

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA – UNIPAMPA
CENTRO DE TECNOLOGIA DE ALEGRETE - CTA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

LUÍS URBANO DURLO TAMBARA JÚNIOR

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS NO ESTADO
FRESCO E MECÂNICAS DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL DE CIMENTO
BRANCO COM ADIÇÃO DE CINZA VOLANTE**

Alegrete

2013

LUÍS URBANO DURLO TAMBARA JÚNIOR

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS NO ESTADO
FRESCO E MECÂNICAS DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL DE CIMENTO
BRANCO COM ADIÇÃO DE CINZA VOLANTE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel em Engenharia.

Orientador: Prof. Me. André Lübeck

Alegrete

2013

LUÍS URBANO DURLO TAMBARA JÚNIOR

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS NO ESTADO
FRESCO E MECÂNICAS DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL DE CIMENTO
BRANCO COM ADIÇÃO DE CINZA VOLANTE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel em Engenharia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 27, setembro de 2013.
Banca examinadora:

Prof. Me. André Lübeck
Orientador
Unipampa

Prof. Dr. Ederli Marangon
Unipampa

Eng. Civil Marcelo Dias de Oliveira
Unipampa

Dedico este trabalho a Ágatha, a gata, por sempre estar no meu colo enquanto eu escrevia este trabalho.

AGRADECIMENTO

Agradeço:

as forças do universo, por conspirarem ao meu favor, me dando uma vida incrível, na qual sei que muitas pessoas não tem a mesma sorte e acabam tendo muitas dificuldades, não tendo oportunidades de estudo e vivendo em condições precárias. Ainda tenho fé que o mundo se torne mais justo com estes;

aos meus pais, por me incentivarem e sempre estarem dispostos a me ajudar, a patrocinarem os gastos ao longo destes 5 anos de estudos e por nunca terem deixado de acreditar na minha capacidade, os amo muito;

aos meus amigos que sempre estiveram ao meu lado aqui na Unipampa, em especial Micheli♥, Bruna, Alice, Jader e João. Nunca os esquecerei! Vocês foram minha base durante todo este tempo, melhores amigos seriam impossíveis.

aos que foram passageiros, mas também muito importantes, sempre levarei boas lembranças e todos vocês fizeram parte da minha evolução como ser humano.

ao meu grande amigo Wylam, pelo companheirismo e aspirações que temos em comum, distância não é um problema. Como não amar alguém que me inspirou a adotar a Ágatha?

a todos professores do curso, aprendi muito, ralei horrores, madruguei mais ainda antes de provas, mas foi muito boa aprender a forma que cada professor tem em classe, aprender como fazer e como não fazer, caso eu queira seguir a vida acadêmica;

à empresa Grace Construction Products, pela doação de aditivos superplastificante de última geração;

ao meu orientador André Lübeck, por aceitar ser meu orientador, me auxiliar com aquisição de materiais e estar disposto a ver meu trabalho apesar de sempre ocupado;

ao engenheiro Marcelo Dias, por ajudar nos momentos complicados e por sempre estar disponível para desembaraçar a vida em laboratório.

novamente a Bruna Kuffner, por me convencer a fazer um trabalho de conclusão na linha de pesquisa dela, por me ajudar com minha pesquisa e por ser uma amiga incrível;

novamente a Micheli, por ser linda e me acompanhar desde o início!

“The dog days are over
The dog days are done
The horses are coming
So you better run”

Florence Welch

RESUMO

Com o rápido avanço das tecnologias na produção de aditivos químicos na construção civil, o concreto autoadensável foi desenvolvido, tendo como principal característica dispensar o uso de vibração, sendo capaz de fluir apenas com seu próprio peso, obtendo boa compactação, mesmo com elevada taxa de armadura. Seu emprego em obras é recente, quando comparado ao concreto convencional. Esta nova tecnologia apresenta carência de parâmetros, portanto, neste trabalho foram produzidos e caracterizados três tipos de concretos: com cimento branco, cimento branco substituindo 30% de cinza volante e cimento cinza, este utilizado como base. Para a obtenção destes foi inicialmente dosada a mistura base, utilizando o método de Gomes, Gettu e Aguiló. Os ensaios reológicos no estado fresco feitos nos concretos foram: Slump Flow, Slump Flow T50 e Funil V, para verificar o espalhamento e fluidez, caixa L, verifica a habilidade passante do concreto e no Funil V 5min para analisar a segregação. Todos os ensaios mostraram que os concretos apresentavam as características necessárias para serem definidos como autoadensáveis. Os ensaios no estado endurecido realizados foram: compressão simples e tração por compressão diametral, nas idades de 7 e 28. A amostra de concreto autoadensável de cimento Portland branco com substituição de 30% por cinza volante apresentou melhor valor de resistência (44,05 MPa) e também melhor custo/benefício, quando comparado com o concreto branco.

Palavras-chave: cimento branco; concreto autoadensável; tecnologia do concreto;

ABSTRACT

The self-compacting concrete was developed by reason of the quick technology advancement of construction, being the main feature of this concrete the elimination of vibration, flowing under its own weight, achieving a good compaction even with high reinforcement ratios. It is relatively new in construction works, as compared of conventional concrete. Only in 2010 the first Brazilian standard emerged. At this work was produced and characterized three types of self-compacting concrete: with white cement without ash, with white cement and 30% of ash, and with CP IV without ash (reference). For these, the reference mixture was initially dosed, using the Gomes, Gettu and Aguiló method. The rheological tests were: Slump Flow, Slump Flow T50 and Funnel-V, for check ability flowing, L-box, for check ability passerby, and V-Funnel 5min for segregation. All these tests showed that they characters were about self-compacting concrete. The tests of hardened state were compressive and traction diameter, to 7 and 28 days. The sample of self-compacting concrete with white Portland cement replacement by 30% ash showed better resistance value (44.05 MPa) and also a better cost/benefit ratio when compared with white concrete without gray.

Keywords: white cement, self-compacting concrete; concrete technology;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Barco de Lambot em Concreto Armado, 1848	21
Figura 2 – Catedral de Los Angeles/EUA.....	22
Figura 3 – Aeroporto La Paloma.....	23
Figura 4 – Igreja romana “Dives in Misericórdia”	23
Figura 5 – Edifício Flexotronics.....	24
Figura 6 – Painel Epopéia Paulista na Estação Luz.....	24
Figura 7 – Ponte Irineu Bornhausen, Brusque	25
Figura 8 – Museu Iberê Camargo, 2012	25
Figura 9 – Ponte Shin-kiba Ohashi, construída em 1991	30
Figura 10 – Mecanismo para obter autoadensabilidade	32
Figura 11- Cinza volante de Candiota.....	36
Figura 12 – Fluxograma completo de atividades	44
Figura 13 – Etapas da dosagem de Gomes, Gettu e Agulló	45
Figura 14 – Peneiramento dos agregados	47
Figura 15 – Determinação da massa unitária	50
Figura 16 – Ensaio massa específica da areia	52
Figura 17 – Ensaio de absorção de água da areia	53
Figura 18 – Ensaio massa específica agregado graúdo	55
Figura 19 – Ensaio de absorção de água do agregado graúdo	56
Figura 20 – Ensaio de teor de sólidos.....	57
Figura 21 – Ensaio massa específica cimento.....	59
Figura 22 – Ensaio massa específica cinza volante.....	60
Figura 23 – Ensaio da massa unitária.....	65
Figura 24 - Aparato para ensaio Slump Flow Test	67
Figura 25 – Aparato para execução do ensaio caixa-L.....	69
Figura 26 – Medidas da Caixa-L recomendadas	70
Figura 27 – Caixa-L finalizada	71
Figura 28 – Aparelho Funil-V	72
Figura 29 – Construção do Funil-V.....	73
Figura 30 – Ensaio de resistência à compressão	75
Figura 31 – Ensaio de resistência à tração	76
Figura 32 – Resultado do espalhamento para obter porcentagem do aditivo	79
Figura 33 – Slump Flow Traço 01	80
Figura 34 – Slump Flow traço 02.....	82
Figura 35 – Slump Flow traço 03.....	83
Figura 36 – Detalhamento dos ensaios de Slump Flow test.....	84
Figura 37 – Ensaios de Caixa L para os traços	86
Figura 38 – Ensaios com Funil-V.....	87
Figura 39 – Corpos de prova	88
Figura 40 – Amostras do ensaio a cisalhamento	93

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - O cimento em 2011 (em 1.000 toneladas).....	26
Tabela 2 – Teores dos componentes dos cimentos Portland brancos.....	27
Tabela 3 – Exigências químicas para o cimento Portland branco.....	27
Tabela 4 – Composição química de cimentos Portland branco estrutural.....	28
Tabela 5 – Exigências físicas e mecânicas.....	29
Tabela 6 – Proporções das misturas.....	64
Tabela 7 – Misturas para esqueleto granular.....	64
Tabela 8 – limites de resultados para slump flow test e slump flow T50, conforme referências.....	68
Tabela 9 – Composição do concreto da mistura 01.....	80
Tabela 10 – Composição do concreto da mistura 02.....	81
Tabela 11 – Composição do concreto da mistura 03.....	83
Tabela 12 – Resultados do slum-flow e slump-flow T50.....	84
Tabela 13 – Resultados para Caixa-L.....	85
Tabela 14 – Resultados do Funil-V e Funil-V 5 minutos.....	87
Tabela 15 – Resultados de resistência a compressão.....	90
Tabela 16 – Resultados de resistência à tração.....	91
Tabela 17 – Preço unitário para os materiais.....	94
Tabela 18 – Custo das misturas por m ³	95
Tabela 19 – R\$/MPa para as misturas testadas.....	96

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características e consequências do emprego de adições minerais nas propriedades do CAA.....	37
Quadro 2 – Ensaio de caracterização dos materiais.....	40
Quadro 3 – Ensaio para concreto autoadensável quanto suas relevâncias	41
Quadro 4 – Métodos de dosagem de CAA.....	42

LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

n. – Número

f. – Folha

p. – Página

CAA – Concreto Autoadensável

CCV – Concreto Convencional Vibrado

CAAB – Concreto Autoadensável Branco

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

BETOCIB – Béton de Ciment Blanc

CPB – Cimento Portland Branco

C3S – Alita

C2S – Belita

C3A - Aluminato tricálcico

C4AF - Ferroaluminato tetracálcico

a/c – água/cimento

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

MPa – Mega Pascal

Fck – Resistência Característica do Concreto

FIHP - Federación Iberoamericana de Hormigón Premesclado

SFT – Slumpflow Test

CP – Corpo-de-prova

V- Volt

Hz - Hertz

CP-IV ARI - Cimento Portland pozolânico

sp – Superplasticante

f - Filer

eq – Equação

m_s – Saturado superfície seca

m_a - Massa em água do material

m – Massa seca

SF2 - fluidez e escoamento de 2ª classe

PL2 – habilidade passante de 2ª classe

VF2 – viscosidade plástica aparente de 2ª classe

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Contextualização do tema e do problema de pesquisa	16
1.2 Objetivo	18
1.2.1 Objetivo Geral:.....	18
1.2.2 Objetivos Específicos:	18
1.3 Justificativa	18
1.4 Estrutura do Trabalho	19
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1 Concreto Branco e Seu Emprego.....	21
2.1.1 Introdução.....	21
2.1.2 Características do Cimento Portland Branco	26
2.2 Concreto Autoadensável e seu Emprego.....	30
2.2.1 Introdução.....	30
2.2.2 Propriedades do Concreto Autoadensável.....	31
2.3 Materiais Constituintes	33
2.3.1 Agregados.....	33
2.3.2 Cimento Portland Branco	35
2.3.3 Adições Minerais.....	35
2.3.4 Água	38
2.3.5 Aditivos.....	38
2.3.6 Caracterização dos materiais	39
2.3.7 Ensaio no estado fresco	40
2.3.8 Método de Dosagens.....	41
2.3.9 Método de Dosagem Gomes, Gettu e Agulló	43
3. METODOLOGIA DE PESQUISA.....	44
3.1 Considerações iniciais.....	44

3.2	Caracterização dos Materiais	46
3.2.1	Agregados	46
3.2.1.1	Composição Granulométrica	47
3.2.1.2	Densidade a Granel e Volume de Vazios.....	49
3.2.1.3	Massa Específica do Agregado Miúdo	50
3.2.1.4	Absorção da água do Agregado Miúdo	52
3.2.1.5	Massa Específica do Agregado Graúdo	53
3.2.1.6	Absorção do Agregado Graúdo.....	55
3.2.2	Aditivos Superplastificante.....	56
3.2.3	Água.....	58
3.2.4	Cimento	58
3.2.3.1	Massa Específica do Cimento	58
3.2.5	Cinza Volante.....	60
3.3	Definição da composição da pasta	60
3.4	Definição do esqueleto granular e determinação da composição do CAA ...	62
3.5	Ensaio propostos.....	66
3.5.1	Ensaio do método do cone de Abrams (slumpflow test).....	66
3.5.2	Ensaio de Caixa-L (L-Box)	69
3.5.3	Ensaio do Funil-V (V-Funnel test)	71
3.5.4	Ensaio de resistência à compressão simples	74
3.5.5	Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	75
3.6	Moldagem, Cura e armazenamento dos corpos-de-prova	77
3.7	Obtenção dos traços.....	78
3.7.1	Traço para CP IV	79
3.7.2	Traço para CPB sem cinza.....	81
3.7.3	Traço para CPB com cinza volante	82
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	84

4.1	Propriedades do CAA no estado fresco.....	84
4.1.1	Espalhamento.....	84
4.1.2	Escoamento na “Caixa-L”.....	85
4.1.3	Fluidez e segregação pelo “Funil-V”.....	86
4.2	Propriedades do CAA no estado endurecido.....	88
4.2.1	Resistência à compressão.....	89
4.2.2	Resistência à tração.....	91
4.2.3	Análise de custos.....	94
4.4.1	Análise comparativa entre traços.....	94
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	98
5.1.	Sugestão de Trabalhos.....	99
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do tema e do problema de pesquisa

Atualmente a indústria da construção civil vem buscando uma constante evolução de conhecimento, aperfeiçoando e inovando em materiais e técnicas utilizadas nas construções devido ao veloz crescimento da área, resultando este avanço no desenvolvimento de novas tecnologias. Segundo a Federación Iberoamericana de Hormigón Premesclado (FIHP), o concreto é o material de construção com maior utilização no planeta, sendo aproximadamente consumidas 1,9 toneladas de concreto por habitante ao ano (PEDROSO, 2009), tendo como principal função a estrutural. Entretanto, é continuamente evitado como material aparente por apresentar coloração acinzentada, restringindo sua utilização estética. No Brasil foram produzidos aproximadamente 64 milhões de toneladas de cimento cinza, no ano de 2011, e importadas 179 mil toneladas de cimento branco, não apresentando informações de produção de cimento branco na estimativa deste ano.

Impulsionado pelo desenvolvimento arrojado de tecnologias, o cimento Portland branco foi introduzido no mercado, sendo possível, com a sua utilização, a elaboração de elementos estéticos em conjunto com o estrutural (com sua aplicação é possível a construção de fachadas de concreto aparente e com aplicação de pigmentos). Porém, no Brasil há poucas bibliografias envolvendo as propriedades de concreto com cimento Portland branco (KIRCHHEIM, 2003; PASSUELO, 2004).

O cimento Portland branco é produzido pela pulverização de um clínquer Portland branco, sendo esta coloração alcançada por meio de condições obtidas na fabricação do cimento, utilizando matérias-primas especiais, moinhos de bolas com revestimentos cerâmicos e combustível limpo como óleo ou gás para a produção de clínquer em um ambiente adequado. Em razão desses cuidados, os cimentos brancos são cerca de três vezes mais caros que o cimento Portland convencional. (MEHTA; MONTEIRO, 2006, tradução nossa).

Contemporaneamente, obras impactantes estão optando pela utilização de concreto aparente de concreto branco ou com uso de coloração. O engenheiro e arquiteto espanhol Santiago Calatrava elaborou diversas obras notórias utilizando

concreto branco, dentre suas obras mais importantes encontra-se a Cidade de Artes e Ciências, na cidade de Valência. De acordo com informações de Béton de Concret Blanc (FÉLIOT e ROCHEFORT, 2005), associação parisiense, formada em 1973, para fomentar a pesquisa de concreto de cimento branco, em 1956 foi inaugurada a primeira obra em concreto branco aparente na França, projetada pelos arquitetos Xavier Luc Arsène-Henry e Emmanuel-Besnard Bernadac.

No Brasil sabe-se da existência de algumas obras em concreto branco, como a ponte de Brusque, situada em Santa Catarina, projetada pelo engenheiro Osvaldemar Marquetti e o Museu Iberê Camargo, situado na cidade de Porto Alegre no Rio Grande do Sul, que foi projetado pelo arquiteto português Álvaro Siza Vieira. Recentemente também houve crescente aplicação de Concreto Autoadensável (CAA) no país, de acordo com artigo da Revista *Téchne* (FARIA, 2008), onde diversas construções fizeram uso de concreto autoadensável nas suas execuções, dentre elas, a superlaje do Metrô de São Paulo, a estrutura do edifício Pathenon Residence em Novo Hamburgo (RS), entre outras.

Apesar da crescente aplicação dessas tecnologias, o estudo de concreto branco ainda é escasso no país. Neste contexto, encontra-se trabalhos de pesquisa quanto a fenômenos de carbonatação e absorção capilar dos concretos brancos (KIRCHHEIM, 2003; BARIN, 2008), cromaticidade e comportamento mecânico de concretos a base de cimento branco (PASSUELO, 2004), características quanto à adição de pigmentos no concreto (ALENCAR; BASTOS; HENDGES, 2005; AGUIAR, 2006), penetração de cloretos em concretos com cimento Portland branco (SIQUEIRA, 2008; DELLINGHAUSEN, 2009), durabilidade do concreto branco (KIRCHHEIM; et al.; 2004), resistividade elétrica do concreto branco (LÜBECK, 2008), carbonatação e absorção capilar do concreto branco (BARIN, 2008).

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo Geral:

Analisar comparativamente as propriedades reológicas no estado fresco e mecânicas de concretos autoadensáveis compostos de cimento Portland branco com substituição parcial por cinza volante e concreto autoadensável com cimento portland convencional.

1.2.2 Objetivos Específicos:

Os objetivos específicos da pesquisa são apontados a seguir:

- a) Desenvolver um traço para os concretos autoadensáveis de cimento Portland cinza e ajustar o traço desenvolvido para autoadensáveis de cimento Portland branco, mantendo a mesma trabalhabilidade e relação água/aglomerante;
- b) Avaliar a trabalhabilidade no estado plástico, analisando a fluidez e resistência à segregação e habilidade passante;
- c) Analisar as propriedades mecânicas dos concretos estudados quanto à resistência à compressão e tração por compressão diametral;
- d) Analisar o efeito da incorporação de cinza volante em concretos autoadensáveis brancos.
- e) Levando em consideração a resistência à compressão e demais propriedades avaliadas, definir qual o traço que obteve melhor relação custo/benefício.

1.3 Justificativa

A utilização de materiais modernos normalmente apresenta carência nos parâmetros das suas propriedades, sendo necessário o desenvolvimento de estudos para melhor caracterizar-lo. A falta de conhecimentos sobre o comportamento do concreto pode proporcionar situações desconhecidas na estrutura, diminuindo sua

vida útil, por apresentar como incógnita os aspectos como resistência mecânica, durabilidade e módulo de deformação (BARIN, 2008).

A lacuna de publicações de estudos sobre o uso de concretos autoadensáveis com cimento portland branco inspirou o tema deste trabalho, sendo necessário um estudo para apresentar os resultados do comportamento dos materiais compostos do concreto elaborado, com a finalidade de difundir a utilização dos mesmos, facilitando seu acesso e, talvez, diminuindo o seu custo.

Por se tratar de um material relativamente novo, a tecnologia de concreto branco autoadensável não apresentam dados que balizem decisões quanto ao seu uso, quando confrontados com os concretos convencionais vibrados (CCV), pois estes últimos estão há mais tempo no mercado e oferecem maiores informações. Por apresentar lacunas quanto aos conhecimentos completos das suas propriedades quando comparados aos concretos cinzas, materiais novos, como os utilizados no trabalho, necessitam de uma análise focada em suas características para, assim, poder difundir sua utilização e, conseqüentemente, diminuir o seu custo elevado.

Ainda não há publicações e trabalhos voltados ao comportamento conjunto dessas duas tecnologias inovadoras, cimento Portland branco (CPB) e concreto autoadensável (CAA). Portanto este trabalho visa colaborar com o preenchimento dessa lacuna com a análise desses materiais combinados.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho é dividido em 6 capítulos:

No primeiro capítulo consta a introdução, justificativa, objetivos geral e específico;

No segundo capítulo consta a fundamentação teórica, onde é feita a revisão do concreto branco e suas aplicações, do concreto autoadensável e suas aplicações;

No terceiro capítulo consta a metodologia da pesquisa, apresentando a definição dos materiais utilizados no estudo, os ensaios que foram realizados durante o trabalho juntamente com o fluxograma das atividades.

No quarto capítulo são apresentados os resultados das dosagens e ensaios, assim como uma análise destes;

No quinto capítulo são feitas as considerações finais e sugestão para futuros trabalhos;

No sexto capítulo são referenciadas todas bibliográficas utilizadas para este trabalho.

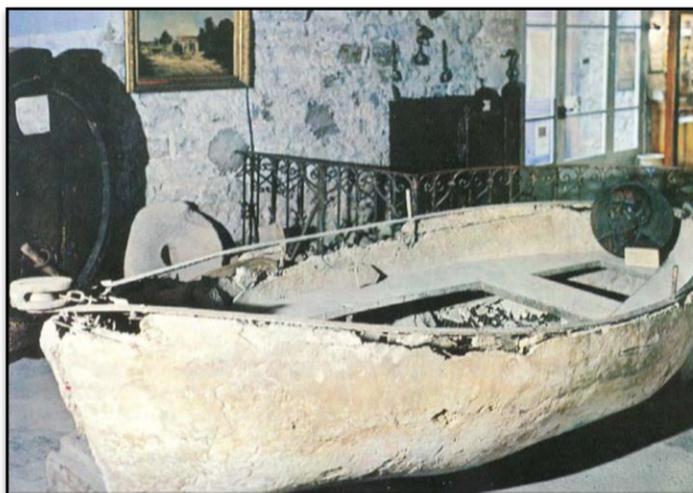
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Concreto Branco e Seu Emprego

2.1.1 Introdução

A utilização do concreto armado é demasiado recente quanto à utilização de materiais como a madeira, pedra, argila e cerâmica na construção civil, sendo as primeiras no século XVIII, utilizando calcários argilosos e cimentos para a construção do farol Eddystone, em Devon. Juntamente com o aço, o uso de concreto cresceu expressivamente por volta do século XIX, junto com a industrialização na construção civil. Em 1855, Joseph Lambot apresentou, na Exposição Universal de Paris, um barco construído em concreto armado (Figura 1), também neste ano Lambot utilizou concreto armado para construir faróis e peças de tubulações hidráulicas. (SANTOS, 1961 apud SANTOS, 2008, p. 114)

Figura 1 – Barco de Lambot em Concreto Armado, 1848



Fonte: Appleton (2005, p.3)

Atualmente há uma busca da utilização de elementos de composição arquitetônica diferenciados, não apenas propiciando a função de sustentação e transmissão de esforços de uma estrutura, mas também lançando mão da estrutura como elemento arquitetônico de destaque (LÜBECK, 2008). Havendo a procura de materiais e formas ousadas e modernas, o cimento Portland Branco se destaca

dentro destas condições, possibilitando sua utilização em elementos estruturais e em combinação com pigmentos para obter concretos coloridos. Na Figura 2 é representada a construção da Catedral de Los Angeles, projetada pelo renomado arquiteto Rafael Moneo a qual foi inaugurada em 2002 e se destacou por utilizar pigmento ocre e metacaulim em sua mistura.

Figura 2 – Catedral de Los Angeles/EUA



Fonte: Arcspace (2013, não paginado)

Segundo Nero e Nunes (2000) adota-se o concreto arquitetônico branco, ou seja, concreto aparente incorporado com cimento Portland Branco, mais conhecido apenas por concreto branco, quando associado a três objetivos fundamentais: satisfação quanto a um sentido plástico, eliminação de revestimentos e garantia de durabilidade. Porém com a experiência de trabalho com esse material, é necessário um controle encadeado de diversos fatores, desde concepção de formas e orientações de elementos construtivos, ao lançamento correto, cálculo estrutural, composição correta de materiais, cura, proteção e preparação de armaduras, entre outros processos.

O concreto aparente de cimento branco pode ser utilizado de forma estrutural e não estrutural, sendo o concreto branco estrutural empregado fundamentalmente em estruturas de projetos arquitetônicos, em obras de construções que necessitem de resistência elevada, como pilares, vigas, lajes, paredes estruturais. Já o concreto branco não estrutural é aplicado em peças pré-fabricadas, esculturas pigmentadas, painéis, argamassas, entre outros.

Atualmente, na Espanha encontram-se a maior parte das obras em concreto branco, talvez pela notoriedade das obras de Santiago Calatrava, tendo como

exemplo a obra “La Paloma” (Figura 3), representando as formas de um pássaro, terminal de aeroporto localizado em Sondika, Espanha.

Figura 3 – Aeroporto La Paloma



Fonte: Arcspace (2013, não paginado)

A Igreja Dives in Misericórdia (Figura 4) na qual destacam-se bons aspectos de brancura e uniformidade, situada em Roma e inaugurada em 2003, foi projetada pelo arquiteto Richard Meier. Na obra buscou-se aliar a estética com durabilidade, desenvolvendo um cimento especial branco, composto com dióxido de titânio, para que não haja alterações ao longo do tempo provocado pela poluição.

Figura 4 – Igreja romana “Dives in Misericórdia”



Fonte: Fogliarini.it (2007)

No Brasil a aplicação e uso do concreto branco em obras é relativamente recente. No ano de 2000, em Sorocaba, São Paulo, foi executado o Edifício Flexotronics (Figura 5), a primeira edificação em concreto com cimento Portland

branco, na concretagem de painéis pré-moldados. Oliveira (2008) descreve que em abril de 2004 foi elaborado o painel Epopéia Paulista (

Figura 6), atualmente localizado no corredor de ligação entre o Metrô e a Companhia Paulista de Trens Metropolitanos, na Estação Luz em São Paulo, o mural foi construído em concreto de cimento branco e pigmentado.

Figura 5 – Edifício Flexotronics



Fonte: Arcoweb (2013, não paginada)

Figura 6 – Painel Epopéia Paulista na Estação Luz



Fonte:Oliveira (2008, p. 109)

Em 2004, na cidade de Brusque em Santa Catarina, foi inaugurada a ponte estaiada Irineu Bornhausen (Figura 7), projetada para substituir a antiga ponte que possuía vigas pré-moldadas e pilares, por uma ponte com vãos maiores. Kirchheim, et al. (2005) afirma que a prefeitura de Brusque elabora anualmente um Seminário Internacional de Esculturas, levando artistas de todo o mundo à cidade para entalhar esculturas originais. Sendo por esta razão construída a ponte e monumento em concreto branco, relevante manifestação artística da cidade.

Figura 7 – Ponte Irineu Bornhausen, Brusque

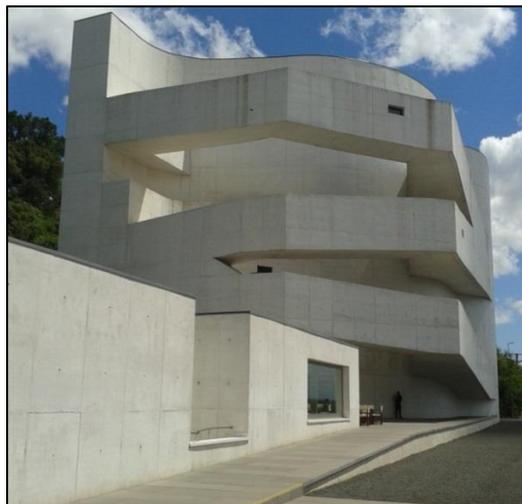


Fonte: Malhasbrusque (2013, não paginado)

A sede da Fundação Iberê Camargo (baixo.

Figura 8), iniciada no ano de 2003 e inaugurada em 2008, é a obra mais relevante concretada em concreto branco no país, conforme artigo da revista *Téchne* (FARIA, 2007), o museu foi projetado pelo premiado arquiteto Álvaro Siza, o qual recebeu o Leão de Ouro da Bienal da Arquitetura de Veneza em 2002, pelo projeto do museu em Porto Alegre, a beira do rio Guaíba, possuindo um sistema de rampas que interliga os pisos de exposição de cima a baixo.

Figura 8 – Museu Iberê Camargo, 2012



Fonte: próprio autor

2.1.2 Características do Cimento Portland Branco

A indústria brasileira de cimento é constituída por 81 fábricas em operação, distribuídas nas cinco regiões do país. Conforme informações do SNIC (2011), com o cenário internacional inquietante em 2011, apresentando grandes economias com fracos desempenhos, as atividades brasileiras tiveram um resultado abaixo do esperado. Entretanto, o consumo per capita de cimento em 2011 alcançou 333 kg/hab/ano, a maior marca da história do Brasil. Na tabela a seguir encontra-se os dados do cimento em 1000 toneladas entre o ano de 2010 e 2011:

Tabela 1 - O cimento em 2011 (em 1.000 toneladas)

Discriminação	2010	2011	Δ%
Produção	59.117	64.093	8,4%
Despacho total	59.191	63.925	8,0%
Venda Interna	59.155	63.881	8,0%
Exportação	36	44	22,2%
Importação	853	1.091	27,9%
Consumo aparente	60.008	64.972	8,3%
Consumo per capita	311	333	7,1%

Fonte: SNIC (2011, p.28)

2.1.2.1 Características Químicas e Físicas

Isaia (2005, p.321) descreve que atualmente o mercado nacional de Cimento Portland dispõe de onze tipos básicos, todos produzidos pela indústria brasileira de cimento. Dentre eles encontra-se o Cimento Portland Branco (CPB), na qual se obtém a coloração branca através de “matérias-primas com baixos teores de óxido de ferro e manganês, em condições especiais durante a fabricação, tais como resfriamento e moagem do produto e, principalmente, utilizando o caulim no lugar da argila”, utilização de moinhos de bola especiais, possuindo bolas com revestimento cerâmico, utilização de combustível limpo, tais como óleo ou gás para produzir o clínquer em uma atmosfera redutora, na zona de altas temperaturas do forno rotativo de cimento, os teores de óxido de ferro e manganês no cimento branco, citados anteriormente, devem ser inferiores a 0,5% de sua massa (MEHTA E MONTEIRO, 2006, tradução nossa).

De acordo com a Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) de cimento Portland branco vigente NBR 12989 – cimento Portland branco (ABNT, 1993, p.2), os cimentos Portland brancos são definidos como:

“aglomerantes hidráulicos constituídos de clínquer Portland branco, uma ou mais formas de sulfato de cálcio e adições”,

São divididos em estruturais e não estruturais. O cimento Portland branco estrutural é classificado de acordo com a classe de sua resistência de 25 Mpa, 32 Mpa e 40MPa, assim como os convencionais. Como fator importante para os concretos brancos, seu índice de brancura deve ser superior a 78% para cimentos Portland Branco estrutural e 82% para cimentos Portland Branco não estrutural.

A NBR 12989 (ABNT, 1993) determina algumas exigências químicas quanto ao cimento Portland branco, sendo apresentadas nas Tabela 2 e Tabela 3.

Tabela 2 – Teores dos componentes dos cimentos Portland brancos

Denominação	Classe	Componentes (% em massa)	
		Clínquer branco + Sulfatos de Cálcio	Materiais Carbonáticos
Cimento Portland branco estrutural	25 32 40	100 – 75	0 – 25
Cimento Portland branco não-estrutural	-	74 – 50	26 – 50

Fonte: NBR 12989 – ABNT (1993 p.2)

Tabela 3 – Exigências químicas para o cimento Portland branco

Determinações químicas	Limites (% em massa)			
	CPB-25	CPB-32	CPB-40	CPB
Resíduo insolúvel (RI)		≤3,5		≤7,0
Perda ao fogo (PF)		≤12,0		≤27,0
Óxido de magnésio (MgO)		≤6,5		≤10,0
Trióxido de enxofre (SO ₃)		≤4,0		≤4,0
Anidrido carbônico (CO ₂)		≤11,0		≤25,0

Fonte: NBR 12989 – ABNT (1993, p.2)

Segundo Isaia (2005), Tenório et al. (2003), Castañón et al (2011), os componentes formadores do clínquer Portland, tanto do cinza quanto do branco, são: alita (C₃S), principal constituinte do clínquer, com importante função no endurecimento e resistência mecânica do cimento após hidratação e cura nas

primeiras idades (1 a 28 dias de cura); belita (C_2S), com papel mais importante nas resistências mecânicas do cimento em idades mais avançadas (acima de 28 dias de cura), por reagir com a água mais lentamente; aluminato tricálcico (C_3A), com desempenho de pega do cimento; e ferroaluminato tetracálcico (C_4AF), responsável pela resistência química do cimento, especialmente a ataques de sulfatos às estruturas de concreto.

Conforme análise de Kirchheim (2003) de diversas publicações de trabalhos sobre cimento Portland branco estrutural, a composição do cimento utilizado varia em: C_3S de 50% a 72%; C_2S entre 0,4% a 30,7%; C_3A entre 4% e 14%; C_4AF menores que 1%. Portanto entende-se que a maior diferença na composição química entre os cimentos Portland cinza e branco está na limitação do C_4AF , possibilitando o aumento do teor de C_3A . Resultados da análise são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Composição química de cimentos Portland branco estrutural

Fonte	Composição de Bogue (%)			
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Bensted (1983)	67,1	12,5	8,5	1,4
Singh e Singh (1989)	41,7	19,8	12,5	1,4
Dunster et al (1993)	60,0	24,0	13,0	1,0
Stürmer et al (1994)	71,6	6,8	10,6	0,7
Hamad (1995)	48,5	30,7	13,5	0,8
Heren e Ölmez (1996)	51,2	27,5	12,1	0,9
Richardson e Groves (1997)	65,0	22,0	4,0	1,0
Stephan et al (1999)	54,0	0,4	7,0	0,6
PCA (1999)	60,0	19,0	11,0	1,0
Werner et al (1999)	72,0	9,0	12,0	0,6
Levinson e Akbari (2001)	68,0	14,0	13,0	0,6
Sora et al (2001)	50,0	9,7	7,0	0,4
Rothstein et al (2002)	72,0	17,0	5,0	1,0
Hansen (2002)	61,7	24,9	4,5	0,9
Chandra e Björnström (2002)	63,0	25,0	4,0	1,0

Fonte: Kirchheim (2003, p.60)

A norma brasileira NBR 12989 (ABNT, 1993) define também as exigências físicas para os cimentos Portland brancos, apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Exigências físicas e mecânicas

Características e propriedades		Unidade	Limites			
			CPB-25	CPB-32	CPB-40	CPB
Resíduo na peneira 45 µm		%	≤12,0			≤12,0
Tempo de início de pega		H	≥1,0			≤1,0
Expansibilidade a quente		Mm	≤5,0			≤5,0
Resistência à compressão	3 dias	MPa	≥8,0	≥10,0	≥15,0	≥5,0
	7 dias		≥15,0	≥20,0	≥25,0	≥7,0
	28 dias		≥25,0	≥32,0	≥40,0	≥10,0
Brancura		%	≥78,0			≥82,0
Tempo de fim de pega		H	≤10,0			≤10,0
Expansibilidade a frio		Mm	≤5,0			≤5,0
Teor de material carbonático		%	≤25,0			≤25,0 – 50,0

Fonte: NBR 12989 – ABNT (1993, p.3)

Conforme Mehta e Monteiro (2006, tradução nossa), são muitos os fatores que influenciam diretamente nas características do concreto, podendo causar resultados não esperados para as propriedades da estrutura. Dentre os fatores encontra-se, as dimensões dos agregados, fator água/cimento (a/c), aditivos minerais, grau da hidratação, grau da compactação, entre outros. Passuelo et al (2004) afirma que poderá haver variação da tonalidade em razão aos diferentes tipos de cimento Portland branco, até mesmo cimentos vindos da mesma empresa mas de lotes variados tendem a apresentar uma significativa mudança na coloração, devendo haver rigorosa fiscalização quanto a mudanças do tipo e lote do cimento. Segundo Kirchheim (2004) para os cimentos Portland branco, a finura dos aglomerantes pode corresponder a uma margem relevante de variação das propriedades do concreto no estado fresco e endurecido.

2.2 Concreto Autoadensável e seu Emprego

2.2.1 Introdução

Okamura (1997) relata que no Japão, iniciando em 1983 e durando por muitos anos, os problemas de durabilidade do concreto foi o principal interesse do país, necessitando na época de habilidosos trabalhadores para a compactação e concretagem duráveis de estruturas. No verão de 1988, Ozawa, professor da Universidade de Tokyo, desenvolveu pela primeira vez um bem sucedido concreto autoadensável. Conforme Marques (2011) a tecnologia de concreto autoadensável só foi desenvolvida após o surgimento dos aditivos superplastificantes.

A primeira aplicação de concreto autoadensável foi em uma obra concluída em junho de 1990, no ano seguinte o CAA foi utilizado para construir as torres da ponte-estaiada Shin-kiba Ohashi vista na Figura 9, no Japão e no ano de 1992 CAA leve foi utilizado para a viga principal de outra ponte-estaiada (OKAMURA et al, 2000).

Figura 9 – Ponte Shin-kiba Ohashi, construída em 1991



Fonte: Borja (2011)

Tutikian (2004) enumera as diversas *vantagens* do concreto autoadensável, entre elas encontram-se a aceleração das construções, redução da mão-de-obra no canteiro, melhoria do acabamento final da superfície, aumento da durabilidade por ser mais fácil de adensar, permitir grande liberdade de fôrmas e dimensões, permitir

concretagem em peças de seções reduzidas, eliminar barulho da vibração, torna o local de trabalho mais seguro por diminuir número de operários, pode reduzir o custo final da obra e obter um ganho ecológico comparado aos concretos convencionais.

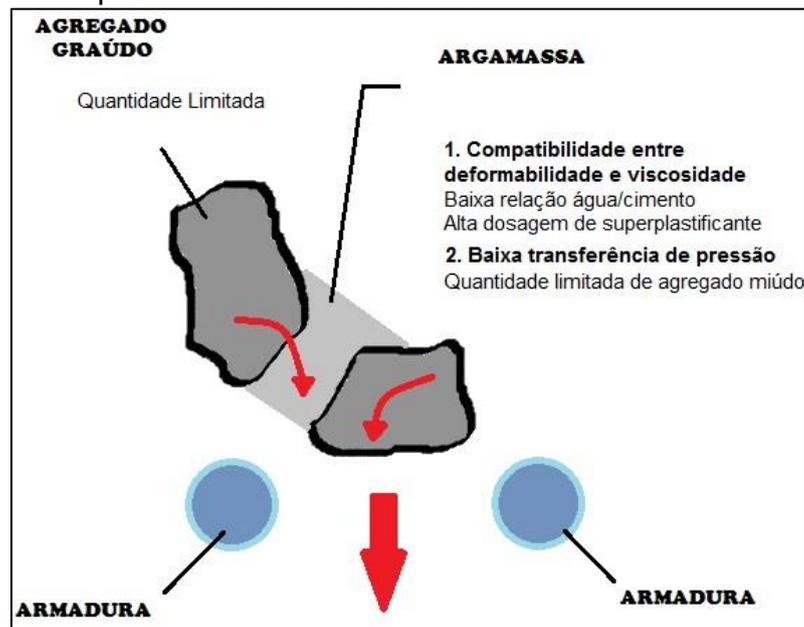
Dentre as *desvantagens* para a utilização do CAA, Tutikian e Dal Molin (2008) descrevem: custo elevado para sua produção, pois é necessário o uso de aditivos superplastificantes e modificadores de viscosidade, produtos com custo alto; necessidade de controle, pois erros na dosagem causariam problemas no concreto, como segregação, perda de fluidez, e em outras propriedades; grande cuidado com o transporte do concreto, para evitar a perda de fluidez e a segregação; cuidado tecnológico em razão do uso de aditivos, necessitando de dosagem em quantidade exata.

2.2.2 Propriedades do Concreto Autoadensável

Com a introdução do CAA, é descoberta uma das áreas da tecnologia do concreto com grande potencial para ser desenvolvida e com capacidade de gerar inovadoras oportunidades quando aplicada de forma correta, porém, é necessário analisar as estruturas de concreto autoadensável por completo, para aperfeiçoar sua aplicação (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

Okamura e Ouhi (2003) afirmam que próximo a obstáculos, a frequência de colisão e de contato entre as partículas de agregado pode aumentar em relação à sua distância, resultando num acréscimo de esforços internos quando o concreto está fluido. Para evitar obstruções de agregados graúdos é necessário adotar uma pasta com alta viscosidade, conforme visto na Figura 10.

Figura 10 – Mecanismo para obter autoadensabilidade



Fonte: Adaptado de Okamura e Ouchi (2003)

Por volta de 1990, o CAA ingressa na Suécia, não demorando a se difundir por toda Europa e internacionalmente. Atualmente as publicações em congressos, simpósios e seminários são cada vez mais numerosas, justificada pela variada utilização da tecnologia, levando a melhores qualidades de concreto, acabamento e diminuição do tempo de concretagem. (GOMES e BARROS, 2009, tradução nossa)

Conforme Ambroise et al (1999) e Tutikian e Dal Molin (2008), no Brasil ainda há lacunas de estudos e publicações quanto ao uso de CAA em obras ou estruturas, sendo, devido ao seu custo, que chega ao dobro dos concretos convencionais, sendo normalmente utilizado em peças difíceis de concretar ou estruturas especiais, porém Ambroise et al (1999) obteve resultados de CAA que apresentaram aumento de 20% no custo em relação aos materiais comparado com os CCV, sendo possível a diminuição desta porcentagem se considerar os gastos com lançamento e adensamento do concreto convencional.

Através de estudo comparativo entre aplicações de CAA e CCV em uma obra residencial de São Paulo, observou-se que o tempo de aplicação do concreto autoadensável ocorreu em 2h20min e do concreto convencional em 4h40min. A concretagem da superlaje da estação Luz do Metrô de São Paulo, utilizou aproximadamente 8 mil m³ de concreto, sendo 600 m³ destes de CAA, com fck menor que 35 MPa, aplicada na região de difícil aplicação do concreto, o engaste da laje com as paredes dos poços (FARIA, 2008).

Para um concreto ser classificado como autoadensável, é necessário atingir três essenciais requerimentos: capacidade de fluidez; habilidade de passagem; e resistência à segregação. A seguir Gomes e Barros (2009) conceituaram os três requerimentos de um concreto autoadensável:

- 1 A capacidade de fluidez é diretamente ligada à habilidade de passagem, característica do concreto ser capaz de fluir dentro de fôrmas sem interferência de fluxo, seja por obstáculos ou formas complexas, e preencher todos os espaços apenas com o peso próprio. Sendo esta característica influenciada pela alta fluidez e coesão da mistura.
- 2 A habilidade de passagem é governada pelos mecanismos de viscosidade da pasta e argamassa e a característica dos agregados. É definida como a capacidade de passar pela armadura, seções estreitas, pequenas e aberturas, sem que haja obstrução do fluxo. Caso haja segregação dificilmente esta propriedade será atendida adequadamente.
- 3 Resistência à segregação é a capacidade de evitar a separação do agregado graúdo da pasta do concreto, sendo essencial para o transporte do material e seu lançamento. Esta propriedade é governada pela viscosidade e coesão da mistura.

2.3 Materiais Constituintes

O concreto é um material compósito, constituído usualmente por agregados finos e graúdos, envolvidos por uma pasta, sendo esta formada por cimento e água, podendo haver adições e aditivos juntamente nesta estrutura (KIRCHHEIM, 2003). Deve se ter cuidado como a seleção dos materiais para a produção de CAA, devido a grande variação das propriedades e composições dos seus compósitos. (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

2.3.1 Agregados

Mehta e Monteiro (2006, tradução nossa) alegam que a porosidade, absorção de água, resistência a compressão, módulo de elasticidade, composição

granulométrica, forma e textura são parâmetros de elevada importância para a tecnologia do concreto.

Conforme Nero e Nunes (2000), para o concreto branco autoadensável pode-se utilizar inúmeros materiais, dependendo do efeito estético e de coloração desejados para o concreto, desde calcário, areias siliciosas correntes aos inertes mármore, granitos, entre outros. Para que os parâmetros de brancura e homogeneidade serem cumpridos (aspectos essenciais para a elaboração de um concreto branco) deve-se utilizar uma areia que apresente teores baixos de argila e é de extrema importância a utilização de inertes bem lavados, livres de materiais orgânicos.

Kirchheim (2003) afirma que as partículas do agregado miúdo influenciam predominantemente na coloração do concreto, podendo influenciar na sua cor final quando utilizado agregados escuros, em razão do agregado miúdo envolver o agregado graúdo, mesmo quando utilizado o cimento Portland branco, pois os espaços entre os agregados graúdos que definirão a tonalidade da peça, sendo os finos presentes nesses locais, por se encontrarem em maior quantidade quando comparado ao cimento branco. Já a escolha do agregado graúdo não influencia muito na tonalidade, se executada a lavagem correta dos materiais, sua coloração apenas influenciará caso haja destacamento do concreto, tornando os agregados graúdos visíveis na estrutura.

De acordo com Passuelo (2004), os agregados utilizados no estado do Rio Grande do Sul já apresentam ótimo comportamento em estado fresco ou endurecido, sendo os agregados graúdos mais utilizados de origem basáltica ou granítica e os agregados miúdos a areia média. Porém estes materiais apresentam tonalidades escuras, contêm material pulverulento ou contaminação por argila, características danosas para a estética restritiva do CAAB, sendo possível adotar agregados com coloração mais clara para obter um controle da aparência superficial das peças concretadas. Mas quando utilizado agregados não tradicionais no concreto pode haver mudança de comportamento da mistura, em razão da forma e textura superficial dos grãos, como exemplo, agregados artificiais de fração fina afetam a trabalhabilidade e a compacidade do concreto em razão das formas irregulares dos agregados artificiais resultando na dificuldade de movimentação e empacotamento no concreto fresco, sendo necessário acréscimo de água para se obter a mesma trabalhabilidade e como consequência o aumento da pasta da

mistura ou recorrer ao uso de aditivos ou superplastificantes para chegar a resistência desejada.

2.3.2 Cimento Portland Branco

O CPB como aglomerante já foi descrito no item 2.1.2.

2.3.3 Adições Minerais

Para compensar problemas devido ao tipo de agregado utilizado, o uso de certas adições minerais se torna necessárias. Sua utilização se torna favorável nos quesitos do desenvolvimento da resistência a compressão e prolongação da durabilidade da estrutura. (PASSUELO, 2004)

Tutikian e Dal Molin (2008) afirmam que para elevar a coesão da mistura e evitar a segregação, devem-se utilizar aditivos modificadores de viscosidade e/ou adições minerais, este último também apresentando papel importante para a resistência e durabilidade do concreto, física e quimicamente. Escolhem-se as adições minerais após análise técnica e econômica, tendo como única restrição áreas superficiais maiores que a do componente substituinte. Os autores ainda descreveram os efeitos químicos e físicos a seguir:

Efeito químico das adições minerais ocorrem devido a capacidade de reação com o Ca(OH)_2 (hidróxido de cálcio), composto frágil formado pela hidratação do cimento Portland. Dessa reação surge o C-S-H (silicato hidratado de cálcio), ocupando os vazios de grandes dimensões presentes na pasta ou na zona de transição, com isso desempenho mecânico e durabilidade do concreto aumentam.

Efeito físico das adições minerais dividem-se em três ações principais: efeito filler, definido como aumento da densidade da mistura devido ao material ocupar os vazios do concreto; refinamento da estrutura de poros e dos produtos de hidratação do cimento, onde partículas das adições agem como nucleação para os produtos de hidratação; e alteração da microestrutura da zona de transição, eliminando ou reduzindo o acúmulo de água que normalmente retém sob os agregados.

Para Neville (1997), com relação aos cimentos, as adições minerais economizam energia, preservam recursos naturais e tem como razão principal de sua utilização

suas vantagens técnicas da sua inclusão no concreto, sendo em muitos casos preferível uso desses materiais para substituição de parcela do cimento Portland.

A classificação de adições minerais quimicamente ativas (constituída de material pozolânico ou cimentante), constituídas por cinza de casca de arroz, cinza volante, escória de alto forno, metacaulim, entre outros; e sem atividade química, construída pelo fíler. O quadro a seguir apresenta as características e consequências do emprego de adições minerais quimicamente ativas nas propriedades do concreto autoadensável. No Quadro 1 são apresentadas características de algumas adições minerais que modificam propriedades do Concreto Autoadensável.

A *cinza volante* é obtida através da precipitação mecânica ou eletrostática dos gases de exaustão de estações alimentadas por carvão, sendo a pozolana mais artificial comum. Apresenta partículas esféricas e de elevada finura, com diâmetro menor que $1\mu\text{m}$ a $100\mu\text{m}$. Ao utilizar cinza volante no concreto a trabalhabilidade é aumentada e há redução de demanda da água (NEVILLE, 1997). Reffete (2005) também diz que ao utilizar a cinza volante pode-se reduzir o consumo de superplastificante, e que a finura adequada para ser empregue em concretos autoadensáveis é entre 500 e $600\text{m}^2/\text{kg}$.

Figura 11- Cinza volante de Candiota



Fonte: Próprio autor

Quadro 1 – Características e consequências do emprego de adições minerais nas propriedades do CAA

Adição mineral	Cinza volante	Escória de alto forno	Sílica ativa	Metacaulim	Cinza de casca de arroz
Origem	Calcinação de carvão pulverizado em usinas termoeletricas (gerando energia)	Subproduto não-metálico resultante do processo de obtenção do ferro gusa	Subproduto resultante do processo de obtenção do ferro-silício e do silício metálico	Calcinação de alguns tipos especiais de argila ou obtido através do tratamento do resíduo da indústria de papel	Calcinação da casca de arroz
Forma e textura	Esférica e lisa	Prismática e áspera	Esférica e lisa	Prismática e áspera	Alveolar e áspera
Massa específica (kg/dm ³)	2,35	Xxxx	2,20	2,40	2,20 a 2,60
Superfície específica (m ² /kg)	300 a 700	300 a 700	13.000 a 30.000	Variável em função da moagem	50.000 a 100.000
Tamanho médio das partículas	Variável em função da moagem	Variável em função da moagem	0,1 a 0,2µm	Variável em função da moagem	Variável em função da moagem
Efeitos no CAA fresco quando utilizados na substituição do cimento	Redução da exsudação e segregação Melhores condições de fluidez em função do formato esférico das partículas Normalmente reduz o consumo de superplastificantes	Aumento da coesão Redução da exsudação e segregação Não contribui para a fluidez em função da forma e textura das partículas Pouco altera o consumo de superplastificantes	Elevadíssimo aumento da coesão Redução acentuada da exsudação e segregação Melhores condições de fluidez em função do formato esférico das partículas Aumento no consumo de superplastificante, teores acima de 5% da massa do cimento	Grande aumento da coesão Redução acentuada da exsudação e segregação Não contribui para a fluidez em função da forma e textura das partículas Aumento no consumo de superplastificantes	Elevadíssimo aumento da coesão Redução acentuada da exsudação e segregação Piores condições de fluidez em função da forma e textura das partículas Elevado aumento no consumo de superplastificante
Efeitos no CAA endurecido quando utilizados na substituição do cimento	Pequena alteração da resistência à compressão e aumento da durabilidade	Pequena alteração da resistência à compressão e aumento da durabilidade	Melhoria notável da resistência à compressão e aumento da durabilidade	Melhoria notável da resistência à compressão e aumento da durabilidade	Melhoria notável da resistência à compressão e aumento da durabilidade

Fonte: Adaptado de Tutikian e Dal Molin (2008, p. 31-32)

2.3.4 Água

A água é de fundamental importância para o funcionamento do concreto, é responsável pelas reações de hidratação do cimento e chega a representar cerca de 20% de seu volume, sendo também usada na cura. (BATTAGIN e BATTAGIN, 2010). Conforme Tutikian e Dal Molin (2008) a água para o CAA deve apresentar as mesmas características que a utilizado pra CCV.

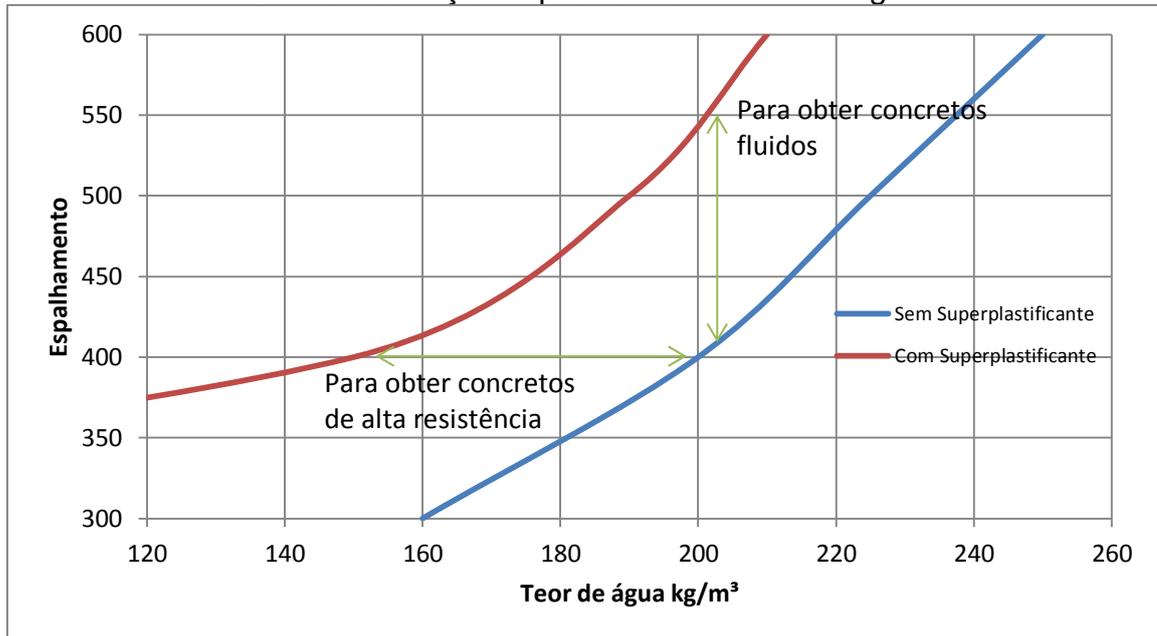
A NBR 15900 – Água para amassamento do concreto (ABNT, 2009) define que águas vindas do abastecimento público são adequadas para o uso em concreto e não necessitam de ensaios para utilização, caso a água seja vinda de esgoto ou de esgoto tratado a mesma não pode ser utilizada para o uso em concreto.

2.3.5 Aditivos

Segundo Gomes e Barros (2009) os aditivos devem atender às exigências normativas de cada país, os tipos de aditivos mais utilizados são os superplastificantes e os modificadores de viscosidade, porém também existem os incorporadores de ar, mas de menor utilização.

Os aditivos superplastificantes são de extrema relevância na utilização dos CAA, pois tornam o concreto mais fluído. O principal efeito das moléculas dos superplastificantes é o de se enrolar em volta das partículas de cimento, carregando negativamente, de modo a fazê-las se repelirem, resultando numa defloculação e dispersão das partículas de cimento, tornando possível a produção de concretos com elevada resistência ou trabalhabilidade. Para uma mesma relação a/c e mesmo teor de água na mistura, o uso de superplastificante aumenta trabalhabilidade do concreto, aumentando o abatimento de 75 mm para 200 mm, seguindo com a mistura coesiva (NEVILLE, 1997).

Gráfico 1 – Relação espalhamento e teor de água



Fonte: Adaptado de Neville (1997, p. 264)

Conforme Passuelo (2004) as características específicas do cimento branco, juntamente com o usual emprego de agregado artificiais, fazem com que a trabalhabilidade do concreto autoadensável branco seja menor que a de concretos cinzas de mesma relação água/cimento. O uso de aditivos se faz necessário para garantir uma consistência fluida ao concreto no estado fresco.

A NBR EB-1763 – Aditivos para concreto de cimento Portland (ABNT, 1992) fixa condições elegíveis dos materiais a serem utilizados como aditivos para concretos compostos de cimento Portland. Fonseca e Nunes (1995) afirmam que os aditivos aplicados em estruturas de concreto branco devem ser analisados criteriosamente para não influenciar negativamente a coloração final do concreto, sendo indicada a utilização de aditivos à base de carboxilatos ou melamínicos, por possuírem coloração clara. Os aditivos à base de naftaleno sulfonado tendem a apresentar coloração mais escura.

2.3.6 Caracterização dos materiais

Para todos os materiais foram feitos ensaios de caracterização, conforme especificado no Quadro 2.

Quadro 2 – Ensaio de caracterização dos materiais

Material	Norma	Ensaio
Areia	NBR NM 52 (ABNT, 2009)	Massa específica para agregados miúdos
	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	Massa unitária
	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	Granulometria
	NBR NM 30 (ABNT, 2001)	Absorção de água de agregados miúdos
Brita	NBR NM 53 (ABNT, 2002)	Massa específica para agregados graúdos
	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	Massa unitária
	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	Granulometria
	NBR NM 53 (ABNT, 2002)	Absorção de água de agregados graúdos
Cimento	NM 23 (ABNT, 2001)	Massa específica para materiais finos
Adição	NM 23 (ABNT, 2001)	Massa específica para materiais finos
Aditivo	NBR 10908 (ABNT, 2008)	Teor de sólidos

Fonte: Próprio autor

2.3.7 Ensaio no estado fresco

Utilizam-se reômetros, equipamentos destinados a determinar parâmetros de tensão de escoamento e viscosidade plástica, para definir as propriedades de resistência ao cisalhamento e da viscosidade plástica sob diferentes taxas de deformação. Entretanto, o uso destes reômetros é limitado, não possuindo padronização nos aparelhos e sendo de difícil acesso entre pesquisadores. Portanto, na ausência de um reômetro, utiliza-se métodos menos complexos. sendo os mais utilizados para avaliar o comportamento reológico no estado fresco do CAA diferentes dos CCV, tendo que determinar propriedades como fluidez por seu peso próprio e capacidade de preencher espaços, ente outras, necessitando normalmente realizar os ensaios em conjunto para obter uma análise completa do comportamento do concreto. (MARANGON, 2006)

Apenas um ensaio não é capaz de determinar as três principais propriedades do concreto autoadensável: fluidez, habilidade passante e resistência a segregação (TUTIKIAN E DAL MOLIN, 2008). Portanto, a seguir é apresentado o Quadro 3, especificando os ensaios desenvolvidos, definindo sua importância quanto as referidas propriedades do CAA:

Quadro 3 – Ensaio para concreto autoadensável quanto suas relevâncias

Ensaio	Utilização		Propriedades		
	Laboratório	Canteiro	Fluidez	Habilidade Passante	Coesão
Slump Flow	R	AR	AR	NR	PR
Slump Flow T 50	AR	R	AR	NR	PR
V-Funnel	R	PR	R	NR	PR
V-Funnel 5 min	R	PR	PR	NR	AR
L-Box	R	PR	NR	AR	R
U-Box	R	PR	NR	AR	R
Fill-Box	R	NR	NR	R	R
U-Pipe	R	NR	PR	NR	AR
rimet	R	PR	R	PR	PR
J-Ring	AR	AR	PR	AR	R
Cone invertido	AR	AR	AR	NR	R
Teor de Ar Aprisionado	AR	NR	NR	NR	AR

Fonte: Adaptado de Peterssen (1999) e Branco (2012)

Apresentando a definição das siglas na tabela a seguir:

NR – Não Relevante;
 PR – Pouco Recomendável;
 R – Recomendável;
 AR – Altamente Recomendável;

2.3.8 Método de Dosagens

Conforme Helene (2005) afirma, o estudo de dosagem dos concretos de cimento Portland é definido pelos procedimentos necessários à obtenção da melhor proporção entre os materiais constitutivos do concreto, ou seja, seu traço.

Dosagem de concreto é definido como o processo de seleção de materiais constituintes do concreto, determinando suas proporções de utilização com o objetivo de produzir, de forma mais econômica, um concreto com propriedades mínimas determinadas, como resistência, durabilidade e consistência adequadas (NEVILLE, 1997).

Gomes e Barros (2009) afirmam que para concretos autoadensáveis os métodos de dosagens diferem dos utilizados para os concretos convencionais vibrados, entretanto, geralmente são empíricos, assim como os CCV, tendo como principal fundamento o atendimento a propriedades que estabelecem uma reação entre a habilidade das misturas de fluir com facilidade nas formas, independente do grau de dificuldade, complexidade, taxa de armadura, e a estabilidade das misturas, sem segregar o material.

Por ser um concreto composto por diversos materiais, o CAA apresenta sua dosagem mais complexa que a de CCV, a seguir é exibido o Quadro 4 apresentando os diversos métodos de dosagens elaborados para CAA. Conforme Gomes e Barros (2009), todos estes métodos de dosagem desenvolvidos contribuíram para o melhor entendimento do comportamento do CAA e alcançou com êxito, a obtenção de mistura que atendem às propriedades deste modelo de concreto.

Quadro 4 – Métodos de dosagem de CAA

Método de dosagem
Método de Okamura et al.
Método de Saak et al.
Método de Su et al.
Método de Gomes, Gettu e Agulló
Método de Tutikian
Método de Repette-Melo
Método da EFNARC
Modelo de empacotamento compressível
Método de Peterson et al.
Método de Tutikian e Dal Molin

Fonte: Adaptado de Gomes e Barros (2009)

2.3.9 Método de Dosagem Gomes, Gettu e Agulló

O método propõe a dosagem de um CAA na qual deve-se otimizar a composição da pasta e o esqueleto granular separadamente. Apresentando uma composição final buscando o conteúdo de pasta necessário para que o concreto apresente a característica de um CAA. O modelo sugere que a viscosidade e a fluidez da pasta governem o comportamento de fluxo do concreto. O método assume que a composição da pasta não interfere na determinação da proporção entre os agregados, permitindo a independência de ambas as fases e que a composição da pasta com o volume mínimo associada com o esqueleto granular são necessários para garantir as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido (GOMES E BARROS, 2009).

Gomes e Barros (2009) Define que o método deve ser executado em três fases listadas a seguir:

1. Obter a composição da pasta.
2. Determinar a proporção de mistura dos agregados;
3. Selecionar o conteúdo de pasta.

E como há a independência dos parâmetros de mistura ou variáveis, os seguintes critérios são incluídos para obtenção das proporções da mistura:

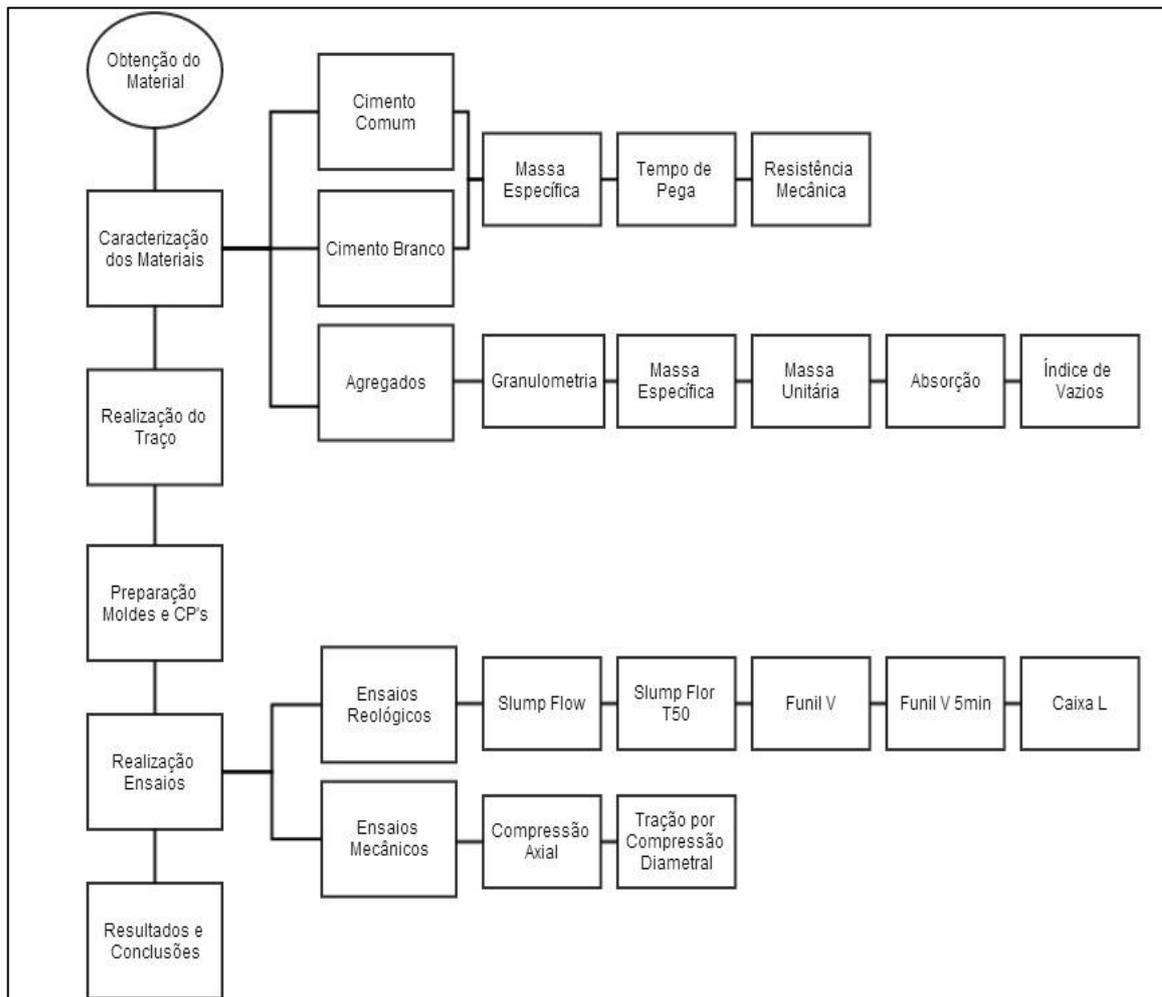
1. Determinação da dosagem do superplastificante (sp) e filler (f);
2. Obtenção da proporção dos agregados pela densidade seca da mistura;
3. Determinação do volume de pasta que requisitam ao concreto autoadensibilidade, avaliados em termos das propriedades: habilidade de preenchimento, habilidade passante entre obstáculos e resistência à segregação.

3. METODOLOGIA DE PESQUISA

3.1 Considerações iniciais

A metodologia empregada neste trabalho é de caráter experimental, apresentando propriedades, procedimentos e métodos para a obtenção de CAA's, sendo que, para todo ensaio realizado, adotou-se as normas técnicas estabelecidas para cada procedimento. Este capítulo é dividido em quatro grandes etapas: Obtenção dos materiais para elaboração do traço; caracterização individual dos materiais; desenvolvimento do traço e realização dos ensaios propostos. A seguir é apresentando o fluxograma das atividades do programa metodológico da pesquisa de forma minuciosa.

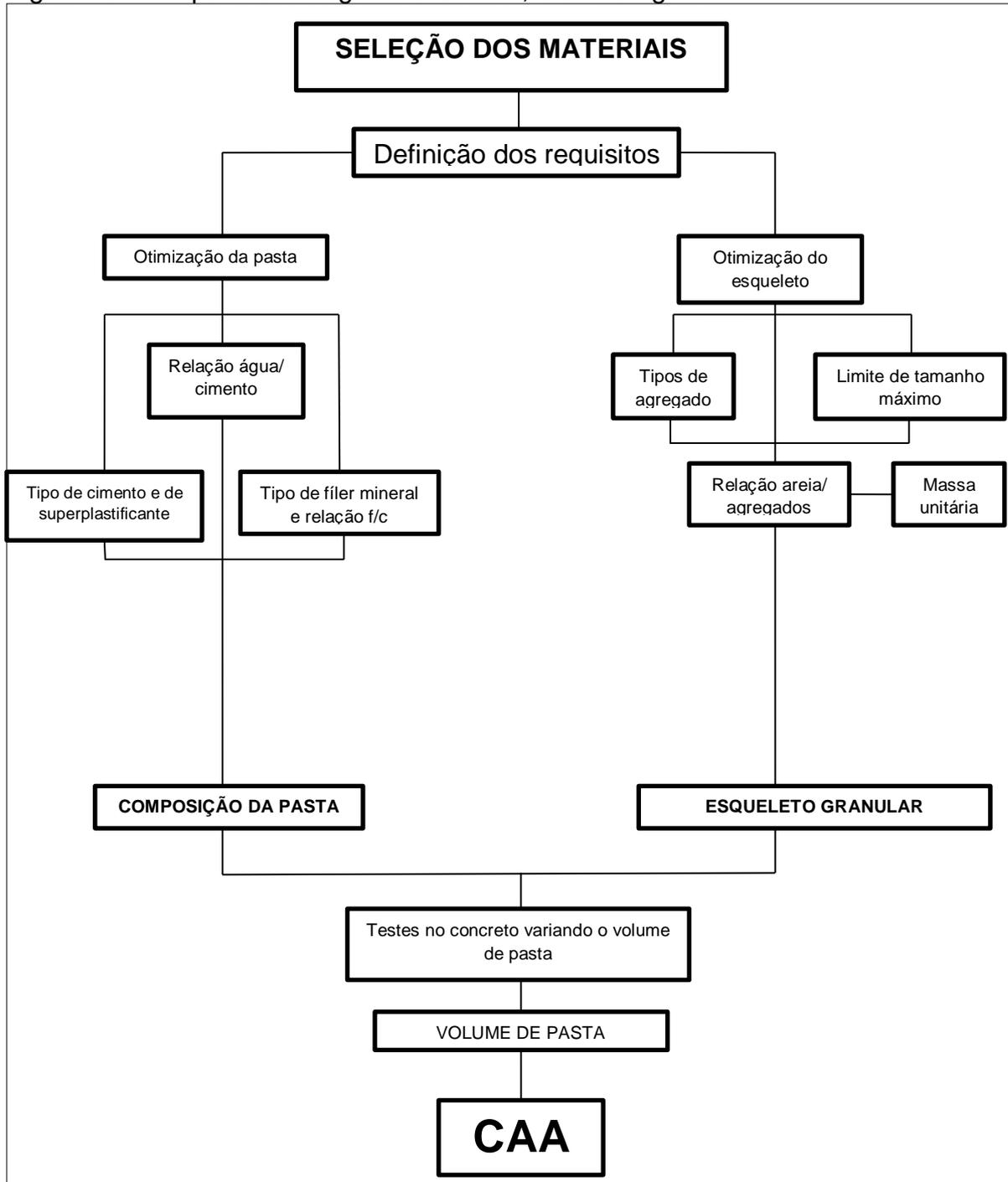
Figura 12 – Fluxograma completo de atividades



Fonte: Próprio autor

A elaboração deste trabalho visa o desenvolvimento de dosagem do CAAB através do método de dosagem experimental de Gomes, Gettu e Agulló, definido anteriormente. Conforme Gomes e Barros (2009) este método é experimental e feito para se obter a dosagem de concretos autoadensáveis de alta resistência.

Figura 13 – Etapas da dosagem de Gomes, Gettu e Agulló



Fonte: Adaptado de Gomes e Barros (2009, p. 145)

3.2 Caracterização dos Materiais

Na pesquisa serão utilizados materiais caracterizados e avaliados em laboratório baseadas nas normas vigentes, permitindo com que os resultados sejam utilizados em pesquisas futuras.

Para a confecção dos corpos-de-prova (CP), os seguintes materiais empregues:

- a) Cimento Portland estrutural branco:
 - i) CPB – cimento Portland branco, classe 32;
- b) Cimento Portland pozolânico – CP IV, classe 32;
- c) Areia quartzosa da região de Manoel Viana;
- d) Agregado graúdo de origem basáltica, da empresa Pedra Rosada, retirada na região de Alegrete, com dimensão máxima característica de 12mm – brita 0;
- e) Aditivo superplastificante ADVA Cast 525;
- f) Aditivo modificadores de viscosidade V-Mar 3;
- g) Adições minerais de cinza volante.

Os materiais utilizados são descritos a seguir.

3.2.1 Agregados

O agregado miúdo a ser utilizado foi advindo de areias quartzosas provenientes na cidade de Manoel Viana, Rio Grande do Sul. Necessitando ser lavada, seca ao natural, peneirada e armazenada. Regulamentada pela NBR NM 49 (ABNT, 2001), para a determinação da presença de impurezas.

O agregado graúdo foi de origem basáltica providas da cidade de Alegrete, Rio Grande do Sul, sendo utilizada peneira com malha passante de 12mm e retida na malha de 5mm, sendo classificada como brita 0. Para seu uso necessitou lavar, secar ao ar e armazenar este material.

Os ensaios realizados para a caracterização dos agregados serão apresentados a seguir:

3.2.1.1 Composição Granulométrica

A distribuição granulométrica dos agregados graúdos e miúdos foi determinada por peneiramento, de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR NM 248 (ABNT, 2003). A classificação das peneiras obtida através de um conjunto de peneiras sucessivas atendendo as normas NM-ISSO 3310-1 ou 2.

A aparelhagem necessária para o ensaio consiste em: quarteador, balança com resolução de 0,1% da massa da amostra, estufa que mantenha temperatura no intervalo de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$, peneiras da série normal ou intermediária com tampa e fundo, bandejas, escova e pincel.

O procedimento se deu com o quarteamento dos agregados previamente secos, através do quarteador, para agregados finos utilizou-se 500g de amostra e para agregados graúdos 2000g. Para ensaiar ambos os tipos de agregados deve-se colocar no conjunto de peneiras os agregados e efetuar a agitação mecânica ou manual, sendo neste trabalho feito manualmente. Obter a massa de cada peneira antes da agitação e após isso registrar a massa retida em cada peneira. Para obter o resultado final realiza-se novamente o ensaio com novo quarteamento, a fim de obter os resultados da curva granulométrica.

Na Figura 14 é visto o procedimento de peneiramento mecânico dos materiais, e no

Peneira (mm)	Material Retido (g)	Percentual Retido (%)	Percentual Retido Acumulado (%)	Percentual Passante Acumulado (%)
25	0	0	0	100
19	0	0	0	100
12,7	0	0	0	100
9,5	0	0	0	100
6,35	0	0	0	100
4,75	0	0	0	100
2,4	1,8	0,36	0,36	99,64
1,18	4,6	0,92	1,28	98,72
0,6	12,45	2,49	3,77	96,23
0,3	243,7	48,74	52,51	47,49
0,15	223,7	44,74	97,25	2,75
0	13,75	2,75	100	0
Total	500	100	155,17	
Módulo de Finura		1,55	$D_{\text{máx}}(\text{mm})$	2,4

Fonte: Próprio autor

Tabela 7 – Resultados da granulometria da brita

Granulometria agregado graúdo				
Peneira (mm)	Material Retido (g)	Percentual Retido (%)	Percentual Retido Acumulado (%)	Percentual Passante Acumulado (%)
25	0	0	0	100
19	0	0	0	100
12,7	7,5	0,75	0,75	99,25
9,5	40,4	4,04	4,79	95,21
6,35	472,8	47,28	52,07	47,93
4,75	315	31,5	83,57	16,43
2,4	161,2	16,12	99,69	0,31
1,2	0	0	99,69	0,31
0,6	0	0	99,69	0,31
0,3	0	0	99,69	0,31
0,15	0	0	99,69	0,31
0	3,1	0,31	100	0
Total	1000	100	639,63	
Módulo de Finura		6,40	$D_{m\acute{a}x}(mm)$	12,7

Fonte: Próprio autor

Gráfico 2 a curva elaborada para o agregado graúdo e miúdo.

Figura 14 – Peneiramento dos agregados



Fonte: Próprio autor

Tabela 6 – Resultados da granulometria da areia

Granulometria agregado miúdo

Peneira (mm)	Material Retido (g)	Percentual Retido (%)	Percentual Retido Acumulado (%)	Percentual Passante Acumulado (%)
25	0	0	0	100
19	0	0	0	100
12,7	0	0	0	100
9,5	0	0	0	100
6,35	0	0	0	100
4,75	0	0	0	100
2,4	1,8	0,36	0,36	99,64
1,18	4,6	0,92	1,28	98,72
0,6	12,45	2,49	3,77	96,23
0,3	243,7	48,74	52,51	47,49
0,15	223,7	44,74	97,25	2,75
0	13,75	2,75	100	0
Total	500	100	155,17	
Módulo de Finura		1,55	D _{máx} (mm)	2,4

Fonte: Próprio autor

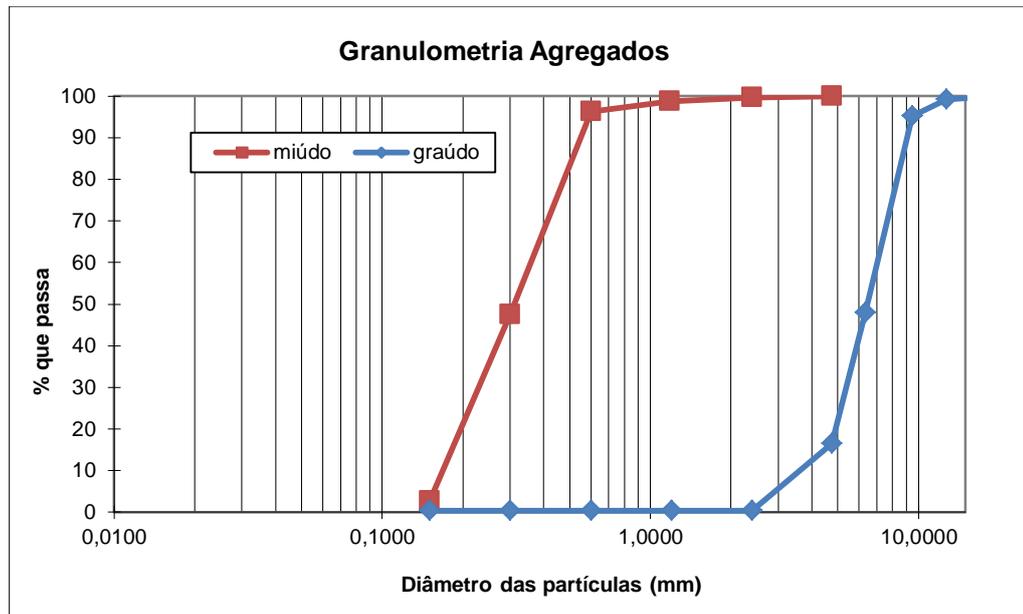
Tabela 7 – Resultados da granulometria da brita

Granulometria agregado graúdo

Peneira (mm)	Material Retido (g)	Percentual Retido (%)	Percentual Retido Acumulado (%)	Percentual Passante Acumulado (%)
25	0	0	0	100
19	0	0	0	100
12,7	7,5	0,75	0,75	99,25
9,5	40,4	4,04	4,79	95,21
6,35	472,8	47,28	52,07	47,93
4,75	315	31,5	83,57	16,43
2,4	161,2	16,12	99,69	0,31
1,2	0	0	99,69	0,31
0,6	0	0	99,69	0,31
0,3	0	0	99,69	0,31
0,15	0	0	99,69	0,31
0	3,1	0,31	100	0
Total	1000	100	639,63	
Módulo de Finura		6,40	D _{máx} (mm)	12,7

Fonte: Próprio autor

Gráfico 2 – Curva granulométrica dos agregados



Fonte: Próprio autor

Conforme visto no

Granulometria agregado miúdo

Peneira (mm)	Material Retido (g)	Percentual Retido (%)	Percentual Retido Acumulado (%)	Percentual Passante Acumulado (%)
25	0	0	0	100
19	0	0	0	100
12,7	0	0	0	100
9,5	0	0	0	100
6,35	0	0	0	100
4,75	0	0	0	100
2,4	1,8	0,36	0,36	99,64
1,18	4,6	0,92	1,28	98,72
0,6	12,45	2,49	3,77	96,23
0,3	243,7	48,74	52,51	47,49
0,15	223,7	44,74	97,25	2,75
0	13,75	2,75	100	0
Total	500	100	155,17	
Módulo de Finura		1,55	D _{máx} (mm)	2,4

Fonte: Próprio autor

Tabela 7 – Resultados da granulometria da brita

Granulometria agregado graúdo

Peneira (mm)	Material Retido (g)	Percentual Retido (%)	Percentual Retido Acumulado (%)	Percentual Passante Acumulado (%)
25				
19				
12,7				
9,5				
6,35				
4,75				
2,4				
1,18				
0,6				
0,3				
0,15				
0				
Total				
Módulo de Finura				

25	0	0	0	100
19	0	0	0	100
12,7	7,5	0,75	0,75	99,25
9,5	40,4	4,04	4,79	95,21
6,35	472,8	47,28	52,07	47,93
4,75	315	31,5	83,57	16,43
2,4	161,2	16,12	99,69	0,31
1,2	0	0	99,69	0,31
0,6	0	0	99,69	0,31
0,3	0	0	99,69	0,31
0,15	0	0	99,69	0,31
0	3,1	0,31	100	0
Total	1000	100	639,63	
Módulo de Finura		6,40	D _{máx} (mm)	12,7

Fonte: Próprio autor

Gráfico 2, o diâmetro máximo do agregado miúdo foi de 2,4 mm e o do agregado graúdo de 12,7 mm. O módulo de finura do agregado miúdo foi de 1,55 mm e o do agregado graúdo 6,40 mm.

3.2.1.2 Massa unitária e Volume de Vazios DNR 19498

Normalizada pela norma NBR NM 45 (ABNT, 2006), tem como objetivo obter a massa unitária e do volume de vazios de agregados graúdos e miúdos, definindo a massa unitária como a relação entre a massa do agregado e o volume do recipiente e volume de vazio como os espaços entre os grãos de uma massa de agregado.

A aparelhagem necessária é: balança com resolução de 50g, haste de adensamento, estufa que mantenha temperatura no intervalo de (105 ± 5) °C, placa de calibração, pá ou concha e recipiente.

A equação a seguir apresenta a fórmula para calcular a massa unitária:

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad \dots(1)$$

Em que:

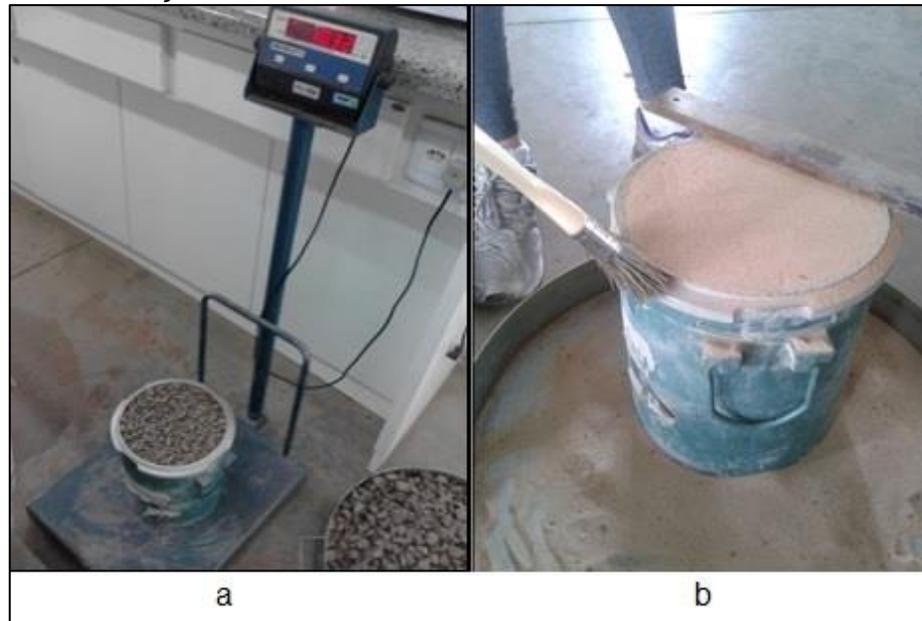
ρ_{ap} = massa unitária (kg/m³);

m_{ar} = massa do recipiente mais agregado (kg);

m_r = massa do recipiente vazio (kg);

V = volume do recipiente (m^3).

Figura 15 – Determinação da massa unitária



Fonte: Próprio Autor

Na Figura 15 a é visto a determinação do peso do agregado graúdo, na Figura 15 b o preparo do recipiente para obter o valor da massa unitária da areia. Conforme a equação 1 o valor para a massa unitária da areia utilizada na pesquisa foi de $\rho_{ap} = 1,59 \text{ g/cm}^3$, obtido através de uma massa ($m_{ar} - m_r$) = 12060 g e $V=7560 \text{ cm}^3$ e a massa unitária da brita de $\rho_{ap} = 1,375 \text{ g/cm}^3$, ($m_{ar} - m_r$)= 10320 g e $V = 7560 \text{ cm}^3$.

3.2.1.3 Massa Específica do Agregado Miúdo

A DMER-ME 198(1998) como objetivo estabelecer o método de determinação da massa específica e massa específica aparente de agregados miúdos com o frasco de Chapman, definindo em norma que massa específica é a relação entre massa do agregado seco e seu volume, excluindo poros permeáveis e que na massa específica aparente incluem-se os poros permeáveis.

Para preparação de amostra deve-se obter 1kg de agregado miúdo, por quartamento, coloca-lo de molho por 24 horas e após isto remover a amostra da água e estendê-la sobre superfície plana, para secagem uniforme, colocar o agregado miúdo em molde sem comprimi-lo e efetuar 25 golpes de compactação

com haste de socamento, se ainda houver umidade superficial, o agregado conservará a forma do molde. Efetuar nova secagem e realizar ensaios a intervalos frequentes até que o cone de agregado miúdo desmorone, chegando assim a sua condição de saturado superfície seca.

O procedimento se dá em pesar $(500 \pm 0,1)$ g de amostra seca (m), colocar em frasco de 500 cm^3 de capacidade, com erro inferior a $0,15 \text{ cm}^3$ a 20°C , registrar a massa do conjunto (m_1). Encher o frasco até a marca de 500ml, movendo-o de forma para remover as bolhas de ar da amostra, e por fim colocar em banho mantido a temperatura constante de $(21 \pm 2)^\circ\text{C}$. Após esperar 1 hora, completar com água até a marca de 500 cm^3 e determinar a massa total com precisão de $0,1\text{g}$ (m_2).

De acordo com este procedimento a equação a seguir apresenta a forma de determinar as massas específicas do agregado miúdo seco:

$$\mu_1 = \frac{m}{V - V_a} \quad \dots (2)$$

Em que:

μ_1 = Massa específica aparente do agregado seco (g/cm^3);

m = massa da amostra seca em estufa (g);

V = volume do frasco aferido (cm^3);

V_a = Volume de água adicionado ao frasco aferido (cm^3),

Sendo:

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\mu_a} \quad \dots (3)$$

Em que:

m_1 = Massa do conjunto agregado e frasco (g);

m_2 = Massa total (agregado + água + frasco) (g);

μ_a = massa específica da água (g/cm^3);

V_a = Volume de água adicionado ao frasco aferido (cm^3),

Figura 16 – Ensaio massa específica da areia



Fonte: Próprio autor

A Figura 16 mostra o ensaio sendo realizado no frasco de Chapman. Neste ensaio foi encontrado o valor de $m = 500\text{g}$, $V = 390\text{ cm}^3$ e $V_a = 20\text{cm}^3$, substituindo este valor na Equação 1, o valor obtido para a massa específica desta areia foi de $\mu_1 = 2,631\text{ g/cm}^3$.

3.2.1.4 Absorção da água do Agregado Miúdo

Normatizada através da NBR NM 30 (ABNT, 2001), o procedimento se deu por pesar uma amostra de 1 kg de material seco, emergir a amostra em água pelo período de 24 horas e, após isto, deixou-se a amostra em local seco, plano e com corrente de ar de ambiente externo, revolvendo-a até que esta esteja na condição em que os grãos não consigam aderir facilmente, após isto, preenche-se o interior do molde de tronco-cônico metálico e aplica-se 25 golpes, caso o material após o disforme continue no formato do molde deve-se revolver a amostra até se encontrar na condição ideal, para então determinar a absorção de água através da equação:

$$A = \frac{(m_s - m) \times 100}{m} \quad \dots(4)$$

Em que:

m_s = Massa da amostra na condição saturada de superfície seca (g);

m = Massa da amostra seca em estufa (g);

A = Absorção de água (%)

A Figura 17 mostra parte da realização deste ensaio. Os valores de $m_s = 456$ g, $m = 453,3$ g. Substituindo estes valores na equação 3 o valor obtido para a absorção de água deste agregado foi igual a **$A = 0,6$ %**. Conforme a NBR 7211 (2009), os limites para a absorção ficam a critério do consumidor.

Figura 17 –Resultado após retirada do cone para obtenção da absorção de água



Fonte: Próprio autor

3.2.1.5 Massa Específica do Agregado Graúdo

Normatizado pela NBR NM 53 (ABNT, 2003), tem como objetivo determinar a massa específica de agregados graúdos. Inicialmente deve-se coletar a amostra seguindo os procedimentos da NBR NM 26 (ABNT, 2009) e reduzi-la de acordo com a NBR NM 27 (ABNT, 2001). Lavar o agregado graúdo para remoção do pó ou outro material da superfície e seca-lo em estufa que mantenha temperatura no intervalo de (105 ± 5) °C. Esfriar em temperatura ambiente durante 1 a 3 horas. A massa mínima para amostras de brita 0 (dimensão máxima de 12,5mm) é de 2 kg.

Então deve submergi-lo em água em temperatura ambiente pelo tempo de (24 ± 4) horas; enxugar a amostra com um pano limpo após a submersão, de maneira a eliminar toda a água visível do agregado. Imediatamente após deve-se pesar novamente a amostra, com uma balança de precisão de 1g, para obter-se a massa

de agregado saturado com superfície seca (m_s). Posteriormente a pesagem o material será colocado em um recipiente metálico, submergindo a amostra em água mantida a uma temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$. Para então suspender o recipiente à balança e obter a massa em água do material (m_a). Assim que executado o procedimento a amostra será novamente levada à estufa, à uma temperatura de $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ e, assim que estiver seca, deverá descansar para que esfrie, e será obtido o peso da amostra seca (m).

Através da equação a seguir é possível obter os resultados da massa específica para agregados graúdos na condição saturado superfície seca:

$$\mu_s = \frac{m_s}{m_s - m_a} \quad \dots (5)$$

Em que:

μ_s = massa específica do agregado na condição saturado superfície seca (g/cm^3);

m_s = massa amostra na condição saturada superfície seca (g);

m_a = massa em água da amostra (g)

Na Figura 18 – Ensaio massa específica agregado graúdo observa-se a realização do ensaio. Para este ensaio obteve-se os valores de $m = 1967,6$ g, $m_s = 2014,8$ g e $m_a = 1556,13$ g. Substituindo na equação obtém-se o valor de massa específica de $\mu_s = 2,85$ g/cm³. Conforme a NBR 7211 (2009), os limites para a absorção ficam a critério do consumidor.

Figura 18 – Ensaio massa específica agregado graúdo



Fonte: Próprio autor

3.2.1.6 Absorção de água do Agregado Graúdo

O ensaio de absorção de água do agregado graúdo é realizado em conjunto com o ensaio de massa específica do agregado graúdo. A NBR NM 53 (ABNT, 2002) foi utilizada para realizar o ensaio. Para a obtenção do resultado utiliza-se a seguinte equação:

$$A = \frac{ms - m}{m} * 100$$

...(6)

Em que:

m = Massa ao ar da amostra seca (g);

ms = Massa ao ar da amostra na condição saturada de superfície seca (g);

A = Absorção de água do agregado graúdo (%)

Substituindo os valores obtidos o valor de absorção de água do agregado graúdo foi de **A = 2,4 %**.

Figura 19 – Pesagem do material para ensaio



Fonte: Próprio autor

3.2.2 Aditivos Superplastificante

Para se tornar um concreto autoadensável é necessária à utilização de aditivos superplastificantes para obter a consistência adequada da mistura. O aditivo utilizado na pesquisa foi o ADVA Cast 525, doado pela empresa Grace Construction Products. A norma para ensaios de caracterização de aditivos para concreto e argamassas é a NBR 10908 (ABNT, 2008), no trabalho foi executado o ensaio de determinação do teor de sólidos, visto na sequência. A massa específica foi adotada a fornecida pela empresa doadora.

Conforme informou o fabricante, a massa específica do ADVA CAST 525 é de **1,06 g/cm³**.

3.2.2.1 Determinação do teor de sólidos

Normatizado pela NBR 10908 (ABNT, 2008), tem como objetivo a determinação do teor de sólidos dos aditivos. Foi utilizado o método de referência para sua obtenção.

O procedimento inicia com a secagem inicial, em estufa com temperatura constante a $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$, de areia, distribuir a areia seca, contendo de 25 a 30 g, em capsulas, não esquecendo de tarar a balança, colocar 10g da amostra de aditivo, de massa com aproximação de 0,0001g, juntamente na capsula. Secar a amostra

novamente na estufa, durante período mínimo de 8 horas, esfriar e pesar. Retornar a estufa a amostra por 2 horas e repetir o procedimento, sempre repetindo o processo até que não haja alteração de resultados nas três últimas medições.

O teor de resíduo sólido, em cada determinação, é expresso em porcentagem através da equação a seguir:

$$r = \frac{m_2}{m_1} \times 100 \quad \dots(7)$$

Em que:

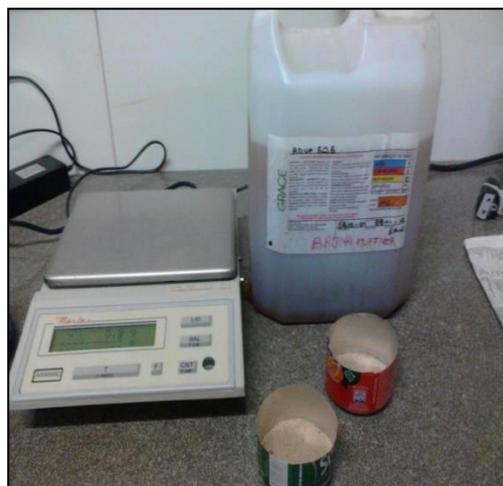
r = teor de resíduos sólidos (%);

m1 = massa da amostra (g);

m2 = massa do resíduo seco (g).

A Figura 20 apresenta os recipientes utilizados para a realização da pesagem das amostras. O ensaio de teor de sólidos presentes no aditivo superplastificante indicou uma porcentagem de sólidos de **r = 22,8%**.

Figura 20 – Ensaio de teor de sólidos



Fonte: Próprio autor

3.2.3 Água

Foi utilizada água provinda da rede de abastecimento de água potável local, apresentando portabilidade garantida, para a moldagem dos corpos-de-prova, sendo assim não é necessário à realização de ensaios na água. A massa específica definida no trabalho foi de $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$.

3.2.4 Cimento

O cimento utilizado como referência será o cimento Portland (CP-IV), apresentando adições pozolânicas, de grande importância para concretos autoadensáveis e por ser de fácil acesso na região. O CPB juntamente com o CP-IV, foram da origem de um mesmo lote de fabricação, para não haver discrepância de resultados, assim como apresentando classe 32, para melhor obtenção das relações custo/benefício.

3.2.3.1 Massa Específica do Cimento

Ensaio regulamentado pela NBR NM 23 (ABNT, 2001), tem como objetivo estabelecer o método de determinar a massa específica do cimento Portland através do frasco volumétrico de Le Chatelier, devendo utilizar um líquido que não reaja com o cimento. Neste trabalho foi utilizado querosene.

A aparelhagem para o ensaio é: frasco volumétrico de Le Chatelier, balança, recipiente, funil, termômetro, banho termorregulador. Os procedimentos para a execução do ensaio são: utilizar o funil de haste longa para preencher o frasco com o querosene, entre as marcas de zero à 1 cm^3 ; secar a parte do frasco que está livre do líquido; manter o frasco submerso em um banho de água por 30 minutos, na posição vertical, para que as temperaturas do líquido do frasco e do banho se tornem idênticas; efetuar a primeira leitura (V_1); com a balança obter a massa conhecida do material que estará sendo ensaiado, tendo valor próximo a 60 g, para provocar a movimentação do líquido no intervalo de 18 cm^3 a 24 cm^3 da escala do frasco de “Le Chatelier”; usar o funil de haste curta para adicionar material, em pequenas porções. Deve-se tomar cuidado para não ocorrer aderência do material

às paredes internas do frasco acima do nível do líquido; tampar o frasco e gira-lo em leves movimentos cíclicos horizontais, esta movimentação deve ser executada até que não subam bolhas de ar até a superfície; por fim registrar a leitura final (V_2).

A massa específica então é calculada através da seguinte fórmula:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \dots (8)$$

Em que:

m = massa do material ensaiado (g);

V = volume deslocado pela massa do material ensaiado ($V_2' - V_1'$) (cm^3);

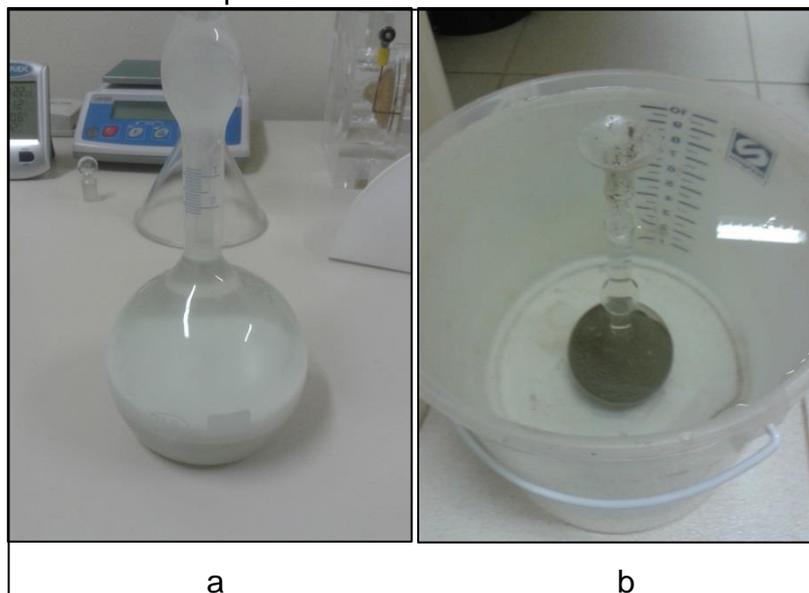
ρ = massa específica do material (g/cm^3);

V_2' e V_1' = valores corrigidos de V_2 e V_1 a partir da calibração da escala do frasco volumétrico (cm^3).

Deve-se realizar no mínimo duas verificações do ensaio, com resultados que não apresentem diferenças maiores que $0,01\text{g}/\text{cm}^3$.

A Figura 21 a mostra a realização do ensaio de massa específica do cimento branco e a Figura 21 b do PIVI. Para o cimento Portland IV a massa específica encontrada foi $\rho = 2,84 \text{ g}/\text{cm}^3$. Para o cimento branco a massa específica encontrada foi $\rho = 3,04 \text{ g}/\text{cm}^3$.

Figura 21 – Ensaio massa específica cimento



Fonte: Próprio autor

3.2.5 Cinza Volante

Nesta pesquisa foi utilizada uma cinza volante proveniente da cidade de Candiota no Rio Grande do Sul, da empresa Termoelétrica Presidente Médici. Conforme o ensaio de caracterização do material, regulamentado através da NM 23 (ABNT, 2001), definido anteriormente. A massa específica da cinza volante (vista na Figura 22) obtida na pesquisa foi de $\rho = 2,00 \text{ g/cm}^3$. Relativamente baixa conforme bibliografia encontrada.

Figura 22 – Ensaio massa específica cinza volante



Fonte: Próprio autor

3.3 Definição da composição da pasta

Conforme Gomes e Barros (2009), a pasta é composta pela quantia de cimento, e das relações dos demais componentes da pasta em função da massa do cimento utilizado. Esta definição de pasta é obtida através da fórmula a seguir, utilizada pelo método de Gomes, Gettu e Agulló.

$$V_p = \frac{C}{\rho_c} + \frac{P_a}{\rho_a} + \frac{P_f}{\rho_f} + \frac{P_{sf}}{\rho_{sf}} + \frac{P_{spl}}{\rho_{sp}} - \frac{P_{asp}}{\rho_a} \quad \dots(9)$$

Em que:

V_p = Volume de pasta (cm^3);

C = Consumo inicial de cimento adotado, com relação a resistência desejada (g);

ρ_c = Massa específica do cimento (g/cm^3);

P_a = Massa da água (g);

$$P_a = \frac{a}{c} * C \quad \dots(10)$$

a/c = Relação água/cimento;

ρ_a = Massa específica da água (g/cm^3);

P_f = Massa do fíler (g);

$$P_f = \frac{f}{c} * C \quad \dots(11)$$

f/c = Relação fíler/cimento;

ρ_f = Massa específica do fíler (g/cm^3);

P_{sf} = Massa da pozolana (g);

$$P_{sf} = \frac{sf}{c} * C \quad \dots(12)$$

Sf/c = Relação pozolana/cimento;

ρ_{sf} = Massa específica da pozolana (g/cm^3);

P_{spl} = Massa do aditivo superplastificante líquido (g);

$$P_{spl} = \frac{P_{sp}}{T_{sp}/100} \quad \dots(13)$$

T_{sp} = Teor de sólidos do aditivo superplastificante;

ρ_{sp} = Massa específica do aditivo superplastificante (g/cm^3);

P_{asp} = Massa de água contida no aditivo superplastificante (g);

$$P_{asp} = P_{sp} * \left[\frac{100}{T_{sp}} - 1 \right] \quad \dots(14)$$

Portanto a massa da água corrigida é dada pela seguinte expressão:

$$P_{ac} = P_a - P_{asp} \quad \dots(15)$$

3.4 Definição do esqueleto granular e determinação da composição do CAA

O esqueleto granular é de extrema importância para a elaboração de traços para concretos autoadensáveis. Conforme o método de dosagem de Gomes, Gettu e Agulló, definiu-se o esqueleto granular de forma experimental, medindo a densidades de misturas de agregados secos não compactados e escolhendo a mistura com maior densidade e menor teor de vazios.

Portanto elabora-se um gráfico com relação de peso unitário com o volume de vazios para os diversos tipos de combinação entre os agregados, devendo realizar no mínimo duas medidas para cada combinação e efetuar a média dos resultados. O resultado ideal é obtido pelo ponto no gráfico em que a linha de peso unitário se encontra mais distante da de volume de vazios.

Para determinar o teor e vazios é utilizada a seguinte equação:

$$v (\%) = \frac{\rho_{dm} - W_u}{\rho_{dm}} * 100 \quad \dots(16)$$

Em que:

v = teor de vazios (%);

W_u = peso unitário da mistura;

$$W_u = \frac{W_t}{V_t} \quad \dots(17)$$

W_t = Peso total da mistura;

V_t = Volume total da mistura.

ρ_{dm} = densidade da mistura seca;

$$\rho_{dm} = \left[\rho_s * \frac{s}{a} (\%) + \rho_b * \frac{b}{a} (\%) \right] / 100 \quad \dots(18)$$

ρ_s = Densidade seca da areia;

ρ_b = Densidade seca da brita;

s/a = Relação areia/agregado;

b/a = Relação brita/agregado;

Após todas estas determinações é possível definir o traço adequada, definindo a massa de cimento para um metro cúbico de concreto, através da equação a seguir.

$$C = \frac{V_p}{\frac{1}{\rho_c} + \frac{a}{\rho_a} + \frac{f}{\rho_r} + \frac{sf}{\rho_{sf}} + \frac{[\frac{sp}{c} * \frac{100}{T_{sp}}]}{\rho_{sp}} - \frac{[\frac{sp}{c} * [\frac{100}{T_{sp}} - 1]]}{\rho_a}}$$

...(19)

Em que:

C = Consumo de cimento corrigido;

V_p = Volume da pasta (cm³);

ρ_c = Massa específica do cimento (g/cm³);

a/c = Relação água/cimento;

ρ_a = Massa específica da água (g/cm³);

f/c = Relação fíler/cimento;

ρ_r = Massa específica do fíler (g/cm³);

sf/c = Relação pozolana/cimento;

ρ_{sf} = Massa específica da pozolana (g/cm³);

sp/c = Relação superplastificante/cimento;

ρ_{sp} = Massa específica do aditivo superplastificante (g/cm³);

T_{sp} = Teor de sólidos contido no aditivo superplastificante.

Então, para definir o esqueleto granular entre os agregados foram realizadas as seguintes misturas:

Tabela 8 – Proporções das misturas

Misturas	% Areia	% Brita
1	35	65
2	40	60
3	45	55
4	50	50
5	55	45
6	60	40
7	65	35

Fonte: Próprio Autor

Para cada proporção a mistura ocorreu, durante um minuto, através da betoneira, para ser mais uniforme que a manual. Após a retirada do material, foi então realizado o procedimento conforme NMBR NM 45(2006), determinando o peso unitário de cada mistura, visto na tabela a seguir, definindo as constantes $\rho_s(\text{kg/dm}^3)=2,631$, $\rho_b(\text{kg/dm}^3)=2,85$ e $v_t(\text{dm}^3)=7,56$.

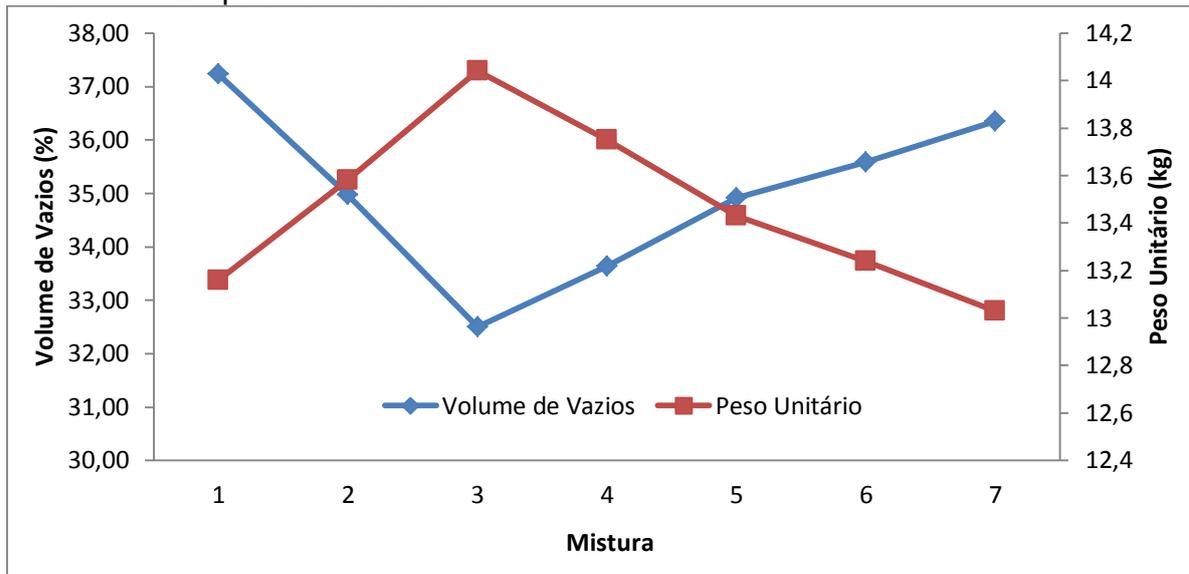
Tabela 9 – Misturas para esqueleto granular

Mistura	Areia (%)	Brita (%)	Peso Unitário wt (%)	s/a (%)	b/a (%)	wu (kg/dm ³)	ρ_{adm}	v(%)
1	35	65	13,16	35	65	1,74	2,77	37,23
2	40	60	13,58	40	60	1,80	2,76	34,97
3	45	55	14,04	45	55	1,86	2,75	32,50
4	50	50	13,75	50	50	1,82	2,74	33,63
5	55	45	13,43	55	45	1,78	2,73	34,92
6	60	40	13,24	60	40	1,75	2,72	35,58
7	65	35	13,03	65	35	1,72	2,71	36,35

Fonte: Próprio Autor

Com base nestes valores é possível obter a curva do esqueleto granular, apresentando a mistura com menor volume de vazios, vista a seguir Gráfico 3:

Gráfico 3 – Esqueleto Granular



Fonte: Próprio Autor

A mistura ideal obtida foi a de número **3**, sendo constituída 45% de agregado miúdo e 55% de agregado graúdo.

Figura 23 – Procedimento de pesagem das misturas para ensaio



Fonte: Próprio autor

3.5 Ensaio propostos

Os ensaios propostos visam analisar o comportamento reológico no estado fresco do CAAB assim como o comportamento mecânico. Para CAA todos os ensaios no estado endurecido são idênticos aos realizados no CCV.

Já no estado fresco há diferenciação de ensaios para os concretos autoadensáveis quando comparados aos concretos convencionais vibrados, por ser um concreto mais fluido e com maior trabalhabilidade. É necessário também que a segregação seja evitada, sendo, portanto realizados ensaios específicos para a análise dessa característica.

Segundo Gomes e Barros (2009), diversos métodos de ensaios e procedimentos são sugeridos para avaliar as propriedades do CAA, sendo alguns normatizados e outros elaborados durante pesquisas para avaliação nos estudos iniciais do concreto autoadensável. A seguir serão descritos os ensaios realizados para a pesquisa.

Conforme Coutinho (2011, p. 9):

“Para o controle do CAA no estado fresco, já existem normas americanas (ASTM C 1611-09b, para ensaio de espalhamento; ASTM C1621-09b, para ensaio do anel J; ASTM C1610-06a e ASTM 1712-09, para ensaio de resistência à segregação), europeias (EM 12350-8:2010, para ensaio de espalhamento; EN 12350-9:2010 para ensaio do funil V; EM 12350-10:2010, para ensaio da caixa L; EN 12350-11:2010, para ensaio de resistência à segregação; EN 12350-12:2010, para ensaio do anel J) e brasileiras. As brasileiras já publicadas são a NBR 15823-1:2010 (classificação, controle e aceitação), NBR 15823- 2:2010 (ensaio de espalhamento), NBR 15823-3:2010 (ensaio do anel), NBR 15823-4:2010 (ensaio da caixa L), NBR 15823-5:2010 (método do funil V), NBR 15823-6:2010 (ensaio de resistência à segregação).”

3.5.1 Ensaio de espalhamento

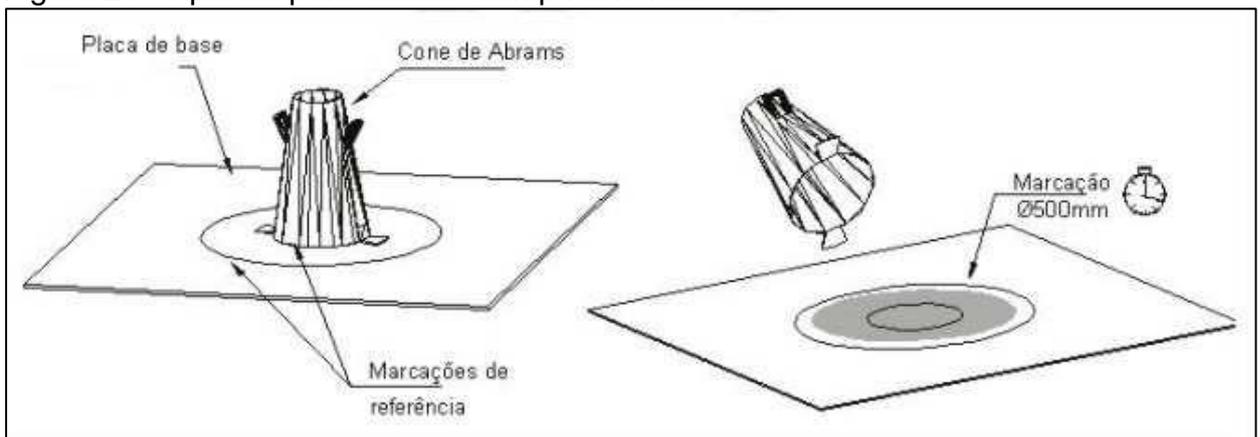
Tutikian e Dal Molin (2008) e Gomes e Barros (2009) afirmam que o slump flow test (SFT) é usado para medir a capacidade do CAA de fluir sem segregar e verificar capacidade de espalhamento, desenvolvido no Japão, em 1990, para amortecer o uso de concretos submersos. O ensaio consiste em verificar se o concreto, sob força provocado pelo seu próprio peso, é capaz de se espalhar e atingir determinada

dimensão em um tempo limite. Este ensaio é normatizado pela NBR 15823-2 (ABNT, 2010).

Os equipamentos necessários, conforme Gomes e Barros (2009), para o ensaio de espalhamento são:

- 1 Base quadrada reta, lisa e de material sólido, que não solte material e dimensões mínimas de 90 cm;
- 2 Cone de Abrams;
- 3 Colher do tipo concha ou um balde;
- 4 Espátula;
- 5 Cronômetro;
- 6 Trena ou régua com mínimo de 90 cm.

Figura 24 - Aparato para ensaio Slump Flow Test



Fonte: ABNT (2010)

O SFT pode ser executado por apenas uma pessoa e exige poucos materiais, podendo-se efetuar o ensaio em canteiros-de-obra e não apenas em laboratórios. Os procedimentos para o ensaio consistem em: marcar um círculo de 20cm de diâmetro no centro da base para colocar o cone; umedecer a placa e o tronco de cone, para não haver absorção de água do concreto; firmar a placa no chão firme e nivelado; preencher o cone com a colher tipo concha e utilizar a espátula para nivelar e remover o excesso; não adensar; levantar verticalmente o cone; permitir que o concreto flua normalmente; acionar o cronômetro simultaneamente ao início do levantamento do cone; medir o diâmetro do espalhamento em duas direções perpendiculares após totalmente fluído; fazer a média das medidas, gerando o resultado do teste. (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008; GOMES E BARROS, 2009)

Para o slump flow T_{50} , a utilização do cronômetro é feita até o concreto atingir a marca circular feita na placa, com diâmetro de 50 cm, sendo este valor denominado tempo de fluxo T_{50} , quando a mistura se encontra muito coesa, o tempo de fluxo será maior, necessitando adições e aditivos, já quando se encontrar muito fluido o tempo de fluxo será menor, podendo gerar segregação (TUTIKIAN, 2004).

Na tabela a seguir são apresentados os valores para espalhamento e tempo máximo e mínimo, conforme referências, sendo ainda dito por Marangon (2006) que o abatimento para CAA deve ser igual ou superior a 25 cm.

Tabela 10 – limites de resultados para espalhamento e espalhamento T_{50} , conforme referências

Referências	Tempo para T_{50} (s)		Espalhamento (mm)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
EFNARC (2002)	2	5	650	800
Gomes (2002)	4	10	600	700
Gomes et al. (2003)	3	7	600	750
Araujo et al. (2003)	2	5	650	800
Rigueira Victor et al. (2003)	3	6	600	800
Peterssen (1999)	3	7	650	725
Tviksta (2000)	3	7	600	-
Coppola (2000)	5	12	600	750
Palma (2001)	3	6	650	750

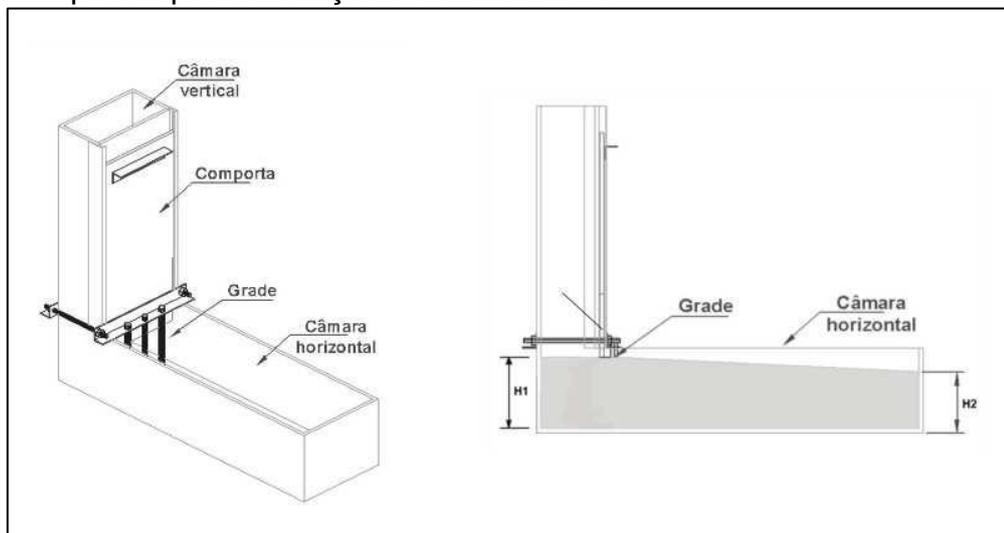
Fonte: Adaptado de Tutikian (2004)

Porém, conforme a NBR 15823-1 (ABNT, 2010), normal na qual apresenta os resultados para os ensaios direcionados para concretos autoadensáveis, para CAA de classe SF2 (fluidez e escoamento de 2º classe), adequada para maioria das aplicações correntes, o espalhamento deve ficar entre 660 a 750 mm conforme o método de ensaio da norma NBR 15823-2 (2010), pela qual este trabalho seguirá os procedimentos.

3.5.2 Ensaio de Caixa-L

Segundo a NBR 15823 - Concreto autoadensável Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco (ABNT, 2010) o ensaio da caixa L mede a habilidade passante, sob o fluxo confinado, através da razão $H2/H1$ da superfície do concreto, situadas nas extremidades posterior e anterior da câmara horizontal, respectivamente. Após aberta a grade de separação entre os compartimentos, representada na figura. Alencar (2008) afirma que diferente da maioria dos ensaios para CAA o ensaio da Caixa-L foi feito na Suécia e não no Japão.

Figura 25 – Aparato para execução do ensaio caixa-L

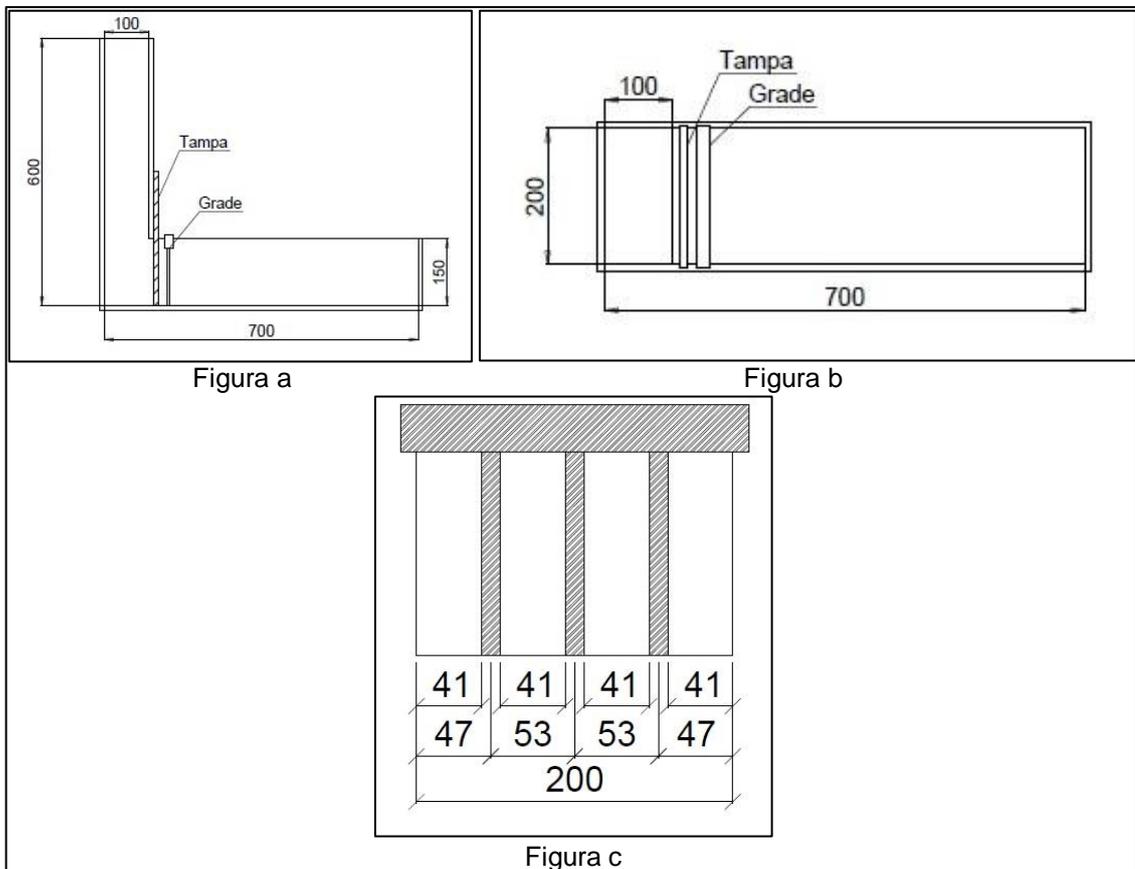


Fone: ABNT (2010)

Conforme Gomes e Barros (2009), para a execução do ensaio da caixa-L, são necessários os seguintes equipamentos:

1. Uma caixa em forma de L, com dimensões recomendadas na Figura 26 – Medidas da Caixa-L;
2. Colher tipo concha;
3. Balde
4. Dois cronômetros;
5. Trena ou régua com tamanho mínimo de 60 cm.

Figura 26 – Medidas da Caixa-L



Fonte: Próprio autor

Conforme visto na Figura 26 são apresentadas as medidas aconselhadas pela norma NBR 15823-4 (ABNT, 2010), a Figura 26a apresenta o corte lateral da caixa L, a Figura 26b apresenta o corte superior e a Figura 26c o espaçamento entre barras, sendo as barras com dimensão de $(12,5 \pm 0,2)$ mm.

Os procedimentos para executar este ensaio são: nivelar a caixa-L em solo; umedecer as paredes do equipamento; testar a comporta para garantir eficiência; fechar a porta e preencher a parte vertical com CAA; aguardar 1 minuto para o material se acomodar e levantar a porta; cronometrar o tempo que o concreto atinge a marca de 20 cm e 40 cm; medir a altura H1 e H2 (Figura 25 – Aparato para execução do ensaio caixa-L); fazer a média entre as alturas (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

Conforme a NBR 15823-1 (ABNT, 2010), para os CAA's a classe PL2 (habilidade passante de 2ª classe), adequada para a maioria das aplicações correntes, deve possuir uma relação $(H2/H1) \geq 0,80$, com três barras de aço, vista na Figura 26 c.

Em virtude da falta do aparelho no laboratório de construção civil do campus Alegrete da Universidade Federal do Pampa, o mesmo foi confeccionado com chapas de madeira compensada, pintadas com tinta impermeável para madeira e revestido com uma lona plástica impermeável, baseada nas especificações das medidas pela norma brasileira NBR 15823-4 (ABNT, 2010).

Figura 27 – Caixa-L finalizada



Fonte: Próprio autor

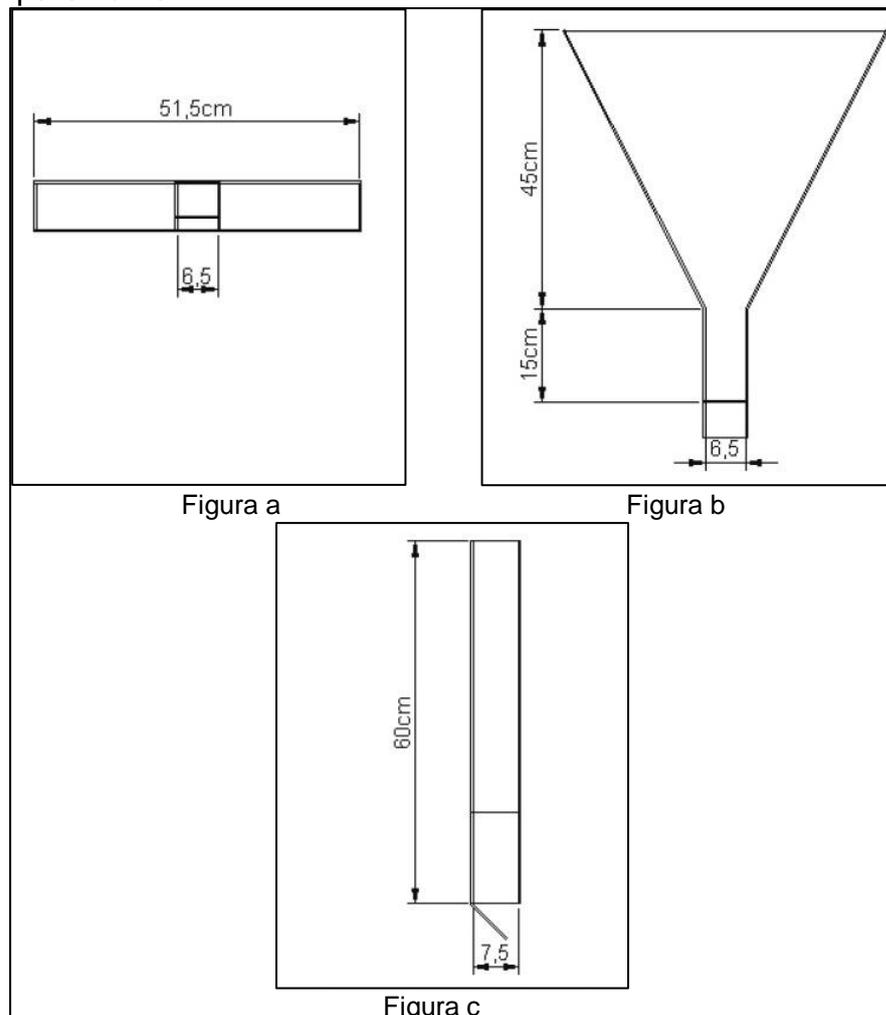
3.5.3 Ensaio do Funil-V (V-Funnel test)

Este ensaio simula a capacidade de passagem do CAA através de um estreitamento de uma seção, sob força de seu peso próprio, e para verificar a presença de segregação, quando o concreto é impedido de escorrer pela saída do funil. O tempo de fluidez também está diretamente relacionado com a viscosidade do material. O Funil-V foi desenvolvido na Universidade de Tóquio, e consiste em medir o tempo em que 10 litros de concreto fluem totalmente através do orifício do funil (GOMES e BARROS, 2009).

Para a execução do ensaio do Funil-V, conforme Gomes e Barros (2009), são necessários os seguintes equipamentos:

1. Funil em forma de V;
2. Colher tipo concha;
3. Recipiente com capacidade para mais de 10 litros
4. Cronômetro;

Figura 28 – Aparelho Funil-V



Fonte: Adaptado de ABNT (2010)

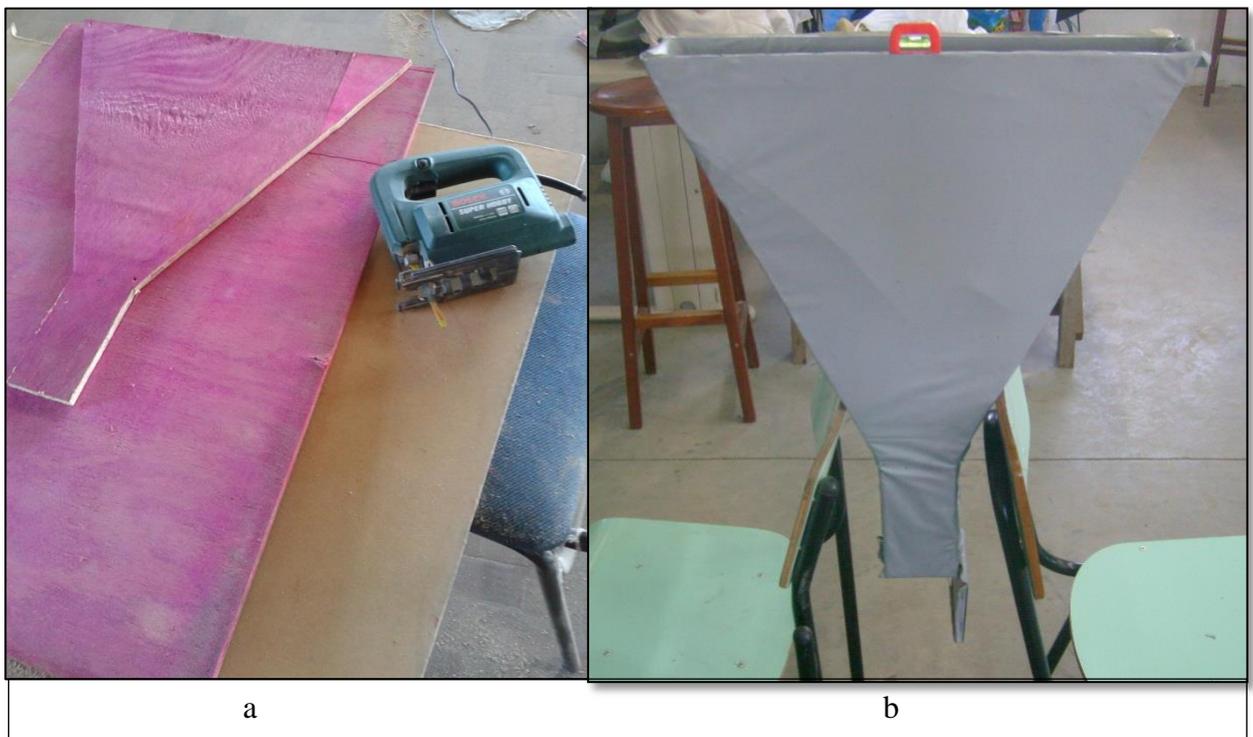
Na Figura 28 são definidas as dimensões para o Funi-V, a figura a apresenta o corte superior e a Figura 28 b e Figura 28 c o corte lateral da peça.

Os procedimentos para efetuar o ensaio são: nivelar o aparelho Funil-V; Umedecer o aparelho; preencher o funil com a colher e remover excesso do topo; não adensar o concreto; esperar 5 minutos para que o material se acomode; abrir a

porta do aparelho e juntamente acionar o cronômetro; terminar a contagem quando esvaziar o funil (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

Em virtude da ausência do aparelho no laboratório de construção civil do campus Alegrete da Universidade Federal do Pampa, o mesmo foi confeccionado com chapas de madeira compensada, pintadas com tinta impermeável para madeira e revestido com uma lona plástica impermeável, seguindo as especificações das medidas pela norma brasileira NBR 15823-5 (ABNT, 2010) para os equipamentos adaptados. A Figura 29 apresenta o processo de fabricação do funil-v na Figura 29a e na Figura 29b o aparelho finalizado.

Figura 29 – Construção do Funil-V



Fonte: Próprio autor

Segundo a NBR 15823-1 (ABNT, 2010), define a classe VS2 (viscosidade plástica aparente de 2ª classe), adequada para a maioria das aplicações, que o tempo em que o concreto deve fluir pelo funil V seja de 9 a 25 segundos. Quando dentro destes requisitos o concreto é considerado fluido o suficiente para autoadensável. Conforme a EFNARC (2005), o tempo para o ensaio de funil V 5 minutos não deve ser superior a 3 segundos em relação ao resultado obtido no funil

V, apresentando assim características de resistência à segregação, se este resultado for superior, o concreto é dito como segregado.

3.5.4 Ensaio de resistência à compressão simples

Neville (1997) assegura que a resistência à compressão de um concreto, curado em água a uma temperatura constante, depende principalmente da relação água/cimento e do grau de adensamento, ou seja, quanto menor a relação água/cimento e melhor o adensamento, menor a porosidade da pasta de cimento e maior a resistência do concreto. O ensaio de resistência à compressão simples é normatizado segundo a NBR 5739 (ABNT, 2007), refletindo na aplicação, em uma máquina de ensaio para resistência a compressão (prensa), de carga vertical centrada na face do corpo-de-prova cilíndrico de concreto, com dimensões de 9,5 x 19,5 cm, sendo estes corpos de prova rompidos em cada idade pré-estabelecida (7 e 28 dias).

Para a realização do ensaio é necessário efetuar a limpeza das faces dos pratos da prensa e dos corpos-de-prova, antes de coloca-los na posição para executar o ensaio e então aplicar de forma contínua, com velocidade de carregamento de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s, devendo manter a velocidade durante o decorrer de todo o ensaio, sendo suspensa a aplicação da força no instante em que houver a ruptura do corpo-de-prova. Após a ruptura calcula-se a resistência a compressão simples do concreto de acordo com a equação:

$$f_c = \frac{4.F}{\pi.D^2} \quad \dots(20)$$

Onde:

f_c - resistência à compressãoem (MPa);

F – máxima carga obtida no ensaio (N);

D - diâmetro do corpo-de-prova em (mm).

Figura 30 – Ensaio de resistência à compressão



Fonte: Próprio autor

3.5.5 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Este ensaio é regulamentado pela NBR 7222 (ABNT, 2011), consistindo em aplicar uma carga longitudinal, no corpo-de-prova cilíndrico, de forma contínua. A boa execução do ensaio se dá ao observar o rompimento vertical, no qual divide o corpo-de-prova em duas partes. O equipamento necessário é o mesmo utilizado para o ensaio de resistência a compressão.

Para a realização do ensaio é necessário possuir os CP's cilíndricos normatizados pela NBR 7215 (ABNT, 1997) e NBR 5738 (ABNT, 2003). Coloca-se o corpo-de-prova sobre o prato de máquina de compressão entre duas fibras de madeira, conforme especificado na NBR 10024 (ABNT, 2012), com comprimento igual ao da geratriz do corpo-de-prova. Ajusta-se a máquina para que os pratos mantenham o corpo-de-prova posicionado no centro e paralelo. Aplica-se a carga

continuamente, com a tensão de tração crescendo constantemente, com uma velocidade de $(0,05 \pm 0,02)$ MPa/s, até o rompimento do corpo-de-prova.

Figura 31 – Ensaio de resistência à tração



Fonte: Próprio autor

A obtenção da tensão se dá através da equação 21:

$$f_{t,D} = \frac{2.F}{\pi.d.l} \quad \dots (21)$$

Em que:

$f_{t,D}$ – resistência à tração por compressão diametral em (MPa);

F – máxima carga obtida no ensaio (kN);

d – diâmetro do corpo-de-prova em (mm);

l – altura do corpo-de-prova em (mm).

3.6 Moldagem, Cura e armazenamento dos corpos-de-prova

Foram moldados 16 corpos-de-prova cilíndricos Ø10x20cm para cada traço definido, destinados a resistência à compressão e resistência a compressão diametral.

A ordem de colocação dos materiais na betoneira foi a seguinte:

1. Água de imprimação;
2. 100% do agregado graúdo;
3. 80% da água de amassamento;
4. 100% do aglomerante homogeneizado;
5. 80% do aditivo superplastificante;
6. 100% da Areia;
7. Restante da água de amassamento com o aditivo superplastificante diluído.

Com o intuito de efetuar a moldagem dos corpos-de-prova de todos os traços com um maior controle, calculou-se que a temperatura em que a massa de água deveria estar para a obtenção do concreto foi de 19 ± 2 °C. A equação usada foi a apresentada por Neville (1997):

$$T = [0,22.(T_m.M_m + T_c.M_c) + T_a.M_a] / [0,22.(M_m+M_c) + M_a] \quad (22)$$

Em que, T_i são as temperaturas em °C, M_i as massas dos materiais em Kg e “m”, “c” e “a” referem-se, respectivamente, ao agregado, ao cimento e a água.

Após 24 horas da moldagem os corpos-de-prova foram desmoldados, identificados e colocados em cura submersa, em razão de não haver uma câmara úmida no laboratório de construção civil, não foi possível coloca-los em temperatura constante. Na data dos ensaios os corpos-de-prova eram retirados da cura submersa, medidos e capeados com argamassa de traço 1:1.

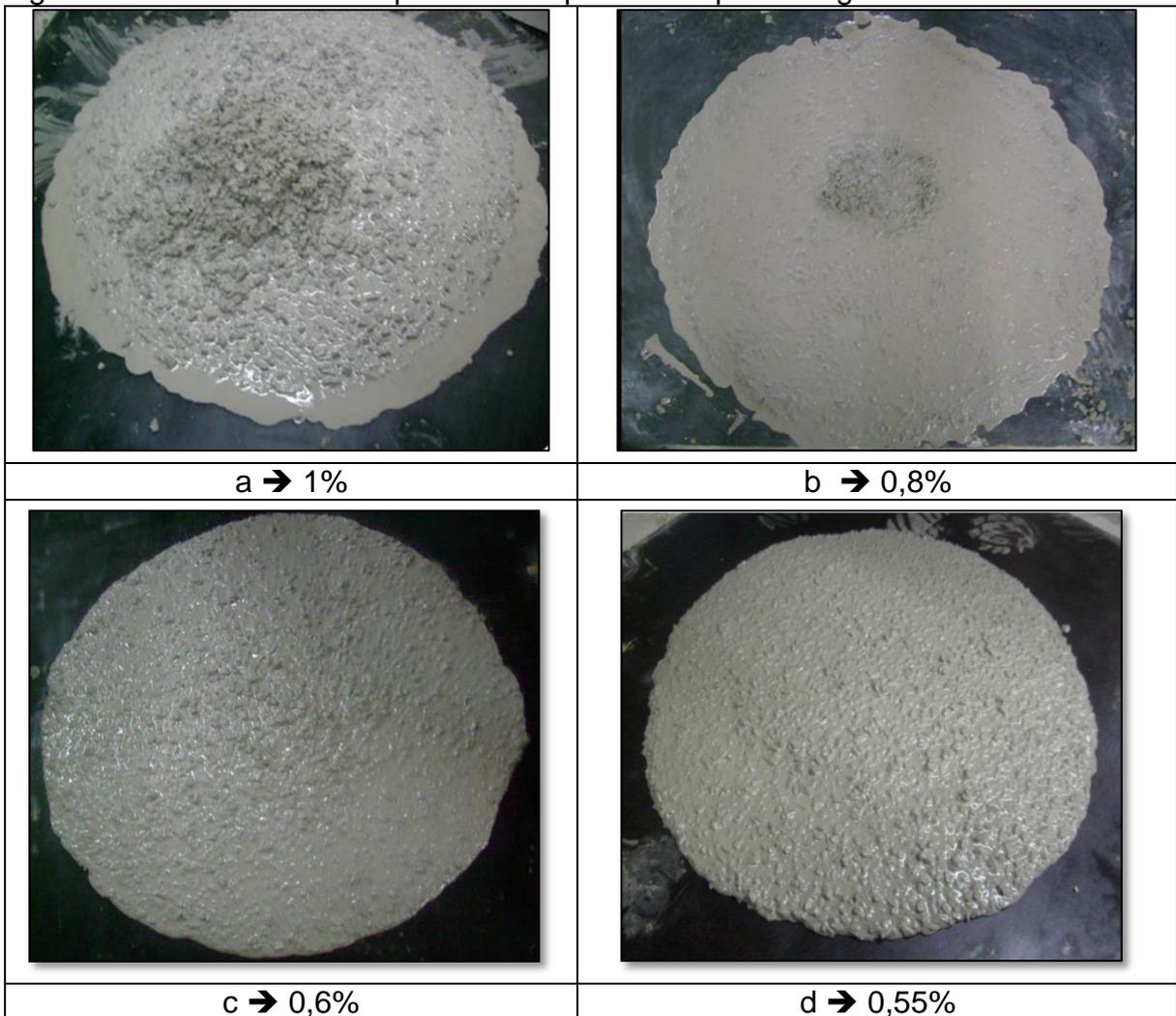
3.7 Obtenção dos traços

O laboratório de construção civil da Unipampa não dispõe de material necessário para realizar os ensaios do cone de Marsh e o Mini-Slump, necessários para obter a dosagem ideal do aditivo superplastificante na pasta, portanto, para obter o valor de saturação do aditivo (porcentagem ótima), foi necessária a dosagem experimental, através de algumas misturas, refinando a porcentagem utilizada de superplastificante, para que o mesmo se encontrasse dentro das normas brasileiras de CAA.

Para isto, obteve-se inicialmente um traço de concreto com CPIV, de acordo com o método de dosagem de Gomes, Gettu e Aguillo. Tendo variações na porcentagem do aditivo em 1%, 0,8%, 0,6% até chegar ao melhor resultado obtido: 0,55%.

Na Figura 32 é visto o espalhamento do concreto, Figura 32a apresenta a dosagem com 1% de aditivo superplastificante. Nela é visível à grande segregação da pasta com os agregados graúdos, principalmente pelo acúmulo destes no centro da amostra, assim como exsudação, portanto reduziu-se o aditivo, para 0,8%, resultando num espalhamento visto na Figura 32b, apresentando uma menor segregação e exsudação. A Figura 32c apresenta uma dosagem para 0,6% de superplastificante. Nesta amostra houve uma grande melhora na coesão, porém em suas bordas ainda existia uma leve segregação da pasta com o agregado graúdo. Por fim, a Figura 32d mostra o melhor teor obtido, com 0,55% do aditivo superplastificante, a dosagem se apresentou muito coesa, sem exsudação ou segregação, atendendo as especificações da NBR 15823-2 (ABNT, 2010) quanto ao espalhamento do CAA.

Figura 32 – Resultado do espalhamento para obter porcentagem do aditivo



Fonte: Próprio autor

3.7.1 Traço para CP IV (MCPIV)

Após a obtenção do teor de superplastificante ótimo foi dosado o primeiro traço com cimento convencional, para uma melhor economia dos traços realizados com as dosagens com cimento branco. Foi calculado o volume da pasta e o consumo de cimento:

$$V_p = 0,353 \text{ m}^3 \text{ e } C = 453,15 \text{ kg/m}^3$$

As composições utilizadas na mistura estão apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Composição do concreto MCPiV

Composição	
Agregado miúdo (kg/m ³)	815,67
Agregado graúdo (kg/m ³)	996,93
Cimento Portland IV (kg/m ³)	453,15
Água (kg/m ³)	181,26
Aditivo superplastificante (kg/m ³)	2,492
Teor de superplastificante (%)	0,55
Relação a/c	0,4

Fonte: Próprio Autor

Na Figura 33 é visto o ensaio de espalhamento, onde foi possível visualizar um concreto em ótimo estado, sem exsudação ou segregação, apresentando um espalhamento igual a 715 cm, atendendo aos requisitos para concretos autoadensáveis.

Figura 33 – Slump Flow Traço 01



Fonte: Próprio autor

3.7.2 Traço para CPB (MCPB)

A dosagem do concreto autoadensável com CPB se deu pelo mesmo método de Gomes, Gettu e Agulló. Sendo então obtidos o volume da pasta e o consumo do cimento:

$$V_p=0,348 \text{ m}^3 \text{ e } C=474,11 \text{ kg/m}^3$$

Para esta mistura foi definida a composição encontrada na Tabela 12.

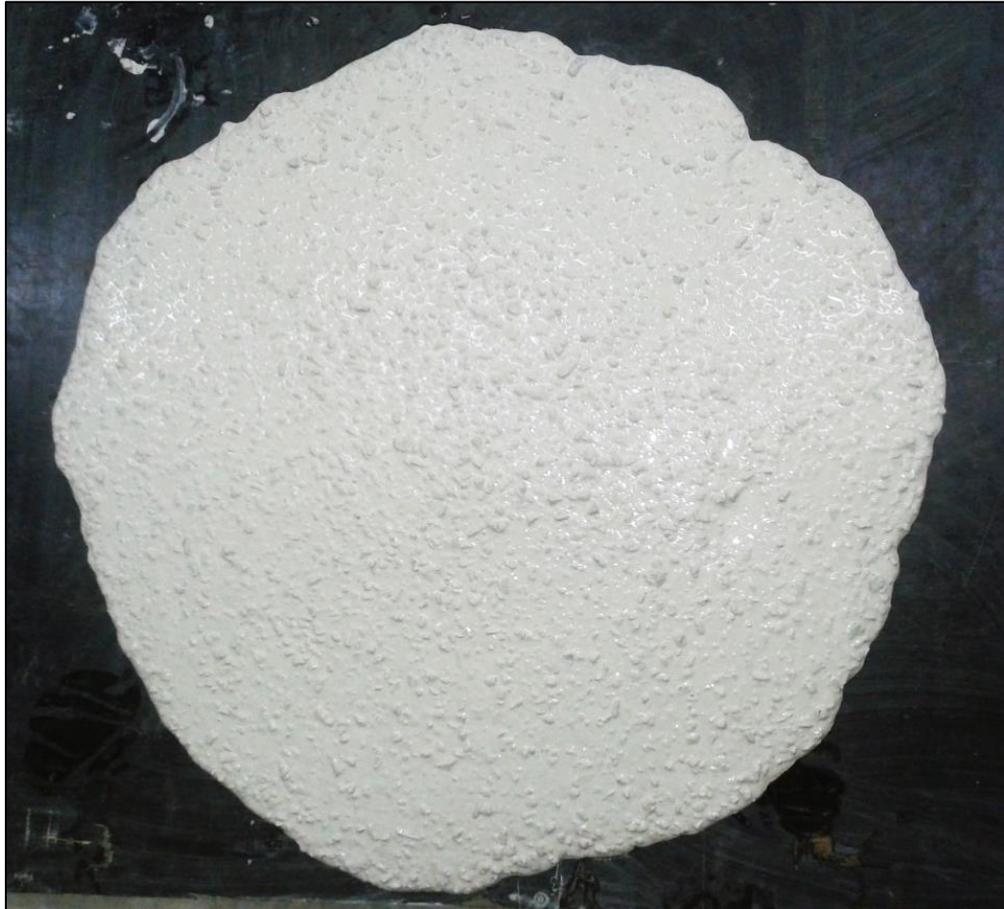
Tabela 12 – Composição do concreto da mistura 02

Composição	
Agregado miúdo (kg/m ³)	853,40
Agregado graúdo (kg/m ³)	1043,04
Cimento Portland branco (kg/m ³)	474,11
Água (kg/m ³)	189,64
Aditivo superplastificante (kg/m ³)	2,60
Teor de superplastificante (%)	0,55
Relação a/c	0,4
Porcentagem de ar aprisionado	2%

Fonte: Próprio Autor

Quando substituído o cimento convencional pelo cimento Portland branco o slump flow test, visto na Figura 34, também apresentou um concreto sem problemas de exsudação ou segregação. Observou-se que ao substituir o cimento Portland IV pelo branco, ambos de classe 32, houve um acréscimo visível de ar aprisionado no concreto, que em pequena porcentagem, como neste caso (em concretos convencionais é admitido 1 a 3%), traz benefícios a trabalhabilidade, característica muito importante para autoadensáveis.

Figura 34 – Espalhamento MCPB



Fonte: Próprio autor

3.7.3 Traço para CPB com cinza volante

A dosagem do CPB com substituição de 30% do volume inicial do cimento Portland branco por cinza volante apresentou o volume da pasta e o consumo de cimento:

$$V_p=0,397 \text{ m}^3 \text{ e } C=440,43 \text{ kg/m}^3$$

Para esta mistura foi definida a composição do concreto através da Tabela 13.

Tabela 13 – Composição do concreto da mistura 03

Composição	
Agregado miúdo (kg/m ³)	792,77
Agregado graúdo (kg/m ³)	968,95
Cimento Portland branco (kg/m ³)	308,3
Cinza Volante (kg/m ³)	86,93
Água (kg/m ³)	176,17
Aditivo superplastificante (kg/m ³)	2,42
Teor de superplastificante (%)	0,55
Relação a/c	0,4
Porcentagem ar aprisionado	3%

Fonte: Próprio Autor

Figura 35 – Slump Flow traço 03



Fonte: Próprio autor

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados quanto a realização dos ensaios definidos no trabalho, assim como suas análises sobre estes resultados baseando-se na literatura existente.

4.1 Propriedades do CAA no estado fresco

4.1.1 Espalhamento

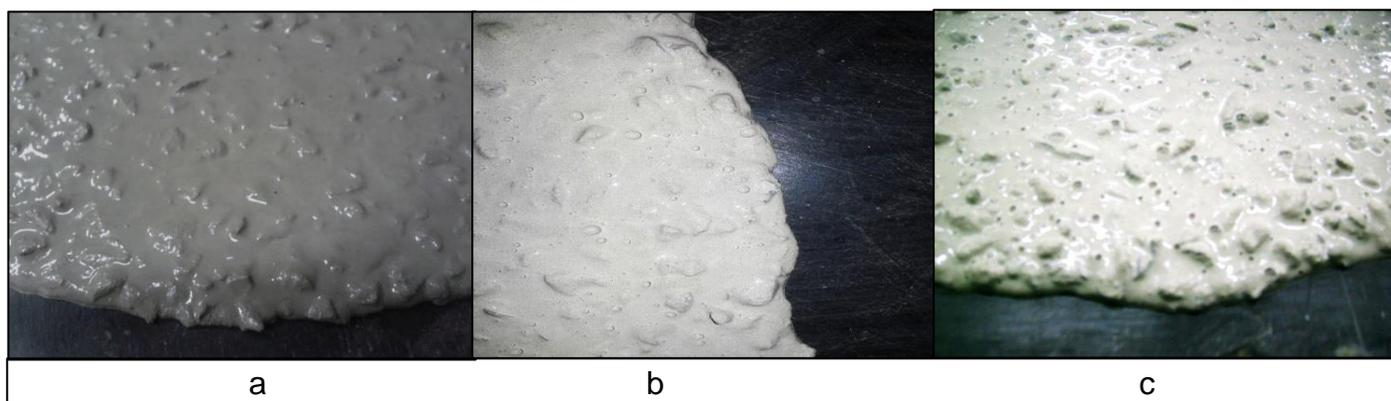
A Tabela 14 apresenta os resultados para os ensaios de slump-flow test e slump-flow T50 test para as misturas de concreto realizadas.

Tabela 14 – Resultados do slump-flow e slump-flow T50

Mistura	Espalhamento tronco de cone (mm)	Tempo espalhamento T50 (s)
01	715	3
02	715	2
03	735	3

Fonte: Próprio Autor

Figura 36 – Detalhamento das bordas nos ensaios de espalhamento



Fonte: Próprio autor

Na Figura 36 é possível analisar as bordas das misturas no ensaio de espalhamento de todos os traços estudados, sendo a Figura 36a a borda da mistura MCPIV, a Figura 36b a borda da mistura MCPBe a Figura 36c a borda da mistura

MCPBCV. Em todas estas é possível observar que as misturas se encontraram com boa retenção de água, homogêneas e sem apresentação de exsudação ou segregação.

Conforme a NBR 15823-1 (ABNT, 2010), os valores para todas as misturas se encontram dentro do especificado para concretos autoadensáveis. Observa-se que a mistura de MCPBCV, com substituição de 30% de volume do cimento inicial por cinza volante, obteve maior espalhamento, devido à influência a cinza causa sobre a demanda de água no concreto, diminuindo a sua relação para um mesmo traço, e da trabalhabilidade, causando um maior espalhamento devido as suas partículas se apresentarem de forma redonda.

4.1.2 Escoamento na “Caixa-L”

Os valores para a relação H_2/H_1 são mostradas na Tabela 15 para todos os ensaios realizados.

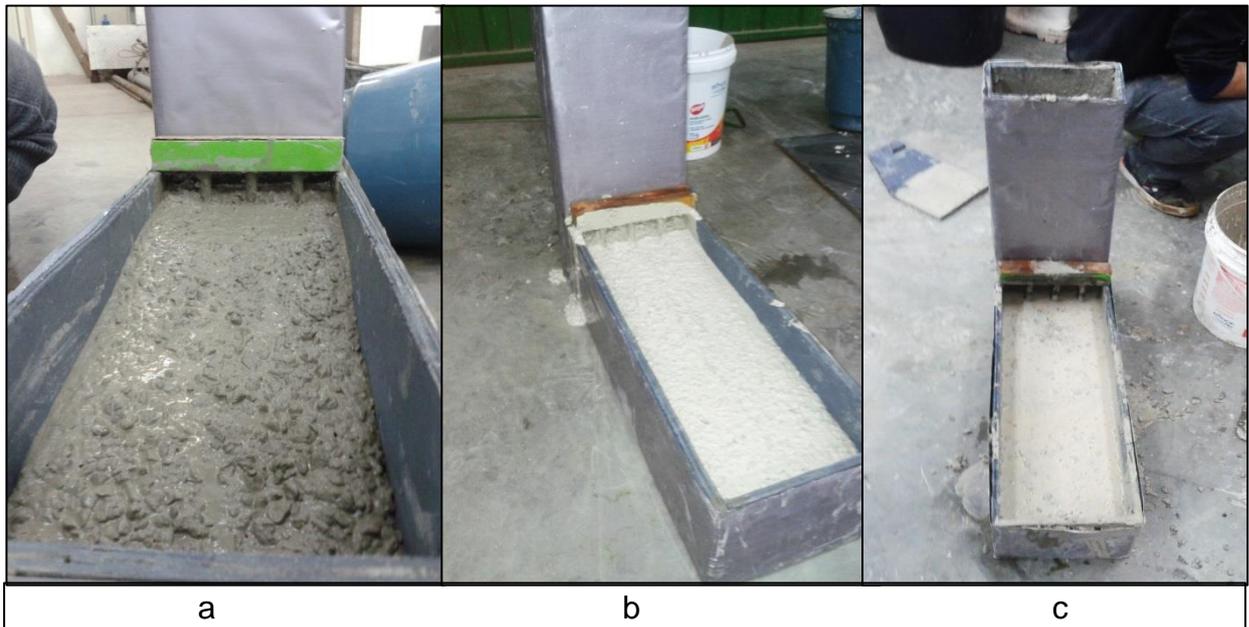
Tabela 15 – Resultados para Caixa-L

Mistura	H_2/H_1
01	0,84
02	0,82
03	0,80

Fonte: Próprio Autor

Na Figura 37 é possível visualizar os ensaios de caixa L realizados para o traço 01 (Figura 37a), traço 02 (Figura 37b) e o traço 03 (Figura 37c).

Figura 37 – Ensaio de Caixa L para as misturas



Fonte: Próprio autor

Observa-se que as misturas MCPiV apresentou o melhor resultado para o ensaio, a MCPB reduziu levemente esta relação e o MCPBCV exibiu sua habilidade passante na Caixa-L com uma suave diminuição no valor quanto às demais, entretanto, todas as amostras se enquadram nas especificações da NBR 15823-1 (ABNT, 2010). A provável causa da diminuição da relação para MCPBCV é que ao adicionar pozolâna ao concreto, este encontra-se mais coeso, perdendo levemente sua habilidade passante.

4.1.3 Fluidez e segregação pelo “Funil-V”

Os resultados para todas as misturas para os ensaios do Funil-V e Funil-V 5 minutos são vistos na Tabela 16.

Tabela 16 – Resultados do Funil-V e Funil-V 5 minutos

Mistura	Funil-V (s)	Funil-V 5 min (s)
01	20	21
02	12	14
03	17	20

Fonte: Próprio Autor

Na Figura 38 é visto a execução do ensaio do Funil V e Funil V 5min, devidamente nivelado.

Figura 38 – Ensaio com Funil-V



Fonte: Próprio autor

Foi possível perceber um aumento na velocidade de escoamento do concreto branco sem pozolana, tendo a MCPB um escoamento bem mais rápido que as demais. Conforme a NBR 15823-1 (ABNT, 2010), todos os resultados obtidos no funil-v estão dentro do especificado. Os resultados para o funil-v 5min foram satisfatórios para todas as misturas, portanto, nenhuma apresentou segregação ao não divergirem no escoamento um tempo maior que 3 segundos após os cinco minutos acomodados no equipamento.

4.2 Propriedades do CAA no estado endurecido

A Figura 39 apresenta respectivamente, da esquerda para a direita, os corpos de prova constituídos por: cimento branco, cimento branco substituindo 30% por cinza volante e o cimento Portland IV. Mesmo utilizando agregados da região percebeu-se que o concreto com cimento branco apresentou alto teor de brancura comparado com a MCPIV, assim como o corpo-de-prova com 30% de substituição de cinza volante, apresentando pouca variação de coloração com o concreto branco.

Figura 39 – Corpos de prova



Fonte: Próprio Autor

Na figura 39a é visto o corpo-de-prova da MCPB, a figura 39b o corpo-de-prova para MCPBCV e a figura 39c para MCPIV.

4.2.1 Resistência à compressão

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência a compressão axial para os três traços mostrados são apresentados na Tabela 19 – Resultados de resistência a compressão. Para a obtenção destes resultados foi realizado o desvio padrão para todos os valores obtidos pela compressão conforme Tabela 17 e Tabela 18. Apresentando os resultados

Tabela 17 - Resistência 7 dias compressão:

CP	Ø cm	Área cm ²	fc MPa	fcmed MPa	des.pad. MPa	coef.var.	desv. rel. MPa	fc' MPa	chave	fcmed2 MPa	desv. rel.2 MPa
REF CPIV	10,00	78,54	25,11	27,2	1,8	6,6%	7,5%	0,0	0	27,1	0,0%
REF CPIV	10,00	78,54	26,59				2,1%	26,6	1		1,8%
REF CPIV	10,00	78,54	27,55				1,4%	27,6	1		1,8%
REF CPIV	10,00	78,54	29,39				8,2%	0,0	0		0,0%
REF CPB	10,00	78,54	38,38	38,9	0,6	1,6%	1,2%	38,4	1	38,9	1,2%
REF CPB	10,00	78,54	39,56				1,8%	39,6	1		1,8%
REF CPB	10,00	78,54	39,16				0,8%	39,2	1		0,8%
REF CPB	10,00	78,54	38,31				1,4%	38,3	1		1,4%
CPB 30CV	10,00	78,54	26,98	26,9	0,7	2,8%	0,2%	27,0	1	26,9	0,2%
CPB 30CV	10,00	78,54	27,76				3,1%	27,8	1		3,1%
CPB 30CV	10,00	78,54	25,94				3,6%	25,9	1		3,6%
CPB 30CV	10,00	78,54	27,01				0,3%	27,0	1		0,3%

Fonte: Próprio Autor

Tabela 18 - Resistência 28 dias compressão:

CP	Ø cm	Área cm ²	fc MPa	fcmed MPa	des.pad. MPa	coef.var.	desv. rel. MPa	fc' MPa	chave	fcmed2 MPa	desv. rel.2 MPa
REF CPIV	10,00	78,54	34,08	33,3	1,9	5,6%	2,5%	34,1	1	34,2	0,2%
REF CPIV	10,00	78,54	34,7				4,4%	34,7	1		1,6%
REF CPIV	10,00	78,54	30,54				8,2%	0,0	0		0,0%
REF CPIV	10,00	78,54	33,68				1,3%	33,7	1		1,4%
REF CPB	10,00	78,54	45,14	43,7	2,1	4,7%	3,3%	45,1	1	43,7	3,3%
REF CPB	10,00	78,54	41,27				5,6%	41,3	1		5,6%
REF CPB	10,00	78,54	42,75				2,2%	42,8	1		2,2%
REF CPB	10,00	78,54	45,68				4,5%	45,7	1		4,5%
CPB 30CV	10,00	78,54	44,6	44,6	4,0	9,0%	0,1%	44,6	1	44,1	1,1%
CPB 30CV	10,00	78,54	49,9				12,0%	0,0	0		0,0%
CPB 30CV	10,00	78,54	43,6				2,3%	43,6	1		1,1%
CPB 30CV	10,00	78,54	40,3				9,6%	0,0	0		0,0%

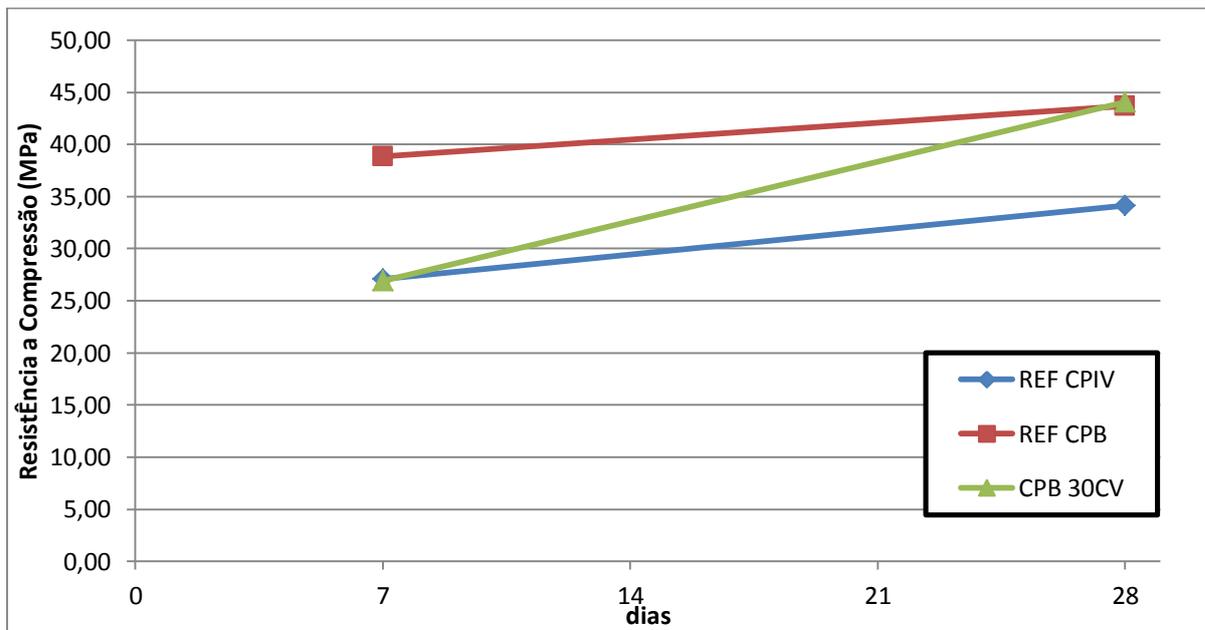
Fonte: Próprio Autor

Tabela 19 – Resultados de resistência a compressão

Mistura	fc (MPa)		% ganho de Resistência (7/28dias)
	Idade (dias)		
	7	28	
01	27,08	34,15	20,70
02	38,85	43,71	18,57
03	26,92	44,05	38,89

Fonte: Próprio Autor

Gráfico 4 – Evolução da resistência à compressão



Fonte: Próprio Autor

Os resultados de resistência à compressão mostraram que o concreto autoadensável feito com CP IV apresentou resistência inferior comparado com cimento Portland branco, aos 7 dias. Isto é visível devido ao retardo das reações de hidratação. Porém aos 28 dias o resultado ficou abaixo do esperado, pois em longo prazo, a pozolana aumenta a resistência do concreto, devido ao refinamento dos poros da pasta, para isto seria bom que houvesse uma cura controlada das amostras, podendo ter sido a causa da baixa resistência, pois durante a cura deste

traço a temperatura ambiente encontrava-se baixa, diminuindo ainda mais as reações de hidratação, em razão disso a pozolana seguiria acrescentando resistência aos CP's em maiores idades.

Para os resultados da mistura contendo apenas cimento branco, observou-se uma elevada resistência aos 7 dias mas um pequeno acréscimo de resistência aos 28 dias, como esperado, já que não possui presença de pozolana. Para a amostra com 30% de substituição do cimento branco por cinza volante a resistência aos 7 dias se apresentou ligeiramente inferior ao referência cinza, devido a baixa resistência inicial que a cinza causa. Entretanto aos 28 dias houve um elevado acréscimo de resistência, sendo esta superior a MCPB, mostrando a eficácia que esta substituição fornece, podendo fornecer em idades mais avançadas uma resistência muito mais elevada.

4.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

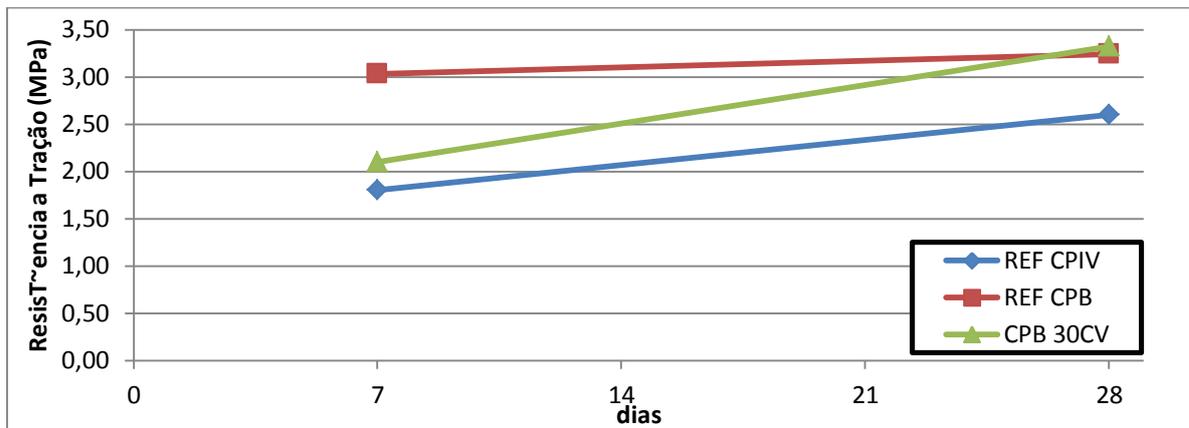
Os resultados obtidos nos ensaios de resistência a tração por compressão diametral para os três traços mostrados são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Resultados de resistência à tração por compressão diametral

Mistura	fc (MPa)		% ganho de Resistência (7/28dias)
	Idade (dias)		
	7	28	
01	1,8	2,6	30,77
02	3,03	3,24	6,48
03	2,1	3,33	36,94

Fonte: Próprio Autor

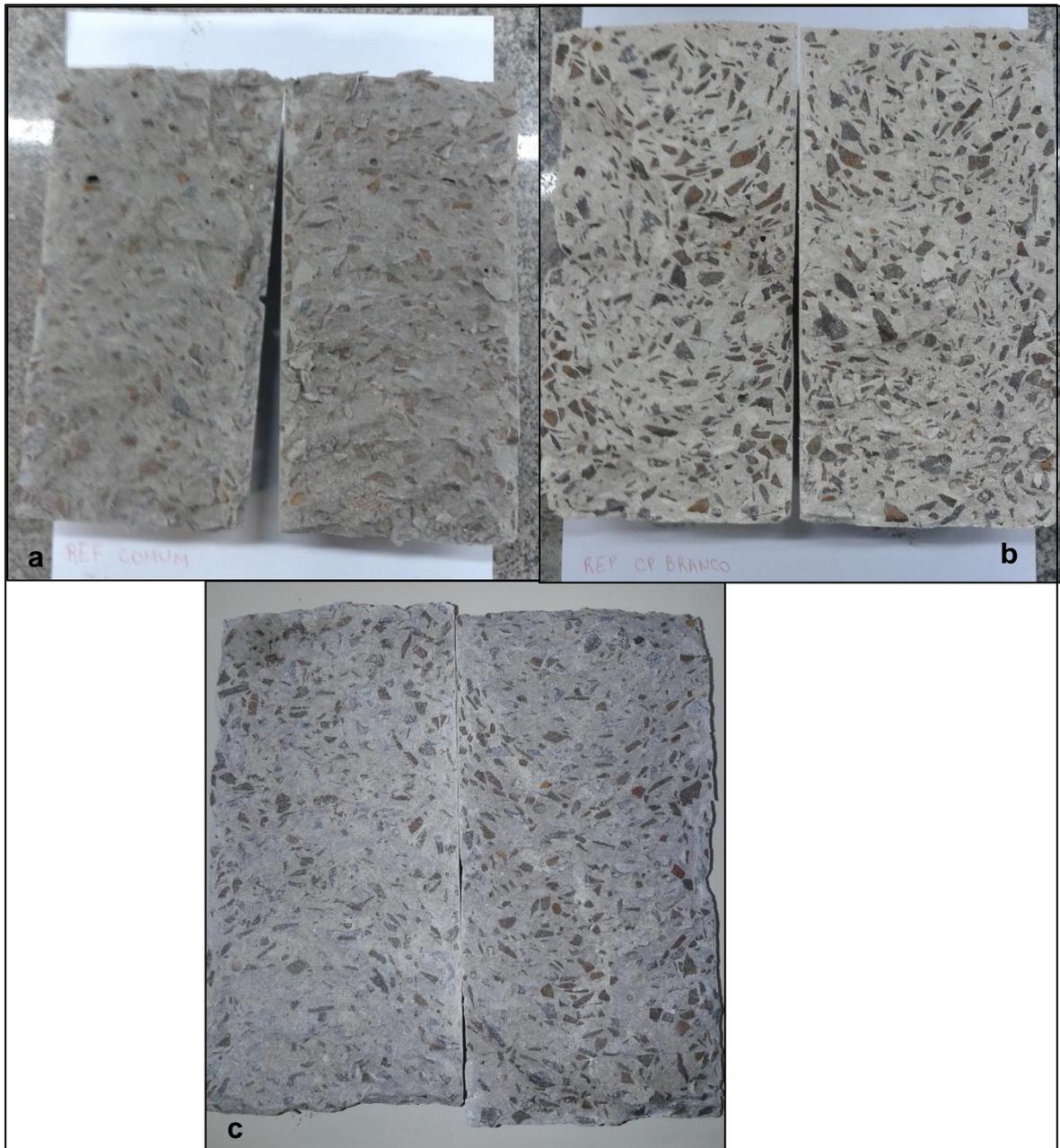
Gráfico 5 – Evolução da resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Próprio Autor

Analisando os resultados, o concreto MCPIV apresentou resistência mais baixa a tração entre todas as misturas e novamente observamos um acréscimo maior no concreto branco com substituição de cimento por cinza volante aos 28 dias.

Figura 40 – Amostras do ensaio a tração por compressão diametral



Fonte: Próprio Autor

A Figura 40a mostra o concreto MPCPIV, a Figura 40b o MPCB e a Figura 40c o MPCBCV. Nestas imagens é possível visualizar que houve uma distribuição muito homogênea dos agregados graúdos no interior do corpo-de-prova, sem a presença de segregação, sendo possível observar que os agregados graúdos se posicionam bem próximo a borda do corpo-de-prova.

4.2.3 Análise de custos

4.4.1 Análise comparativa entre traços

Com o intuito de analisar qual dos traços apresentou melhor custo/resistência à compressão foi elaborada a Tabela 21. O preço do aditivo foi obtido através de orçamento realizado pela fornecedora do aditivo para este trabalho, o preço do CPB foi adquirido através de loja de material de construção localizada em Santa Maria – RS, os valores de agregado graúdo e miúdo e do CP IV foram obtidos através de orçamento realizado em loja de material de construção situada no município de Alegrete. Todos estes orçamentos foram das empresas em que se obteve os materiais para esta pesquisa.

Em função da cinza volante não ser mais comercializada diretamente para dosagens em campo, foi utilizado o valor obtido por Lübeck (2008), adequando o custo através de cotação do dólar no mês de agosto, com fonte nas médias calculadas pela ACI-NH/CB/EV – Setor de Estatística. O custo da água foi desconsiderado devido a sua pouca influência no valor final do concreto.

Tabela 21 – Preço unitário para os materiais

Insumo	Preço (R\$/kg)
CPB	R\$ 2,00 /kg
Cinza Volante	R\$ 0,29 /kg
Areia	R\$ 0,02 /kg
Brita	R\$ 0,02 /kg
Aditivo ADVA CAST	
525	R\$ 0,82 /kg
CPIV	R\$ 0,50 /kg

Fonte: Próprio Autor

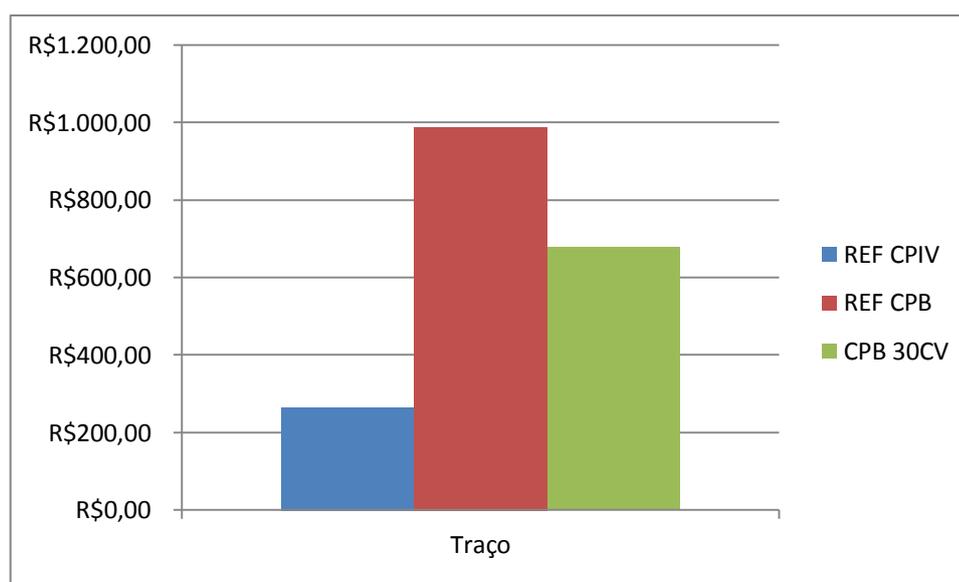
O custo em Reais para a produção do metro cúbico pode ser visto na Tabela 22 e é apresentado graficamente os custos das misturas no Gráfico 6 – Comparação entre custos devido os materiais dos traços.

Tabela 22 – Custo das misturas por m³

Mistura	Cimento	Cinza Volante	Areia	Brita	Água	Aditivo	Custo (R\$/m ³)
REF CPIV	453,15	0	815,67	996,93	181,26	2,49	R\$ 264,87
REF CPB	474,11	0	853,4	1043,04	189,64	2,60	R\$ 998,28
CPB 30CV	308,3	86,93	792,77	968,95	176,17	2,42	R\$ 679,03

Fonte: Próprio Autor

Gráfico 6 – Comparação entre custos devido os materiais dos traços



Fonte: Próprio Autor

É possível observar que, em gasto de materiais, o concreto MCPB apresentou um acréscimo de 73,20% sobre o concreto MCPIV, somente devido ao elevado custo em que o cimento branco encontra-se atualmente. O concreto MCBCV, por sua vez, causou um decréscimo de 31,30% em relação a MCB, já que este substituiu o cimento branco, principal fonte do gasto para este tipo de autoadensável.

No momento atual, a produção de cimento Portland branco encontra-se em baixa, resultando em um cimento quatro vezes mais caro que o convencional. Intrinsecamente a este fato o custo do concreto autoadensável branco e com

substituição parcial do cimento por cinza volante, alcançou elevado custo comparado com o convencional.

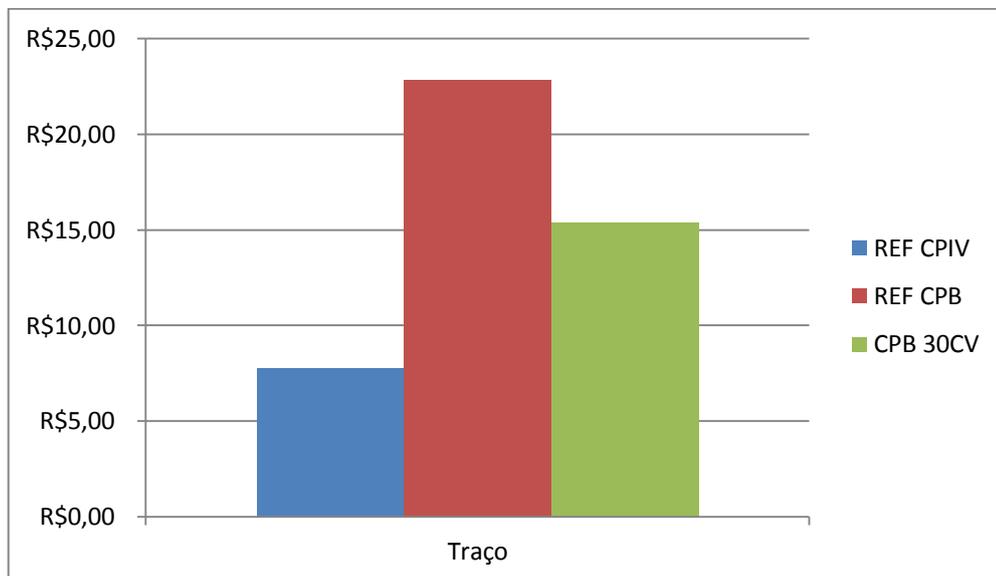
Analisando comparativamente os traços para obter melhor custo em relação a MPa da resistência a compressão, foi obtida a relação custo/resistência. Pode-se observar os resultados na Tabela 23.

Tabela 23 – R\$/MPa para as misturas testadas

Mistura	fc 28 (MPa)	Custo (R\$/m ³)	R\$/MPa 28 dias
REF CP IV	34,15	R\$ 264,87	R\$ 7,76
REF CPB	43,71	R\$ 998,28	R\$ 22,84
CPB 30CV	44,05	R\$ 679,03	R\$ 15,41

Fonte: Próprio Autor

Gráfico 7 – R\$/m³



Fonte: Próprio Autor

A diferença entre custos quando utilizado cinza volante foi comprovada, com esta diminuição do uso do cimento branco em concretos autoadensáveis é possível obter um concreto mais acessível quanto a orçamento sem perder a qualidade e função de um concreto aparente branco, a cinza também apresentou melhor resistência comparado a MPCB.

Assim sendo, o terceiro traço tornou-se aproximadamente duas vezes mais caro quanto ao MPCPIV. Já para a MPCB, o custo foi aproximadamente três vezes mais caro que a MPCPIV.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as considerações finais e sugestões para futuras pesquisas a partir dos resultados apresentados e analisados no capítulo anterior. Desta forma as considerações finais são apresentadas a seguir.

Quando obtido o traço referência de cimento cinza, através do método de Gomes, Gettu e Agulló, com os devidos cuidados de controle de temperatura dos materiais, definição de teor de aditivo, teor de argamassa, agregados, relação a/c e consumo de cimento, trona-se prático a substituição de certos materiais (cimento, adição) para obtenção de novos traços. Com simples alterações de quantidade e materiais no método utilizado, foi possível obter todos os traços de autoadensáveis utilizados neste trabalho.

Para as três misturas de concreto autoadensável foram obtidos os resultados exigidos para os ensaios no estado plástico, tanto os de fluidez, apresentar espalhamento entre 660 e 750 mm, resistência a segregação, fluir até +3 segundos de diferença no funil-V 5min com relação ao funil-V, e habilidade passante, apresentar relação maior ou igual a 0,8 no ensaio da caixa L. A substituição de cimento por 30% de cinza volante na MCBCV com relação a MCPB apresentou fluidez mais elevada, obtido devido maior espalhamento no ensaio espalhamento e esperado conforme literatura. Esta mistura mostrou-se mais coesa quanto à sem cinza volante. Houve uma leve redução na habilidade passante e resistência à segregação, porém os resultados não variaram significativamente ao utilizar cinza volante com cimento branco.

No estado endurecido observou-se que a MCPBCV obteve decréscimo de resistência comparado à MCPB aos 7 dias e apresentando comportamento parecido com a MCPIV, no qual também possui substituição pozolânica. Isto ocorreu devido ao fato da MCPBCV utilizar a pozolana para retardar as reações de hidratação nos períodos iniciais. Notou-se elevado ganho de resistência aos 28 dias, superando a resistência da referência com CPB, isto ocorreu devido principalmente ao refinamento dos poros da pasta.

Quanto à relação custo/benefício dos traços realizados, comprovou-se que a utilização de cimento branco encarece o custo final do metro cúbico do concreto, no momento desta pesquisa o custo do CPB encontrava-se quatro vezes mais caro que do CP IV. Quando analisado apenas pelo ponto de vista dos materiais para o metro cúbico de concreto, a diferença entre os concretos autoadensáveis de cimento branco com a MCPIV se tornam mais elevadas do que quando se analisa o custo/benefício dos traços quanto à resistência a compressão dos corpos-de-prova. Portanto, quando se procura por um apelo arquitetônico e uma melhor resistência, utilizar o CPB em concretos autoadensáveis, juntamente com substituição parcial por pozolana, sendo neste trabalho 30% em volume do consumo do cimento inicial por cinza volante, não altera significativamente a coloração do concreto, seguindo o seu apelo arquitetônico, aumenta sua resistência e reduzindo o seu custo, tanto em material como do m^3/MPa , sendo este último aproximadamente 33% mais barato.

5.1. Sugestão de Trabalhos

Para trabalhos futuros seria de grande relevância analisar:

1. A influência de corantes no concreto branco, já que estes influenciariam no aspecto do estado plástico e mecânico do concreto autoadensável, como se comportará o concreto com diferentes colorações de corantes;
2. Emprego de outros tipos de adições minerais, como exemplo, a cinza de casca de arroz, metacaulim, escória de alto-forno, entre outros. Analisar a sua influência no comportamento plástico e mecânico dos CAA.
3. Realizar diferentes métodos de dosagem para a obtenção do concreto autoadensável, podendo utilizar métodos computacionais a fim de montar um banco de dados com a caracterização dos materiais, simplificando o processo e possibilitando a elaboração de variados traços;
4. Realização de concreto autoadensável substituindo parcialmente os agregados por resíduos da construção civil, visando uma maior sustentabilidade e diminuição de custos do CAA;
5. Elaboração de traço utilizando fibras de aço, polipropileno, coco, entre outros. Com o intuito de analisar a influência desses materiais na resistência à compressão ou no estado fresco do CAA.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, C. **Concreto de cimento Portland branco estrutural: Análise da adição de pigmentos quanto à resistência à compressão.** 2006, 99f. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia Civil), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.

ALENCAR, R.S.A. **Dosagem do Concreto Auto-Adensável: Produção de Pré-Fabricados.** 2008, 179p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil), Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

ALENCAR, R; BASTOS, S; HENDGES, D. **A influência da adição de pigmentos na resistência à compressão e durabilidade de concretos com cimento branco e cinza.** 2005, Anais do 47º Congresso Brasileiro do Concreto, São Paulo.

AMBROISE, J.; ROLS, S.; PÉRA, J. Production and testing of self-leveling concrete. In: **High Performance Concrete.** CD-ROM. Gramado, 1999.

APPLETON, Júlio. **Construções em Betão – Nota histórica sobre a sua evolução.** 2005. Grupo de Betão Armado e Pré-Esforçado. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10908:** Aditivos para argamassa e concreto – Ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:** Agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003^a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900:** Água para amassamento do concreto. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12989:** Cimento Portland Branco. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-1:** Concreto auto-adensável Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-2**: Concreto auto- adensável, Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-4**: Concreto auto- adensável, Parte 4: Determinação da habilidade passante – Método da caixa L. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-5**: Concreto auto- adensável, Parte 5: Determinação da viscosidade – Método do funil V. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.

BARIN, D. **Carbonatação e absorção capilar em concretos de cimento Portland branco com altos teores de adição de escória de alto forno e ativador químico**. 2008, 171f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2008.

BATTAGIN, A.F; BATTAGIN, I. L da S. A Norma Brasileira de água de amassamento do concreto – uma contribuição para a sustentabilidade **Concreto & Construções**, ed. 58, Abril/Maio /Junho /2010.

BORJA, E. V. **Efeitos da adição de argila expandida e adições minerais na formulação de concretos estruturais leves autoadensáveis**. 2011, 211f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2011.

BRANCO, R. P. **Utilização de resíduos de concreto em concreto autoadensável**. Ilha Solteira. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista, 2012.

CASTAÑÓN, A. M.; GRANDA, S. G.; GUERRERO, A. M.; GÓMEZ, F. **Estudio de las fases mineralógicas del clínker em uma cementera española, utilizando el método de Rietveld**. Universidad Nacional de Colômbia. Bogotá. 2011.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Conab). 2013. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_07_09_09_04_53_boletim_graos_junho__2013.pdf>. Acesso em: 11 jul. 2013.

COUTINHO, B. S. **Propriedades e comportamento estrutural do concreto autoadensável**. 2011, 240f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2011.

DELLINGHAUSEN, L. de M. **Retração total e penetração de cloretos em concretos com cimento Portland branco e escória de alto forno**. 2009, 119f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **DNER-ME 194. Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman**. Rio de Janeiro, RJ. 1998.

EFNARC. **The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. Specification, Production and Use**. Reino Unido. 2005. (<http://www.efnarc.org/>)

FARIA, Renato. Artigo 69046: Novo edifício da Fundação Iberê Camargo tem paredes maciças em concreto branco armado. Aço foi tratado para aumentar durabilidade. **Téchne**, ed. 129, dezembro/2007.

FARIA, Renato. Artigo76078: Solução Fluida. **Téchne**, ed. 132, 2008.

FÉLIOT, J.; ROCHEFORT, B. **BETOCIB La lettre: Béton de Ciment Blanc**. Paris, França, n. 17, p. 13, janeiro 2005.

FONSECA, A. A.; NUNES, A. Betão Branco: fabrico, características e utilização estrutural. In: JORNADAS DE BETÃO, 1995. **Anais ...** Portugal: FEUP, 1995.

GOMES, P., C., C. BARROS, A., R. **Método de Dosagem de Concreto Autoadensável**. Editora PINI Ltda. 1^o Edição. p. 165. 2009.

HELENE, P. Dosagem dos concretos de cimento Portland. In: **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. Ed: F.C. ISAIA. São Paulo, v. 1, cap. 15, p. 439 – 471, 2005.

HOPPE, T. F. **Resistividade Elétrica de Concretos Contendo Diferentes Teores de Cinza de Casca de Arroz**. 2005. 146p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2005.

ISAIA, G. E., et al., **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**, IBRACON, 2005.

KIRCHHEIM, A. P. **Concreto de cimento Portland branco estrutural: avaliação da carbonatação e absorção capilar**. 2003, 154f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

KIRCHHEIM, A. P.; PASSUELO, A.; DAL MOLIN, D. C. C.; SILVA FILHO, L. C. P. **Concreto Branco**. In: **Concreto: Ensino, Pesquisas e Realizações**. Geraldo Isaia (Ed.). IBRACON, São Paulo, 2005.

KIRCHHEIM, A. P.; PASSUELO, A.; MOLIN, D. C. C. D.; FILHO, L. C. P. S. **Durabilidade do concreto branco: Estudos realizados**. II Seminário de Patologias das Edificações. Salão de Atos II da UFRGS. Porto Alegre. 2004.

LÜBECK, André. **Resistividade elétrica de concretos de cimento Portland Branco e elevados teores de escória de alto forno**. 2008, 142f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2008.

MARANGON, E. **Desenvolvimento e caracterização de concretos autoadensáveis reforçados com fibras de aço**. 2006, 142f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2006.

MARQUES, A. C. **Concreto autoadensável**: Caracterização da evolução das propriedades mecânicas e estudo da sua deformabilidade por solicitação mecânica, retração e fluência. 2011, 176f. Tese (Doutorado em Ciências) Escola Politécnica, Universidade São Paulo. São Paulo. 2011.

MEHTA P; MONTEIRO P. **Concrete: Microstructure, properties, and materials**. The McGraw-Hills Companies, Inc., New York; 2006.

NERO, J. M. G.; NUNENS, A. **Betão Branco: Fundamentos para a Prescrição e Utilização do Betão Branco**. **SECIL**, Lisboa, Portugal, 2000a.

EVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Editora PINI Ltda. 2ª Edição. p.828. 1997.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. Development, present use and future. Edição: A. Skarendhal; Petersson. In: First International Rilem Symposium on Self-compacting Concrete, 2003, Estocolmo. **Proceedings...** França: Rilem Publications, p. 3-14, 2003.

OKAMURA, Hajime. **Self-Compacting High Performance Concrete**. Concrete International, p.50-54. 1997.

OKAMURA, Hajime; OZAWA, Kazumasa; OUCHI, Masahiro. Self-Compacting Concrete. Structural Concrete, Vol.1, No.1, p.3-17. **Journal of the fib**. Março de 2000.

PASSUELO, Alexandra et al. **Análise cromática de concretos produzidos com cimento branco estrutural e diferentes tipos de agregados**. In: 46º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC2004. 2004. Florianópolis. Anais eletrônicos... Florianópolis, SC. 1 CD-ROM

PASSUELO, Alexandra. **Análise de parâmetros influentes na cromaticidade e no comportamento mecânico de concretos a base de cimento branco**. 2004, 176f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

PEDROSO, Fábio. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais utilizado pelo homem. **Concreto & Construções**, ed. 53, Janeiro/Fevereiro/Março/2009.

REPETTE, W. L. Concretos de Última Geração: Presente e Futuro. In: **CONCRETO: Ensino, Pesquisa e Realizações**. / ed G. C. Isaia. Vol. 2. São Paulo. IBRACON, 2005.

SANTOS, Paulo F. **A Arquitetura da Sociedade Industrial**. Belo Horizonte, EAUFMG, 1961.

SANTOS, R. E. dos. **A armação do concreto no Brasil: história da difusão do sistema construtivo concreto armado e da construção de sua hegemonia**. 2008, 338f. Tese (Doutorado em Conhecimento e Inclusão Social) Faculdade de Educação, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2008.

SIQUEIRA, H. **Penetração de cloretos em concreto compostos com cimento Portland branco e escória de alto forno, ativados quimicamente**. 2008, 141f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2008.

SNIC – SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Consumo da produção nacional de cimento por regiões e estados**. 2011. Disponível em < http://www.snic.org.br/pdf/snic-relatorio2011-12_web.pdf >. Acesso em 12 Dez. 2012.

TENÓRIO, J. A. S.; ARAÚJO, F. G. S.; PEREIRA, S. S. R.; FERREIRA, A. V.; ESPINOSA, D. C. R.; BARROS, A. **Decomposição da fase majoritária do cimento Portland – Parte II: alita com adições de Fe e Al**. Revista Escola de Minas. Ouro Preto. 2003.

TUTIKIAN, B.F. **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis**. 2004, 148p. Dissertação (Mestrado em Engenharia na modalidade Acadêmico). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2004.

TUTIKIAN, B.F.; DAL MOLIN D. C. **Concreto auto-adensável**. São Paulo: Ed. PINI, 2008.

APENDICE

Neste apêndice são mostradas as tabelas dos ensaios de caracterização e resistência a compressão.

Ensaio Massa Específica (Conforme NBR NM 23)

Cimento Portland IV

Amostra	Peso	Vquerosene	Vamostra	μ
1	60,0001	0,7	21,8	2,84361
2	59,9999	0,7	21,8	2,84360
			$\mu_{med} =$	2,84360

Cimento Branco

Amostra	Peso	Vquerosene	Vamostra	μ
1	60,001	0,3	20	3,04574
2	60,0005	0,5	20,2	3,04571
			$\mu_{med} =$	3,04572

Cinza Volante

Amostra	Peso	Vquerosene	Vamostra	μ
1	44	0,5	22,6	1,9910
2	40	0,7	20,7	2,0000
			$\mu_{med} =$	2,0000

Ensaio Teor de Sólidos

Amostra	Peso (g)	Peso seco (g)	Teor Sólidos
1 sprite	39,9	30,9065	22,54010025
2 fanta	40	30,923	22,6925
		Teor médio =	22,61630013

Tara = 5,8 g

Tabela Resumo Compressão:

idade (dias)	REF CPIV	REF CPB	CPB 30CV
7	27,08	38,85	26,92
28	34,15	43,71	44,05