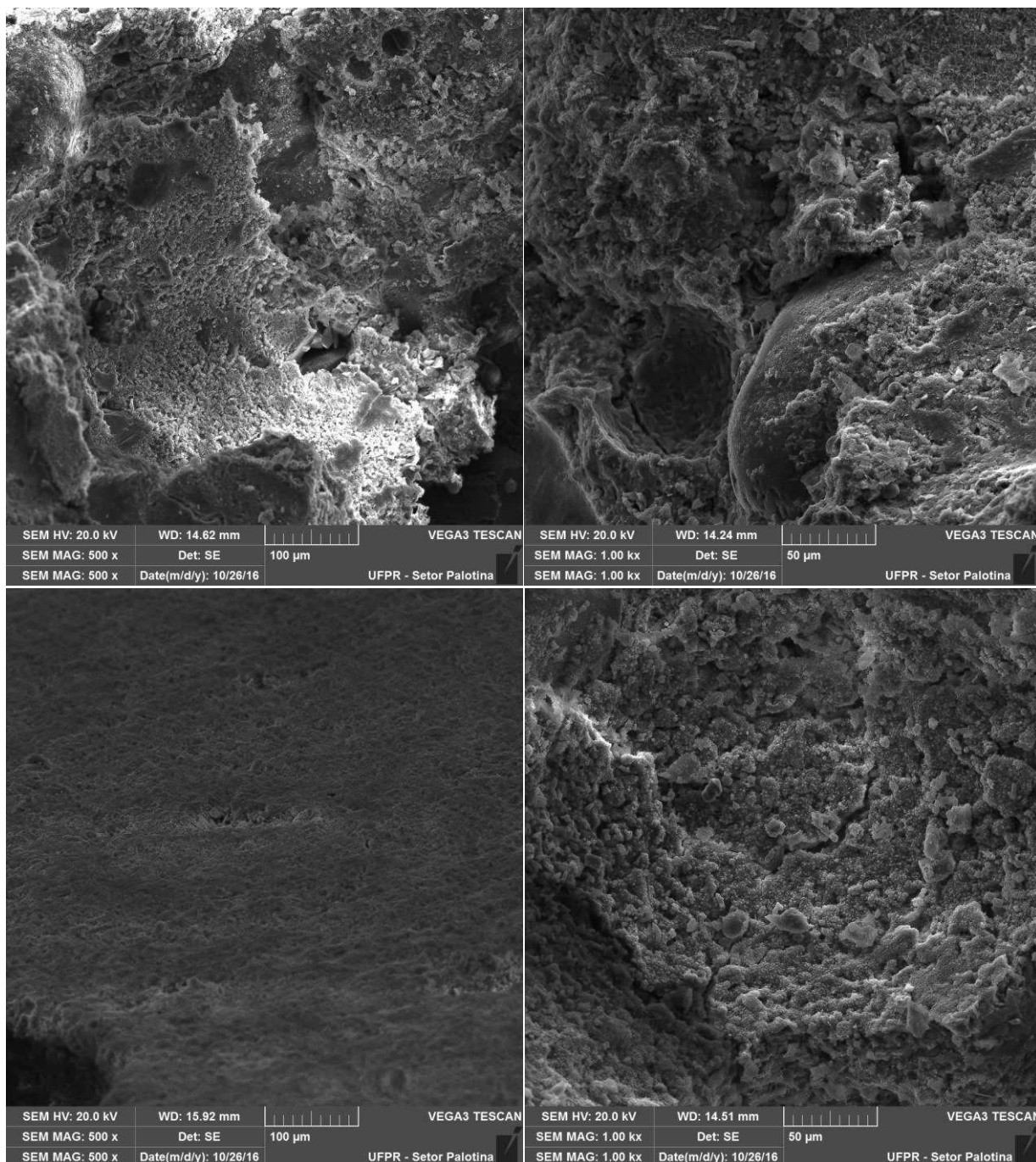


Figura 29 – MEV do CCV-S aumentado em 500 e 1000 vezes





**Figura 30 – MEV do CCV-S aumentado em 500 e 1000 vezes**

O CCV-S apresenta aspecto diferente dos concretos que possuem adição em sua composição, observam-se uma estrutura de poros maiores e com poucos sinais que indicam bolhas de ar aprisionadas. Além disso, verifica-se que a zona de transição entre pasta e agregado é facilmente identificada, contendo algumas fissuras nesta região. Enfim, é possível reparar que a quantidade de materiais soltos é menor do que o analisado nos concretos anteriores.

## 5 CONCLUSÃO

- Para os agregados utilizados neste trabalho, areia natural e brita 0, a proporção que garante o menor índice de vazios é 50% de areia e 50% de brita.
- A quantidade de finos interfere na trabalhabilidade da pasta, alterando pontos de saturação, espalhamento e escoamento da mesma. Conclui-se que quanto maior a proporção de adição na pasta, maior o tempo de escoamento da mistura.
- O ponto de saturação da pasta altera em função da proporção de adição, sendo 0,2% de aditivo para as misturas sem adição e com 10% de adição; e, 0,4% de aditivo para as misturas com 20 e 30% de adição.
- Dentre os critérios limites sugeridos de espalhamento entre 2 a 3,5 segundos para um diâmetro de 115 mm e espalhamento final entre 170 a 190 mm, a mistura que encaixa em tais condições é com 20% de adição e 0,4% de aditivo.
- A adição de cinza volante é capaz de controlar efeitos de exsudação e segregação, vide as pastas ensaiadas para obtenção das curvas de saturação. Obtêm-se esta conclusão através da análise do comportamento das bordas durante o ensaio de espalhamento e sua fluidez no ensaio do cone de Marsh (Figura 18).
- O traço inicial obtido pelo método proposto por Gomes (2002) para elaboração do CAA (Tabela 2) não garantiu as propriedades autoadensáveis do concreto, havendo a necessidade de adicionar 0,6% de aditivo afim de garantir tais propriedades. Com o traço corrigido (Tabela 3) resultou-se em um concreto indicado para aplicações em paredes, vigas e pilares. Os ensaios de trabalhabilidade apontaram a classificação do concreto como SF2 devido seu espalhamento (730 mm) e escoamento no Funil-V (9,37 s) e VF2 devido seu tempo de espalhamento para 500 mm (5,55 s).
- Ainda no estado fresco, compara-se as massas específicas dos traços obtidos, sendo que o CAA apresentou maior valor, seguido do CCV-S e do CCV-C.
- O ensaio de resistência à compressão axial revelou que dentre os concretos obtidos, o CAA apresentou melhor desempenho (Tabela 8) em todas as idades, uma vez que este indica maiores valores de resistência em todas as idades

ensaiadas. Contudo, a análise estatística de variância garante que seu desempenho ultrapasse apenas o CCV-C ao considerar os dados obtidos aos 28 dias de idade.

- A trabalhabilidade do CCV-C não garantiu a integridade e homogeneidade dos corpos-de-prova deste concreto, sendo que nos resultados dos ensaios de resistência, este apresentou os maiores valores de coeficiente de variação nos resultados. Além disso, este concreto apresentou o pior desempenho em todos os parâmetros observados de resistência. Sendo este resultado coerente com os valores elevados de absorção de água e índice de vazios.
- A resistência de tração, obtida pelo ensaio por compressão diametral, apresenta valores elevados em comparação aos estimados pela NBR 6118 (ABNT, 2014). Verifica-se que a variação da resistência real com a estimada para o CAA é elevada em até 30,23%, para o CCV-C em até 25,03% e para o CCV-S em até 27,10%.
- Verifica-se que o CAA possui o maior valor de módulo, representando cerca de 8% a mais do que os dados observados para o CCV-S e CCV-C. E ainda, obtêm-se da tabela, a informação de que o CCV-S possui maior valor de módulo de elasticidade que o CCV-C, variando em cerca de 6% os valores apresentados. Com relação aos dados estimados pela NBR 6118, observa-se que o módulo de elasticidade real apresenta variação de até 30,23%, em média, a menos do que o valor sugerido pela NBR 6118 (ABNT, 2014).
- A absorção e o índice de vazios são diretamente proporcionais, ou seja, na medida em que a absorção aumenta, o índice de vazios também aumenta. De forma crescente obteve-se o CAA, CCV-S e CCV-C, como esperado.
- A microscopia eletrônica de varredura revela as microestruturas do concreto observado, sendo que as imagens garantem o apresentado nos índices de vazio e absorção do concreto. Observa-se principalmente a presença de ar aprisionado, partículas soltas e microporos no CAA, enquanto no CCV-C verifica-se uma elevada quantidade de fissuras. Contudo, o CCV-S apresenta poros um pouco maiores e poucos sinais de ar aprisionado.

## 6 REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE 212.3R – **Chemical admixtures for concrete**. Michigan: ACI Committee, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**, Cimento Portland composto – Especificação. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 12653**, Materiais pozolânico - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823**: Concreto auto-adensável. 1 ed. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 15900-1**, Água para amassamento do concreto: requisitos. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**, Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118**, Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

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

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

\_\_\_\_\_. **NBR NM 67**, Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 76**, Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR 7222**, Concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2010.



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

\_\_\_\_\_. **NBR 9778**, Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

DOMONE, P.L. Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies. **Cement & Concrete Composites**, n. 26, p. 197-208, dez. 2005.

EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS (EFNARC). **Specification and guidelines for self-compacting concrete**. Maio, 2005.

GOMES, Paulo César Correia; BARROS, Alexandre Rodrigues de. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. São Paulo: Pini, 2009. 172 p.

KRAUS, Zaira Fabrício. **Investigação de misturas de argamassas para dosagem do concreto auto-adensável contendo ora filer calcário, ora aditivo promotor de viscosidade em substituição ao filer**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.

LISBÔA, Edvaldo M. **Obtenção do concreto auto-adensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento. Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2007.

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. Kumar. **Pozzolanic and cementitious materials**. Ottawa, Canadá: Gordon and Breach Publishers, 1996. 1 v.

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

MONTE, Renata. **Avaliação de metodologias de ensaio destinadas à verificação da eficiência de aditivos superplastificantes em pastas de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

NAVIDI, W. **Probabilidade e estatística para ciências exatas**. Porto Alegre: AMGH, 2012. 616 p.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. Tradução Salvador E. Giamamusso, 2ª ed. São Paulo, PINI, 1997.

NUNES, Sandra Conceição Barbosa. **Betão auto-compactável: tecnologia e propriedades**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Estruturas de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2001.

OKAMURA, H. Self-compacting high performance concrete. **Concrete international**, v. 19, n. 7, p. 50-54, jul. 1997.

OKAMURA, H.; OUCHI, K. Self-compacting concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. Tóquio, p. 5-15. abr. 2003.

OKAMURA, H.; OZAWA, K.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. **Structural concrete**, v. 1, n. 1, p. 3-17, mar. 2000.

PERIUS, Gustavo R. **Influência das propriedades físicas de agregados reciclados sobre a retração por secagem em concreto auto-adensável**. 2009. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Construção Civil, Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

RECENA, Fernando Antonio Piazza. **Dosagem e controle da qualidade de concretos convencionais de cimento Portland**. 3ª Edição – Porto Alegre: EDIPUCRS, 2011.

REPETTE, Wellington L. Concreto autoadensável. In **Concreto: Ciência e Tecnologia**. v. 2. 1. Ed. São Paulo:

TÉCHNE REVISTA. **Solução fluida**. In: Revista Técnica, edição 132, ano 16, mar. 2008.

TUTIKIAN, Bernardo Fonseca. **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis**. 2004. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; DAL MOLIN, Denise Carpena. **Concreto autoadensável**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2015. 144 p.

YAHIA, A.; TANIMURA, M.; SHIMOYAMA, Y.; **Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio**. Cement and concrete research, v. 1, n. 35, p. 532-539, 2005.

**ANEXO I – TABELA COM CARACTERÍSTICAS DOS CONCRETOS ANALISADOS  
POR DOMONE (2005)**

Table 1  
Case study details

Ref. no.	Date	Country	Application	Volume, m <sup>3</sup>	Placing	Reinforcing	Coarse aggregate			Powder		w/p, by wt	Paste, vol%	v <sub>f</sub> /v <sub>m</sub> , vol%	Admixture		sl. flow, mm	T <sub>500</sub> , s	Other	Strength, MPa @ 28 days
							Max size (mm)	Type	vol%	Composition	kg/m <sup>3</sup>				Splast+	VMA				
[4]	1993	Japan	High rise building walls and filled columns	3900	In situ	Medium	20		32.1	pbfc + pfa	500	0.34	34.6	46.0	ae	y	600-700		U-box > 300 mm	60
[5]	1993	Japan	Cable stayed bridge towers	1000	In situ	Dense	20		34.2	pbfc + pfa	500	0.34	34.6	44.3	wr + ae	y	650	10-20		53.7
[5]	1993	Japan	Filled columns in high rise building	885	In situ	Light	20		34.9	pbfc + pfa	500	0.34	34.7	45.5	wr + ae	y	650			44.2
[6]	1993	Japan	LNG storage tank	800	In situ	Heavy	20	Crushed	34.1	pbfc + pfa	488	0.34	33.8	44.9	ae		500		O-funnel 8 s	48
[6]	1993	Japan	Structural walls	80	In situ	Heavy	20	Crushed	30.6	pbfc + pfa	500	0.34	34.6	48.1	ae		650		O-funnel 10 s	
[7]	1994	Japan	Suspension bridge anchor blocks	240,000	In situ	Medium	40	Crushed	36.4	pbfc + pfa + lsp	410	0.35	29.6	50.0	wr + ae		550			
[7]	1994	Japan	Suspension bridge anchor blocks	4000	In situ	Medium	40	Crushed	42.3	pbfc + pfa + lsp	410	0.35	29.6	44.2	ae		550			36
[8]	1993	Japan	rc core of high rise building	1500	In situ	Heavy	20		34.3	pbfc + pfa	500	0.34	34.2	46.0	wr + ae	y	675	4-10	U-box 300 mm	53
[9]	1994	Japan	lw concrete structural panels		Pre-cast	Heavy	15	Ltweight	34.9	pbfc	607	0.26	36.0	40.3		y	650			65
[10]	1996	Japan	Bridge pier caps	1000	In situ	Heavy	20	Crushed	31.2	pbfc	470	0.35	34.0	48.4	ae		620		V-funnel 3 s	50-60
[10]	1996	Japan	Bridge pier caps	1000	In situ	Heavy	20	Crushed	37.5	pbfc + pfa	472	0.35	33.9	43.8	ae		650		V-funnel 7 s	50-60
[11]	1995	Japan	Port structures	760	In situ	Heavy	20	Crushed	30.9	pbfc + pfa	385	0.48	31.2	51.8	ae	y	645	11	V-funnel 15 s	41
[12]	1997	Japan	Jetty reconstruction	1190	In situ	Heavy	20	Crushed	31.0	pc + ggbs + gyp	448	0.40	32.7	48.7		y	600-695	4-6	V-funnel 7-11 s	56
[13]	1996	France	Walls and accropode units (demo)	6	In situ	Medium	20	Crushed	35.2	pc + lsp	484	0.35	33.1	49.8			600-700			50
[14]	1996	France	Viaduct piers (demo)	50	In situ	Medium	20	Crushed	32.9	pc + csf	473	0.38	33.5	50.8	ret		640			94
[15]	1998	Canada	Reaction wall	240	In situ	Medium	10		33.6	pc + pfa + csf	520	0.42	38.3	41.6	ret	y	640			42
[15]	1998	Canada	Basement wall (demo)	4	In situ	None	25		32.5	pc + pfa + csf	466	0.45	37.0	43.5	ret + aea	y	580			45
[15]	1998	Canada	Basement wall (demo)	4	In situ	None	25		31.8	pc + ggbs + csf	537	0.42	40.3	38.1	ret + aea	y	610			58
[15]	1998	Canada	Repair to car park wall	3	In situ	Heavy	14		29.6	pc + pfa + csf	532	0.41	40.4	38.8	ret + aea	y	615		V-funnel 4 s	35
[16]	1999	UK	Beams and columns (demo)—housing	7.5	In situ	Medium	20	Crushed	28.3	pc + lsp	525	0.38	38.3	46.5			650	1	L-box 0.81, Orimet 2.3 s	47
[16]	1999	UK	Beams and columns (demo)—civ eng	7.5	In situ	Medium	10	Crushed	28.3	pc + ggbs	530	0.37	36.9	47.6			690	2	L-box 0.99, Orimet 4 s	80
[17]	1999	Japan	Suspension bridge anchor blocks	13,000	In situ	Medium	20		33.2	pc + lsp	470	0.35	32.6	49.2		y	525			
[18]	1999	Sweden	Bridge walls and decks	460	In situ	Medium	16		29.5	pc + lsp	595	0.28	36.7	44.5	ae		670	3		62.3
[18]	1999	Sweden	Bridge walls and decks	230	In situ	Medium	16		31.0	pc + lsp	526	0.31	33.7	47.9	ae		700	5		69.3
[19]	1998	Sweden	Housing mix (Brite Euram)		In situ		16		30.9	pc + lsp	525	0.34	36.1	46.3			650			44
[19]	1998	Sweden	Civil engineering mix (Brite Euram)		In situ		10		31.1	pc + lsp	480	0.35	32.6	50.0			710			70
[20]	1999	Japan	psc LNG storage tank	12,000	In situ	Medium	20	Crushed	29.8	pc + lsp	585	0.30	36.5	43.7			650		V-funnel 10 s, U-box > 300 mm	60
[21]	1999	Japan	ps thin-walled elements		Pre-cast	Dense	15	Crushed	33.3	pc + lsp	580	0.32	37.4	47.0	ae	y	695	4.1	V-funnel 13.8 s	73
[22]	1999	Switzerland	Tunnel lining	73,000	In situ	None	16	Gravel	29.5	pc + pfa	434	0.48	34.6	51.5			580			
[23]	2000	UK	Filled tubular columns	400	In situ	Heavy	20	Gravel	30.0	pc + pfa	550	0.35	38.4	43.4		y	625			75
[24]	1999	Japan	Dam spillway		In situ	Medium	20	Crushed	32.9	pc	533	0.30	32.9	47.5		y	650			32.5
[24]	1999	Japan	Floor slab	2800	In situ	Heavy	20	Crushed	32.6	pc + lsp	625	0.27	38.8	39.7		y	650			24
[24]	2000	Japan	Caisson shell	4800	In situ	Light	20	Crushed	33.4	pc + lsp	635	0.26	39.0	40.6		y	700			24
[24]	1999	Japan	Steel concrete composite tunnel elements	7200	Pre-cast	Light	20	Crushed	31.0	pc + ggbs	554	0.32	35.7	45.9		y	650			30
[25]	1999	Switz	Tunnel ring elements (demo)	0.9 each	Pre-cast	Medium	16	Gravel	30.1	CEM II	480	0.36	32.5	52.6	ae		640	5		50
[25]	1999	Switz	Tunnel lining (demo)	30	In situ	Light	16	Gravel	31.3	CEM II + lsp	460	0.40	33.3	52.9	ae		670	5		50
[25]	1999	Switz	Tunnel lining (demo)	30	In situ	Light	32	Gravel	38.6	CEM II + lsp	460	0.37	32.2	50.0	ae		650	7		50
[26]	1999	Japan	Pre-cast building elements	10,000	Pre-cast	Medium	20	Crushed	30.3	pc + ggbs	607	0.29	37.4	44.3			650-700			
[26]	1999	Japan	Ltweight pre-cast panels	11,000	Pre-cast	Medium		Ltweight	35.4	pc + ggbs	607	0.26	36.0	41.1			650-701			

(continued on next page)

Table 1 (continued)

Ref. no.	Date	Country	Application	Volume, m <sup>3</sup>	Placing	Reinforcing	Coarse aggregate			Powder		w/p, by wt	Paste, vol%	v <sub>f</sub> /v <sub>m</sub> , vol%	Admixture		sl. flow, mm	T <sub>500</sub> , s	Other	Strength, MPa @ 28 days
							Max size (mm)	Type	vol%	Composition	kg/m <sup>3</sup>				Splast+	VMA				
[27]	1999	Japan	Water purification plant	200,000	In situ	Medium	20		31.0	pc + lsp	501	0.33	33.4	48.5			605		O-funnel 8.5	39
[28]	1999	Japan	rc building (demo)		In situ	Medium	20	Gravel	30.9	pc + ggbs	529	0.34	35.6	46.9	y		700			
[28]	1999	Japan	Tunnel lining (demo)	170	In situ	Dense	20	Gravel	29.5	pc + pfa	462	0.35	33.2	50.2	y		650		V-funnel >10 s	21–24
[29]	1999	Japan	Tunnel lining	4000	In situ	None	20		28.0	pc + lsp	600	0.28	37.4	48.0	y		725	5–9	U-box 367 mm, rank 1	
[29]	1999	Japan	Tunnel lining	4000	In situ	None	20		28.9	pc + lsp	520	0.30	33.6	52.5	y		670	5–9	U-box 360 mm, rank 2	>24
[30]	2000	Japan	Underwater diaphragm wall	11200	In situ	Heavy	20		31.8	pc + pfa + ggbs	500	0.32	33.8	48.8	ae	y	650	7	U-box 300 mm, rank 1	>24
[31]	2001	Norway	Radioactive waste containment		In situ	None	20	Crushed	29.5	pc + csf	432	0.45	33.5	49.3	ae	y	725	2	L-box 0.95, J-ringstep 35 mm	52
[32]	2001	Korea	Underground diaphragm wall	32800	In situ	Medium	20	Crushed	29.9	pbfc + lsp	438	0.41	32.4	49.0	ae	y	650	5.5	V-funnel 12 s, U-box 350, rank 2	64
[33]	2001	Japan	Ing storage tank wall	6600	In situ	Heavy	20	Crushed	30.6	pc + lsp	529	0.30	33.5	49.6	ae		650		O-funnel 12 s, U-box > 300 mm	60
[34]	2001	Germany	Bridge element (demo)	14	Pre-cast	Medium			29.5	CEM II/A-L + pfa	570	0.29	38.0	44.2	y		805	2	V-funnel 14 s, J-ring step 0 mm, L-box 1	80
[35]	2001	Sweden	Quay wall	3200	Pre-cast	Medium	16	Crushed	29.8	pc + lsp	538	0.33	36.0	48.8	ae		700			78
[35]	2001	Sweden	Quay wall	1600	Pre-cast	Medium	16	Crushed	29.4	pc + lsp	532	0.32	34.8	50.3	ae		700			78
[36]	2001	Switzerland	Tunnel lining renovation	700	In situ	None	16	Gravel	30.9	CEM II/A-L + pfa	473	0.39	34.8	47.5						
[37]	2001	UK	Dock fender blocks	1300	In situ	Heavy	20	Crushed	37.7	pc	450	0.40	32.3	48.8		y	630			62
[38]	2002	Canada	Wall repair	100	In situ	Heavy	10	Crushed	29.7	pc + csf	480	0.37	33.4	49.2	ae	y	675		V-funnel 12 s	57
[39]	2002	Sweden	Tunnel linings and entrances	19,000	In situ	Heavy	16	Crushed	30.5	srpc + lsp	600	0.28	36.8	45.3	ae		740		V-funnel 3.7 s	70–80
[40]	2002	Argentina	Building panels		In situ	Medium	12.5	Crushed		pc + lsp	610	0.29	38.4				680	1.8	U-box 345 mm, L-box 0.96	50
[40]	2002	Argentina	Bank vault panels		In situ	Heavy	12.5	Crushed		pc + lsp	610	0.29	38.4				660	2	U-box 340 mm, L-box 0.93	49
[40]	2002	Argentina	rc columns in high rise building		In situ	Medium	19	Crushed		pc + ggbs	500	0.34	33.4				700	2.6	U-box 315 mm, L-box 0.90	59
[41]	2002	Canada	rc columns	2100	In situ	Heavy	10	Gravel	34.0	pc + ggbs	450	0.42	33.7	48.5	wr + ret	y	660			28
[42]	2002	USA	Precast structural elements		Pre-cast	Varied			35.8	pc + pfa	474	0.35	32.7	46.3	wr + ret	y	600			
[43]	2002	Italy	Architectural wall		In situ	Light	16	Crushed	31.3	CEM II + lsp	500	0.36	34.5	50.5		y	700			43
[43]	2002	Italy	Structural concrete		In situ	Heavy	22	Gravel	34.5	CEM I + csf	530	0.33	35.2	43.7			730			95
[43]	2002	Italy	Mass concrete		In situ	Light		Gravel	31.1	CEM III + pfa	435	0.41	33.2	52.8		y	790			42
[44]	2003	Norway	Readymixed SCC —low grade	20,000/yr	In situ	Medium	20	Crushed	29.5	CEM III + csf	432	0.47	34.0	48.9	wr + ae	y	725	2		52
[44]	2003	Norway	Readymixed SCC —high grade	13,000/yr	In situ	Medium	16	Crushed	32.1	CEM II + lsp + csf	474	0.38	34.8	48.5		y	650			50
[45]	2003	Italy	Base slab	500	In situ	Heavy	16	Crushed	30.1	CEM II + pfa + lsp	601	0.32	41.5	40.6			>600	<12	V-funnel 4–12 s, L-box > 0.8	
[46]	2003	Japan	Cable stayed bridge piers	15,000	In situ	Heavy	20		31.7		470	0.33	30.4	52.3	ae		630	6.1	V-funnel 11.8 s, U-box > 338 mm	74
[46]	2003	Japan	Precast, ps, bridge beams		Pre-cast	Medium	20		28.1		575	0.30	37.3	46.4			665		V-funnel 12.1 s	71