

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

HELEN CRISTINE VIEIRA

**INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AGREGADOS
GRAÚDOS DE RCD CLASSE VERMELHO EM
CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS**

ALEGRETE

2015

HELEN CRISTINE VIEIRA

**INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AGREGADOS
GRAÚDOS DE RCD CLASSE VERMELHO EM
CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS**

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

Orientador: Prof Dr. Ederli Marangon

Alegrete

2015

HELEN CRISTINE VIEIRA

**INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AGREGADOS
GRAÚDOS DE RCD DE CLASSE VERMELHO EM
CONCRETO AUTOADENSÁVEIS**

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

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 06/07/2015.

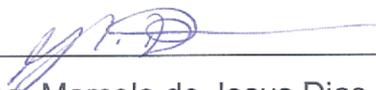
Banca examinadora:



Prof. Dr. Ederli Marangon

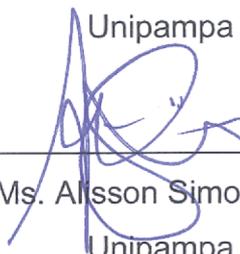
Orientador

Unipampa



Eng. Marcelo de Jesus Dias de Oliveira

Unipampa



Prof. Ms. Alisson Simonetti Milani

Unipampa

Dedico esse trabalho aos meus pais,
sem os quais jamais teria chegado até
aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado a força necessária para a realização desse sonho.

Aos meus pais, João e Solange, os quais inúmeras vezes me serviram de inspiração e me dedicaram amor, carinho e compreensão durante toda essa jornada.

Aos meus irmãos, Tiéle e João Vitor, simplesmente por me fazerem mais feliz.

Ao meu noivo, André, pelo companheirismo e carinho dedicados a mim durante essa trajetória.

Ao meu orientador, professor Ederli Marangon, pelas horas dedicadas a me ajudar e por dividir comigo um pouco do seu conhecimento.

A minha amiga e colega Ritianne, pela incansável ajuda em todas as etapas desse trabalho e por compartilhar comigo a sua experiência.

Aos técnicos responsáveis pelo laboratório de Materiais de Construção Civil da Unipampa, em especial a Raquel dos Santos Machado e ao engenheiro civil Marcelo de Jesus Dias de Oliveira, pela disponibilidade e boa vontade em me ajudar na realização dos ensaios.

“Quanto mais aumenta nosso conhecimento, mais evidente fica nossa ignorância”.

John F. Kennedy

RESUMO

Neste trabalho são produzidos e caracterizados concretos autoadensáveis (CAA) com substituição parcial de agregados graúdos naturais por agregados graúdos de resíduo de construção e demolição (RCD) classe vermelho (AGR). O método de dosagem escolhido para a produção do CAA foi o de Gomes, Gettú e Agulló. Os traços para a produção dos concretos foram desenvolvidos a partir da composição de dois esqueletos granulares, o primeiro com o objetivo de obter-se a melhor porcentagem de substituição entre o agregado graúdo natural e o agregado graúdo reciclado, e outro para determinar a proporção entre essa mistura e o agregado graúdo natural. Com isso, foram definidas quatro misturas, um concreto autoadensável sem substituição de agregado reciclado, denominado CAA_{REFERÊNCIA}, outra mistura contendo 40% de agregado reciclado (CAA_{40%}), um concreto autoadensável com 50% de agregado reciclado (CAA_{50%}) e um concreto autoadensável com 60% de agregado reciclado (CAA_{60%}). Essas misturas tiveram suas propriedades reológicas e mecânicas analisadas. No estado fresco foram realizados ensaios para avaliar a habilidade passante na Caixa-L, Caixa-U e no Anel-J, a viscosidade plástica aparente no ensaio de tempo de escoamento (t_{500}) e no ensaio do Funil-V, e trabalhabilidade nos ensaios de espalhamento e cone invertido, os resultados obtidos demonstram que com a substituição parcial de agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado as misturas apresentaram maior viscosidade, diminuição da habilidade passante e fluidez. Quanto à análise mecânica foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral que indicaram que, no estado endurecido, a mistura CAA_{60%} obteve os melhores resultados nos dois ensaios. Adicionalmente, os resultados de resistência à compressão e à tração foram comparados com os resultados obtidos para um CAA com substituição parcial de agregado graúdo natural por agregado graúdo de resíduo de construção e demolição classe cinza, o que mostrou que aos 7 dias os CAA produzidos com RCD vermelho, em sua maioria, adquiriram maiores resistências, porém aos 28 dias os CAA com RCD cinza atingiram resistências superiores em todas as porcentagens de substituição.

Palavras-chave: Concreto autoadensável. Resíduos de construção e demolição. Ensaio Reológicos. Ensaio Mecânicos.

ABSTRACT

This work produced and characterized autoadensáveis concrete (CAA) with partial replacement of natural coarse aggregate by coarse aggregates from construction and demolition waste red class. The assay technique chosen for the CAA production was to Gomes, Gettú and Agulló. The traces for the concrete production were developed from the composition of two granular skeletons, the first in order to obtain the best percentage of substitution between natural coarse aggregate and recycled coarse aggregate, and another to determine the ratio of this mixture and the added natural kid. Thus, four mixtures were set a self-compacting concrete without recycled aggregate replacement called CAA_{REFERÊNCIA}, another mixture containing 40% of recycled aggregate (CAA_{40%}) a self-compacting concrete with 50% recycled aggregate (CAA_{50%}) and a self-compacting concrete 60% recycled aggregate (CAA_{60%}). These mixtures had their rheological and mechanical properties analyzed. In fresh tests were carried out to assess the passing ability in Box-L, Box-U and Ring-J, the apparent plastic viscosity in the flow of testing time (t_{500}) and test the funnel-V, and workability for Slump flow test and inverted cone, the results show that with the partial replacement of natural coarse aggregate by recycled coarse aggregate mixtures showed higher viscosity, reduced passing ability and fluidity. As for mechanical analysis were performed strength tests to axial compression and diametral compression traction indicated that, in the hardened state, the CAA_{60%} mixture obtained the best results in both trials. Additionally, the compressive and tensile strength results were compared with the results obtained for a CAA partial substitution with natural coarse aggregate by coarse aggregate from construction and demolition class gray residue, which showed that at 7 days the CAA produced with Construction and demolition waste red, mostly acquired greater resistance, but at 28 days the CAA with gray Construction and demolition waste reached higher resistance in all substitution percentages.

Keywords: self-compacting concrete. Construction and demolition waste. Rheological tests. Mechanical tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Frasco de Le Chetelier.....	28
Figura 2 – Granulometria dos agregados	30
Figura 3 – Esqueleto granular entre AGN e AGR	33
Figura 4 – Esqueleto granular AMN e AG	34
Figura 5 – Descrição do método de dosagem	35
Figura 6 – Equipamento para o ensaio de espalhamento.....	40
Figura 7 – Ensaio de espalhamento realizado em laboratório.....	41
Figura 8 – Ensaio com o cone invertido.....	42
Figura 9 – Dimensões do Anel-J.....	43
Figura 10 – Ensaio com o Anel-J.....	45
Figura 11 – Dimensões do Funil-V.....	46
Figura 12 – Ensaio do Funil-V.....	47
Figura 13 – Dimensões da Caixa-L.....	48
Figura 14 – Ensaio com a Caixa-L.....	49
Figura 15 – Ensaio com a Caixa-U.....	51
Figura 16 – Prensa para os ensaios de compressão.....	52
Figura 17 – Disposição do corpo de prova.....	53
Figura 18 – Espalhamento CAA.....	55
Figura 19 – Espalhamento x T_v	57
Figura 20 - Resistência à Compressão CAAv e CAAC.....	60

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 - Classificação granulométrica dos agregados.....	29
Tabela 2 – Massa específica e absorção dos agregados.....	30
Tabela 3 – Massa unitária e volume de vazios dos agregados.....	31
Tabela 4 – Aditivo superplastificante.....	32
Tabela 5 – Composição das misturas estudadas.....	39
Tabela 6 – Classe de espalhamento do CAA.....	41
Tabela 7 – Classe de viscosidade plástica aparente do CAA.....	42
Tabela 8 – Classe de habilidade passante do CAA.....	44
Tabela 9 – Classe de viscosidade plástica aparente do CAA.....	46
Tabela 10 – Classe de viscosidade plástica aparente do CAA.....	49
Tabela 11 – Resultados médios de espalhamento e cone invertido.....	54
Tabela 12 - Resultados de d_F a classificação quanto a habilidade passante pelo Anel-J.....	56
Tabela 13 - Tempo de fluxo e classificação dos CAA no ensaio do Funil-V...56	
Tabela 14 - Habilidade passante e classificação dos CAA no ensaio da Caixa-L.....	57
Tabela 15 - Classificação quanto ao ensaio da Caixa-U.....	58
Tabela 16 - Valores de resistência à compressão (σ_c), resistência à tração por compressão diametral (σ_t), DV e CV.....	59
Tabela 17 - Comparação entre as resistências à compressão (σ_c) e à tração (σ_t) dos concretos aos 7 e 28 dias.....	60
Quadro 1 - Comparação entre a composição do CVV e o CAA	19
Quadro 2 - Tipos de cimento comerciais.....	20
Quadro 3 - Ensaio para caracterização física de agregados.....	29

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland;
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;
AG – Agregado graúdo;
AGN – Agregado graúdo natural;
AGR – Agregado graúdo de RCD;
CAA – Concreto Autoadensável;
CAA_{REF} – Concreto autoadensável sem RCD;
CAA_{40%} – Concreto autoadensável com 40 % AGR;
CAA_{50%} – Concreto autoadensável com 50 % AGR;
CAA_{60%} – Concreto autoadensável com 60 % AGR;
CAD – Concreto de Auto Desempenho;
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente;
CP – Cimento Portland;
Cp's – Corpos-de-prova;
CV – Cinza volante;
CVV – Concreto Convencional;
MPa – Mega pascal;
NBR – Norma Brasileira;
PJ – Classe de habilidade pelo Anel-J;
PL – Classe de habilidade pela Caixa-L;
RCD – Resíduo de Construção e Demolição.
SF – Classe de espalhamento;
VF – Classe de viscosidade plástica aparente pelo Funil-V;
VS – Classe de viscosidade plástica aparente pelo ensaio t_{500} ;

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
1.2	Justificativa	15
1.3	Estrutura do Trabalho	16
2	REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA	17
2.1	Concreto Autoadensável	17
2.1.1	Vantagens e Desvantagens	18
2.2	Composição do CAA	19
2.2.1	Cimento	19
2.2.2	Agregados	20
2.2.2.1	Agregado Graúdo	20
2.2.2.2	Agregado Miúdo	21
2.2.3	Adições Minerais	22
2.2.4	Aditivos	22
2.2.5	Água	23
2.3	Resíduos de construção e demolição	23
2.3.1	Tipos de resíduos	23
2.3.2	Agregados de RCD	24
2.4	Legislação vigente para o uso de RCD	25
3	METODOLOGIA	27
3.1	Obtenção e caracterização dos materiais	27
3.1.1	Cimento Portland e adições minerais	27
3.1.2	Agregados	28
3.1.2.1	Distribuição granulométrica	29
3.1.2.2	Massa específica dos agregados	30
3.1.2.3	Massa unitária e volume de vazios	31
3.1.3	Aditivos	32
3.2	Determinação da porcentagem de substituição de RCD	32
3.3	Dosagem do CAA	34

3.4 Ensaio no concreto no estado fresco.....	39
3.4.1 Ensaio de espalhamento (slump flow).....	39
3.4.2 Cone invertido.....	42
3.4.3 Ensaio do Anel-J (J-Ring).....	43
3.4.4 Ensaio do Funil-V (V-Funnel test).....	45
3.4.5 Ensaio da Caixa-L (L-Box test).....	47
3.4.6 Ensaio da Caixa-U (U-Box teste).....	50
3.5 Ensaio no concreto no estado endurecido.....	51
3.5.1 Ensaio de compressão axial	51
3.5.2 Ensaio de compressão diametral.....	53
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	54
4.1 Ensaio no concreto no estado fresco.....	54
4.1.1 Ensaio de espalhamento.....	54
4.1.2 Escoamento no Anel-J.....	56
4.1.3 Fluidez no Funil-V.....	56
4.1.4 Escoamento na Caixa-L.....	57
4.1.5 Escoamento na Caixa-U.....	58
4.2 Ensaio no concreto no estado endurecido.....	58
4.3 Comparação entre as resistências do CAA com RCD vermelho e o CAA com RCD cinza produzido por Silva (2015).....	60
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	62
5.1 Considerações Finais.....	62
5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	63
REFERÊNCIAS.....	65

1 INTRODUÇÃO

Atualmente a indústria da construção civil está em constante crescimento. Essa indústria é uma grande geradora de empregos, o que produz grandes benefícios para a sociedade. Porém, em contrapartida ela é uma das indústrias que mais causa impactos ambientais, pois consome uma grande quantidade de recursos naturais e também produz resíduos, que muitas vezes não são destinados a locais corretos.

Esses resíduos gerados, tanto em construções quando em demolições, são denominados RCD, e podem corresponder a aproximadamente 50% da massa de resíduos sólidos em um município (SANTOS; CÂNDIDA; FERREIRA, 2010; MMA; ICLEI, 2012). Porém a triagem de RCD em canteiros pode apresentar vantagens econômicas e ambientais, reduzindo o volume das classes de resíduos transportados, viabilizando soluções mais simples de reciclagem dos resíduos dependendo de sua classe (MIRANDA; ÂNGULO; CARELI, 2009). Com isso, o potencial para a reciclagem e reutilização do RCD em concretos vem sendo bastante estudado nos últimos anos.

Em meio a tudo isso, surgem novas tecnologias que visam acelerar e melhorar a qualidade das construções. Uma das tecnologias mais atuais é o Concreto Autoadensável. Porém a produção desse tipo de concreto ainda é pouco difundida devido ao alto custo de seus materiais (PERIUS, 2009).

No entanto, segundo Gomes e Barros (2009) as indústrias e construtoras perceberam que o uso de CAA pode gerar vários benefícios, tanto para os construtores quanto para os funcionários, inclusive podendo reduzir os custos finais da obra. Além disso, novas pesquisas estão sendo desenvolvidas na tentativa de reduzir os custos do CAA.

Uma das formas de tornar concretos e argamassas mais viáveis economicamente é a substituição dos agregados naturais por agregados reciclados, estes produzidos a partir de RCD. No Brasil, a produção de concretos com agregado reciclado não é algo habitual, porém percebe-se uma tendência, tanto da iniciativa privada quanto do poder público, no sentido de gerenciar a geração de entulhos de construção civil (BRANCO, 2012).

Em vista disso, o presente trabalho deseja sanar a seguinte questão: é possível com a substituição do agregado natural pelo reciclado obter-se um CAA com as características necessárias para o seu uso na construção civil?

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um traço de concreto autoadensável com substituição parcial do agregado graúdo por resíduo de construção e demolição de classe vermelho e caracterizar as suas propriedades reológicas no estado fresco e mecânicas no estado endurecido.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Dosar um concreto autoadensável com RCD classe vermelho;
- realizar ensaios de fluidez no estado fresco, utilizando o espalhamento (slump flow), cone invertido, anel-J, funil-V, caixa-L e caixa-U;
- executar ensaios mecânicos para a verificação da resistência à compressão e à tração por compressão diametral;
- comparar os resultados obtidos de resistência no CAA com substituição por RCD de classe vermelho com um CAA com substituição por RCD de classe cinza desenvolvido por Silva (2015).

1.2 Justificativa

Este trabalho tem como principal justificativa a questão ambiental, pois o crescente consumo de agregados naturais e deposição de resíduos da construção civil em locais inadequados, com o passar dos anos, elevarão o custo da construção civil enquanto prejudicam o meio ambiente.

Outra justificativa para a realização desse trabalho é o fato do CAA não ter sido suficientemente estudado até agora, principalmente a sua produção com substituição do agregado natural pelo RCD de classe vermelha.

1.3 Estrutura do Trabalho

No primeiro capítulo são abordados os aspectos introdutórios e também os objetivos deste trabalho bem como a justificativa para a escolha do tema.

O segundo capítulo trata dos conceitos teóricos utilizados como base para a realização deste trabalho.

O capítulo três mostra a metodologia que foi empregada para alcançar os objetivos deste trabalho.

O capítulo quatro apresenta os resultados dos ensaios propostos, juntamente com sua análise e possíveis justificativas.

No capítulo cinco são apresentadas as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA

2.1 Concreto Autoadensável

O CAA pode ser considerado uma tecnologia relativamente nova, um material cimentício de última geração, que segundo Perius (2009) pode ser enquadrado na categoria dos concretos de alto desempenho (CAD), que são qualquer mistura que atenda requisitos especiais, que não seriam alcançadas com procedimentos e materiais utilizados rotineiramente.

Porém, um concreto só pode ser considerado CAA quando três propriedades forem atingidas simultaneamente (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

São elas:

- fluidez: caracteriza a capacidade do CAA de fluir dentro da fôrma e preencher todos os espaços vazios;
- habilidade passante: é a coesão necessária para que a mistura escoe intacta pela fôrma, entre as armaduras, sem que haja obstrução do fluxo ou segregação;
- resistência a segregação: é a propriedade que defina a capacidade do CAA de manter-se coeso ao avançar dentro de fôrma, passando ou não por obstáculos.

Ainda segundo Tutikian e Dal Molin (2008), tanto em um concreto convencional quanto no CAA, a habilidade de preencher a fôrma sem vazios, é um dos principais fatores que influenciam na qualidade do concreto no estado endurecido. Porém o CAA não pode depender de nenhum tipo de equipamento, como vibradores de imersão ou régua vibratórias para atender esse requisito. A única ferramenta que pode ajudar esse concreto é o seu peso próprio, ou seja, a ação da gravidade.

É muito importante que o concreto atinja essas características, pois ele dependerá apenas de seu próprio peso para fluir nas fôrmas, não podendo ser auxiliado com o uso de vibração ou adensamento mecânico.

2.1.1 Vantagens e desvantagens

O CAA tem uma facilidade de ser aplicado muito superior a um concreto convencional, e essa é apenas uma das vantagens do seu uso, Tutikian (2004) e Tutikian e Dal Molin (2008) citam outras:

- uma alta capacidade de adensamento do CAA, o que elimina a possibilidade de nichos e falhas de concretagem;
- o CAA também permite a concretagem em zonas com grande densidade de armaduras, como por exemplo, encontro de vigas e pilares, onde o uso de vibrador seria difícil, diminuindo o risco de exposição do aço e com isso a deterioração da estrutura;
- bom acabamento superficial, sendo assim uma boa opção para o uso em concretos aparentes;
- redução significativa da mão-de-obra nas operações de lançamento e adensamento;
- maior rapidez na execução de construções de estrutura e menor esforço dos trabalhadores;
- o CAA tem a capacidade de concretar peças de seções reduzidas, e também permite a uma grande variedade de formas.

Existem também algumas desvantagens para o uso dessa tecnologia, como cita Lisboa (2004):

- dificuldade na obtenção, necessitando de mão de obra especializada para sua produção, controle tecnológico e aplicação;
- requer um maior controle, durante sua aplicação, do que o concreto convencional;
- necessita de cuidados especiais com relação ao transporte, a fim de evitar a segregação;
- apresenta menor tempo disponível para aplicação em relação ao concreto convencional, devido ao uso de superplastificante.

2.2 Composição do CAA

Os materiais que compõem um CAA, em prática, são os mesmos utilizados para a elaboração de um CVV, no entanto, com maior quantidade de finos e aditivos plastificantes, superplastificantes e modificadores de viscosidade (TUTIKIAN E DAL MOLIN, 2008), como mostra o Quadro 1.

Os materiais poderão ser considerados adequados para o uso em concreto, se não incluir componentes prejudiciais em uma quantidade que possam prejudicar a qualidade, a durabilidade, ou provocar corrosão nas armaduras (LISBOA, 2004).

Quadro 1: Comparação entre a composição do CVV e o CAA

Concreto Convencional (CVV)	Concreto Auto-Adensável (CAA)
Cimento Portland	Cimento Portland
Areia	Areia
Brita	Brita
Água	Água
-	Aditivos superplastificantes
-	Aditivos modificadores de viscosidade
-	Adições minerais quimicamente ativas ou Fílers

Fonte: adaptado de Tutikian e Dal Molin (2008)

2.2.1 Cimento

Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), os cimentos indicados para a produção de CAA são os mesmos usados para um CVV, não existindo critérios científicos especificando qual o cimento mais indicado para um CAA.

Os cimentos Portland comercializados estão no Quadro 2, segundo dados da ABCP.

Dependendo das exigências para o concreto, como resistência e durabilidade, deve ser escolhido o tipo de cimento (LISBOA, 2004).

Quadro 2: Tipos de cimentos comerciais

Tipo de cimento	Nomenclatura
Cimento portland comum	CP I
Cimento portland comum com material pozolanico	CP I-S
Cimento portland	CP II
Cimento portland com material pozolanico	CP II-Z
Cimento portland com escória de alto-forno	CP II-E
Cimento portland com fíler calcário	CP II-F
Cimento portland com escória de alto forno	CP III
Cimento portland com pozolana	CP IV
Cimento portland de alta resistência inicial	CP V ARI
Cimento portland resistente a sulfatos	CP (RS)
Cimento portland com baixo calor de hidratação	CP (BC)
cimento portland branco	CPB

Fonte: ABCP (2002)

Ainda segundo Tutikian e Dal Molin (2008) podem existir alguns fatores na microestrutura do cimento que podem levar a variabilidade nas propriedades reológicas finais do material fresco. A fim de evitar que isto ocorra, deve-se procurar seguir as especificações abaixo:

- granulometria adequada;
- controle na quantidade de Aluminato Tricálcico no cimento, pois, quanto menor for a sua quantidade na mistura, mais longo será o seu período de enrijecimento;
- maior superfície específica das partículas, menor a tensão de escoamento, o que leva a um aumento na viscosidade da mistura. Entretanto, deve-se verificar o calor de hidratação e conseqüentemente o aparecimento de fissuras por retração.

2.2.2 Agregados

2.2.2.1 Agregado Graúdo

Os agregados utilizados na composição do CAA devem ser escolhidos com a finalidade de garantir a sua passagem por obstáculos durante o lançamento, e também diminuir a tendência à segregação, em vista disso, a dimensão máxima do agregado graúdo deve ser restringida (GOMES E BARROS, 2009).

A distribuição granulométrica do agregado pode influenciar no empacotamento dos grãos e levar a uma alteração da fração volumétrica das britas que serão incorporadas ao concreto. Essa fração volumétrica está relacionada, principalmente, ao módulo de elasticidade do concreto e à retração por secagem, levando os concretos com mais agregados e menor teor de argamassa a serem menos deformáveis e com menores possibilidades de fissurarem por retração na secagem (MEHTA E MONTEIRO, 2006).

Segundo Tutikian e Dal Molin (2008) mesmo com o fato de que agregados angulares com superfícies ásperas apresentem melhor aderência com a pasta de cimento que agregados lisos e arredondados, eles podem levar ao surgimento de efeitos opostos no aumento do consumo de água e redução da trabalhabilidade se a angulosidade for muito acentuada. Portanto, indica-se para o CAA agregados que possuam coeficientes de forma o mais próximo possível de 1.

2.2.2.2 Agregado Miúdo

As areias que podem ser empregados no CAA, de uma forma geral, são as mesmas utilizadas para a produção do CVV. São mais recomendadas as areias naturais pelo fato de possuírem formas mais arredondadas e textura mais lisa. Deve-se evitar as areias obtidas através de processos industriais, pois elas podem apresentar uma composição granulométrica descontínua (GOMES E BARROS, 2009).

Como afirma Tutikian e Dal Molin (2008) os agregados miúdos, de uma forma geral, não possuem restrições para a produção de CAA, tanto em sua forma natural como as processadas industrialmente. Porém quando utilizado o agregado industrial, deve-se corrigir a descontinuidade granulométrica por meio de adição de outro tipo de areia. A seleção desse agregado está condicionada à demanda de água, fator importante que influencia a coesão e fluidez do concreto.

Otaviano (2007) ainda cita que há uma grande necessidade de realizar um controle rigoroso na umidade do agregado miúdo, que consiste em uma das principais causas de variação da fluidez da mistura do CAA.

2.2.3 Adições Minerais

Ao utilizar uma adição mineral como sílica ativa, cinza volante, metacaulin ou cinzas de casca de arroz, gera-se um ganho ecológico significativo, pois dá-se um uso para esses resíduos e subprodutos industriais.

Essas adições podem também desempenhar efeitos químicos e físicos na estrutura do material.

O efeito químico dessas adições minerais ocorre a partir da capacidade de reação com o hidróxido de cálcio – Ca(OH)_2 -, composto frágil e solúvel que se forma durante a hidratação do cimento Portland. Dele é derivado um composto resistente, o C-S-H (silicato hidratado de cálcio), que ocupa os vazios de maiores dimensões existentes na pasta de cimento ou na zona de transição, aumentando o desempenho mecânico e a durabilidade do concreto. Já o efeito físico pode ser desdobrado em três ações principais: o efeito filer, que é o aumento da densidade da mistura resultante do preenchimento dos vazios pelas minúsculas partículas das adições, o refinamento da estrutura de poros e dos produtos de hidratação do cimento, causado pelas pequenas partículas de adições que podem agir como pontos de nucleação para os produtos de hidratação, e a alteração da microestrutura da zona de transição, reduzindo ou eliminando o acúmulo de água livre que, normalmente, fica retido sob os agregados (TUTIKIAN E DAL MOLIN, 2008).

2.2.4 Aditivos

Os aditivos que podem ser considerados mais importantes para a obtenção de um CAA são os superplastificantes, eles reduzem a quantidade de água necessária ao concreto em mais de 20%. Outros tipos de aditivos também podem ser necessários para a obtenção das características de um CAA, dependendo das propriedades que se quer alcançar, como agentes modificadores de viscosidade, que melhoram a estabilidade; aditivos incorporadores de ar, para diminuir as tensões de congelamento e descongelamento dos concretos em regiões de baixa temperatura; aditivos retardadores de pega, entre outros. Também pode ser feito o uso de um agente modificador de viscosidade a fim de aumentar as condições de controle da segregação, quando a quantidade de finos é limitada, além de ajudar a melhorar a homogeneidade. O seu uso deve ser feito para que o concreto atenda as exigências estabelecidas nos ensaios específicos do CAA (LISBOA, 2004).

2.2.5 Água

A água recomendada para a utilização no CAA é a mesma que é recomendada para a fabricação do CVV.

De acordo com a NBR 15900 (ABNT/CB-18, 2009) os diversos tipos de água podem ser classificados para o uso em concretos da seguinte forma:

- água de abastecimento público é adequada para o concreto sem necessidade de realizar ensaios;
- a água potável que atende a portaria nº 518 do Ministério da Saúde é considerada dentro dos padrões exigidos pela norma;
- água de esgoto mesmo com tratamento, não é adequada para uso em concretos;
- água de fontes subterrâneas ou de captação pluvial ou ainda oriunda de processo residual industrial pode ser boa para uso do concreto, mas deve ser ensaiada;
- no caso de água salobra (água com salinidade entre a da água do mar e das chamadas águas doces) também pode ser utilizada, mas somente em concreto não armado. Para ambos a água deve ser ensaiada. De forma alguma usar água salobra em concreto armado ou protendido.

2.3 Resíduos de construção e demolição

A resolução CONAMA nº 307, de 05 de julho de 2002, define:

Resíduos da construção civil: são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha.(CONAMA, 2002, p. 1).

2.3.1 Tipos de resíduos

Os resíduos oriundos da construção civil poderão ser classificados, de acordo com a resolução nº 307 (CONAMA, 2002) da seguinte forma:

- Classe A - são os resíduos que podem ser reutilizados, ou mesmo reciclados, como por exemplo:

a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;

b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;

c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;

- Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros;

- Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso;

- Classe D - são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

2.3.2 Agregados de RCD

Ainda sobre a resolução nº 307 (CONAMA, 2002), um agregado reciclado pode ser definido como: material granular originado do beneficiamento de resíduos de construção, os quais apresentam características técnicas aceitáveis para a aplicação em obras de edificação, de infraestrutura, em aterros sanitários ou outras obras de engenharia.

De acordo com Buttler (2003), os resíduos de concreto no estado endurecido, normalmente são reciclados visando a sua reutilização como agregados em novas misturas ou para confecção de sub-bases e bases de rodovias. Entretanto, devido a algumas propriedades deletérias dos materiais reciclados, alguns pesquisadores estão propondo métodos alternativos para a reciclagem do concreto visando melhorar as propriedades desse material.

No Brasil, ainda não existe preocupação com demolição seletiva e boa parte dos resíduos são gerados na fase de construção, o agregado reciclado produzido é normalmente misto, ou seja, uma mistura de concretos, cerâmicas, rochas naturais, entre outros sendo que cada uma destas fases possui características muito

variáveis. Nas usinas de reciclagem de RCD classe A, a única triagem visual que pode-se fazer é classificar o RCD como cinza (predominantemente resíduos à base de cimento) e vermelho (predominantemente resíduos cerâmicos) (ÂNGULO et al 2004).

Assim, pode-se concluir que as classificações do RCD mineral como resíduos de concreto, de alvenaria ou mistos não garantem agregados reciclados com composição e propriedades físicas homogêneas, o que dificulta sua inserção no mercado de agregados (ÂNGULO, 2005).

Novamente Ângulo (2005) cita que tanto no Brasil como em outros países, a maior parte do mercado dos agregados é destinada para o uso em concretos e em argamassas. Porém, no Brasil, a reciclagem de toda fração mineral do RCD como agregados ocupa apenas cerca de 20% do mercado de produtos à base de cimento.

Dentre as principais diferenças apontadas na literatura entre agregados naturais e agregados reciclados de concreto, destacam-se, para os agregados reciclados, a menor massa específica, maior absorção de água e principalmente a quantidade de argamassa aderida à superfície dos agregados que influencia desde as propriedades do agregado, até as do concreto confeccionado com ele, seja no estado fresco ou endurecido (BUTTLER, 2003).

Segundo Perius (2009), a utilização de agregados de RCD na forma de fíler, promove o aumento da viscosidade e ajuda no combate a exsudação e segregação, mas em contrapartida, o seu uso demanda quantidades maiores de superplastificante, o que causa um retardo demorado do tempo de início e fim de pega.

Novamente Perius (2009), constatou que em certos teores de substituição de agregado natural por agregado de RCD, houve um ganho de resistência, esse ganho é atribuído ao empacotamento das partículas.

2.4 Legislação vigente para o uso de agregados de RCD

Sabe-se que o emprego dos agregados de RCD reciclados em concretos é viável, inclusive da fração miúda. No entanto as normas para uso de agregados de RCD reciclados em concretos não são facilmente aplicáveis nas usinas de reciclagem pela:

- heterogeneidade da composição do RCD e variabilidade das propriedades dos agregados reciclados;
- falta de controle das operações de processamento;
- quantificação de fases no material, por análise visual, que é subjetiva, não garante homogeneidade do produto final, e não apresenta uma relação clara com o desempenho dos concretos (ÂNGULO, 2005).

A NBR 15116 (ABNT, 2004) estabelece valores limites de absorção de água para agregados reciclados destinados ao preparo de concretos sem função estrutural, assim como, determina o tipo e a frequência dos ensaios que devem ser executados para a determinação das propriedades dos agregados de RCD.

A norma brasileira é conservadora e só recomenda o emprego dos agregados de RCD reciclados em concretos com resistência mecânica de até 15 MPa (ÂNGULO, 2005).

3. METODOLOGIA

A metodologia que foi utilizada neste trabalho pode ser dividida em fases. Essas fases foram as seguintes:

I - obtenção e caracterização dos materiais, tanto os naturais quanto os reciclados, que foram utilizados para a produção do CAA;

II - determinação da melhor porcentagem de substituição do agregado natural pelo agregado de RCD;

III - dosagem de um CAA, utilizando o método escolhido;

IV - realização de ensaios no CAA no estado fresco:

- espalhamento (Slump flow);
- cone invertido;
- anel-J;
- funil-V;
- caixa-L;
- caixa-U;

V - execução de ensaios no CAA no estado endurecido:

- compressão axial;
- tração por compressão diametral.

3.1 Obtenção e caracterização dos materiais

3.1.1 Cimento Portland (CP) e adições minerais

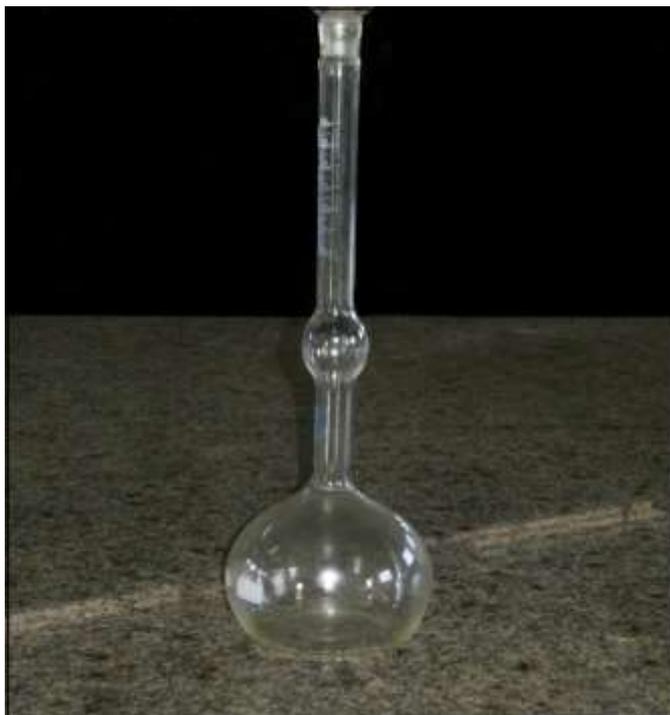
O cimento utilizado para a produção do concreto foi o CP IV – 32 da empresa Votorantin. Esse cimento foi adquirido no mercado local.

Também foi feito o uso de uma adição mineral, a cinza volante (CV), procedente da Usina Termoelétrica de Candiota, localizada no Rio Grande do Sul.

Foram feitas as determinações das massas específicas desses materiais conforme estabelece a NBR NM 23 (ABNT, 2001).

Esse ensaio utiliza o frasco de Le Chatelier (Figura 1) e foi usado como líquido não reagente com o cimento o querosene.

Figura 1: Frasco de Le Chetelier



Fonte: autoria própria, 2015

A massa específica média ($d_{A,med}$) do CP foi de 2810 Kg/m^3 e a ($d_{A,med}$) da CV resultou em 2000 Kg/m^3 .

3.1.2 Agregados

Para esse trabalho foram utilizados agregados graúdos e miúdos naturais e também agregados graúdos reciclados.

Os agregados graúdos utilizados tinham diâmetro máximo de 19 mm, enquanto o agregado miúdo teve dimensão entre 0,15 mm e 4,8 mm. Esses materiais foram adquiridos no mercado local, enquanto os agregados reciclados foram obtidos tanto em obras localizadas na cidade como também em lojas de materiais de construção, onde existe uma grande quantidade de tijolos e telhas cerâmicas descartados devido a eventuais danos no manuseio ou transporte dos mesmos.

Esse material reciclado foi britado em laboratório, com auxílio de uma marreta, e em seguida passado na peneira com abertura de 19 mm, a fim de se obter um agregado de RCD com diâmetro semelhante ao da brita 1, com no máximo 19 mm.

Os ensaios que foram realizados para a caracterização física dos materiais estão no Quadro 3:

Quadro 3 – Ensaio para caracterização física de agregados

Ensaio	Norma
Agregados - determinação da distribuição granulométrica	ABNT NBR NM 248/2003
Agregado miúdo – determinação da massa específica	ABNT NBR 9776/1987
Agregado graúdo – determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água	ABNT NBR NM 53/2003
Agregados – determinação da massa unitária e do volume de vazios	ABNT NBR NM 45/2006

Fonte: autoria própria, 2015

3.1.2.1 Distribuição granulométrica

O ensaio de distribuição granulométrica foi feito no agregado miúdo natural (AMN), no agregado graúdo natural (AGN) e também no agregado graúdo reciclado (AGR), e os resultados são mostrados na Tabela 1:

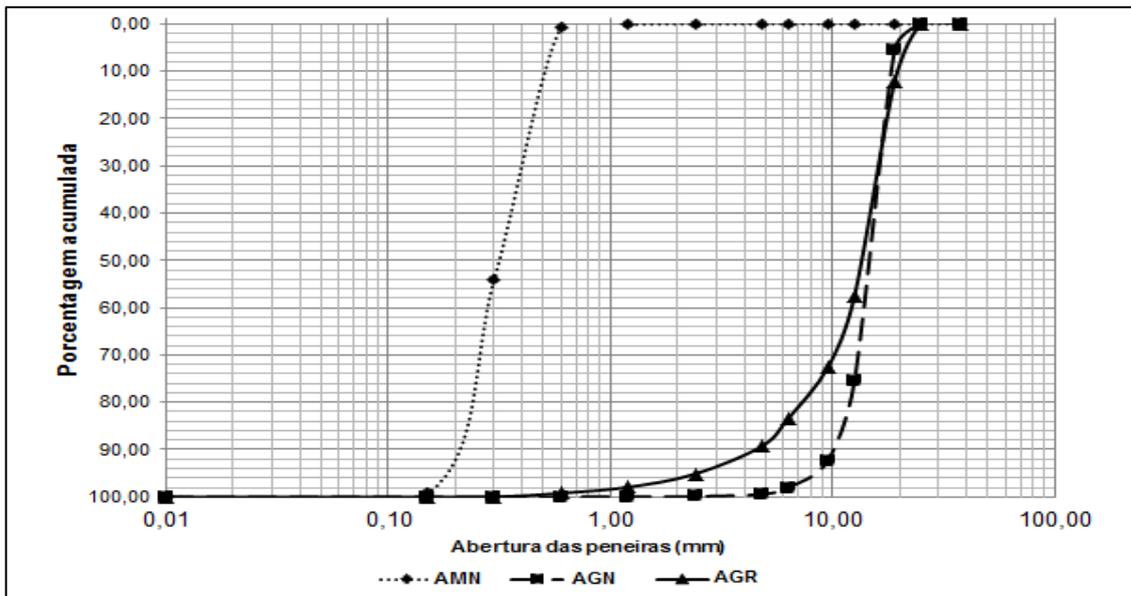
Tabela 1 – Classificação granulométrica dos agregados

Agregado	$D_{MÁX}$ (mm)	Módulo de Finura	Classificação
AMN	1,2	2,57	Médio
AGN	19	7,97	Muito Grosso
AGR	19	7,68	Muito Grosso

Fonte: autoria própria, 2015.

O gráfico da Figura 2 mostra as curvas granulométricas dos materiais.

Figura 2 – Granulometria dos agregados



Fonte: autoria própria, 2015

3.1.2.2 Massa específica dos agregados

A massa específica do agregado miúdo (AMN) foi determinada através do ensaio descrito pela NBR 9776 (ABNT, 1987), e resultou no valor de 2,62 g/cm³.

A massa específica dos agregados gráudos, natural e reciclado, foram obtidas através do mesmo ensaio, descrito pela NBR NM 53 (ABNT, 2003), assim como também foi determinada a massa específica aparente e absorção de água. Esse ensaio também foi feito para a mistura entre 50% de AGN e 50% de AGR, que foi denominada AG, essa porcentagem foi determinada através de ensaios, e é explicada no item 3.2. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Massa específica e absorção de água dos agregados

Agregado	ρ (Kg/m ³)	ρ_s (Kg/m ³)	ρ_a (Kg/m ³)	A (%)
AGN	2570	2620	2680	1,51
AGR	1730	2050	2540	18,58
AG	2070	2330	2790	12,56

Fonte: autoria própria, 2015.

Onde:

ρ = massa específica do agregado gráudo seco (kg/m³);

ρ_s = massa específica do agregado gráudo saturado superfície seca (kg/m³);

ρ_a = massa específica aparente do agregado gráudo (kg/m³);

A = absorção de água dos agregados gráudos (%).

3.1.2.3 Massa unitária e Volume de vazios

A massa unitária e o volume de vazios são necessários para a obtenção do esqueleto granular do CAA, e foram obtidos através do ensaio descrito pela NBR NM 45 (ABNT, 2006), e também utilizando as Equações (1), (2) e (3).

$$w_u = \frac{w_t}{V} \quad \dots (1)$$

$$d_{adm} = \left\{ \frac{[d_{A1} \cdot (A1/a)(\%) + d_{A2} \cdot (A2/a)(\%)]}{100} \right\} \quad \dots (2)$$

$$v = \left(\frac{d_{adm} - w_u}{d_{adm}} \right) \cdot 100 \quad \dots (3)$$

Onde:

V = volume do recipiente (m³);

w_u = peso unitário da mistura (kg/m³);

w_t = massa total da mistura (kg);

d_{adm} = densidade da mistura;

d_{A1} = massa específica do agregado 1;

d_{A2} = massa específica do agregado 2;

A1/a = porcentagem do agregado 1;

A2/a = porcentagem do agregado 2;

v = volume de vazios (%).

Os valores obtidos nesse ensaio são mostrados na Tabela 3, para AMN, AGN e AGR.

Tabela 3 – Massa unitária e Volume de vazios dos agregados

Agregados	MU (Kg/m ³)	V (%)
AMN	1578,01	40,84
AGN	1526,46	44,52
AGR	1002,3	43,89

Fonte: autoria própria, 2015.

3.1.3 Aditivos

Para a dosagem do CAA foi utilizado um aditivo superplastificante, o Glenium 51, da empresa BASF S/A. Esse aditivo é a base de policarboxílico e é recomendado para a fabricação de todo o tipo de concreto onde é necessária uma baixa relação a/c, e também CAA. A sua adição será feita em relação à massa de cimento.

A empresa fornece as especificações desse produto, mas o pH, teor de sólidos, massa específica e teor de cloretos, podem ser obtidos seguindo os procedimentos da NBR 10908 (ABNT, 2008).

Tabela 4 – Aditivo superplastificante

Aditivo	ρ - massa específica (g/cm ³)	Teor de sólidos (%)	Viscosidade (cps)
Glenium 51	1,067 – 1,107	28,5 – 31,5	<150

Fonte: autoria própria, 2015

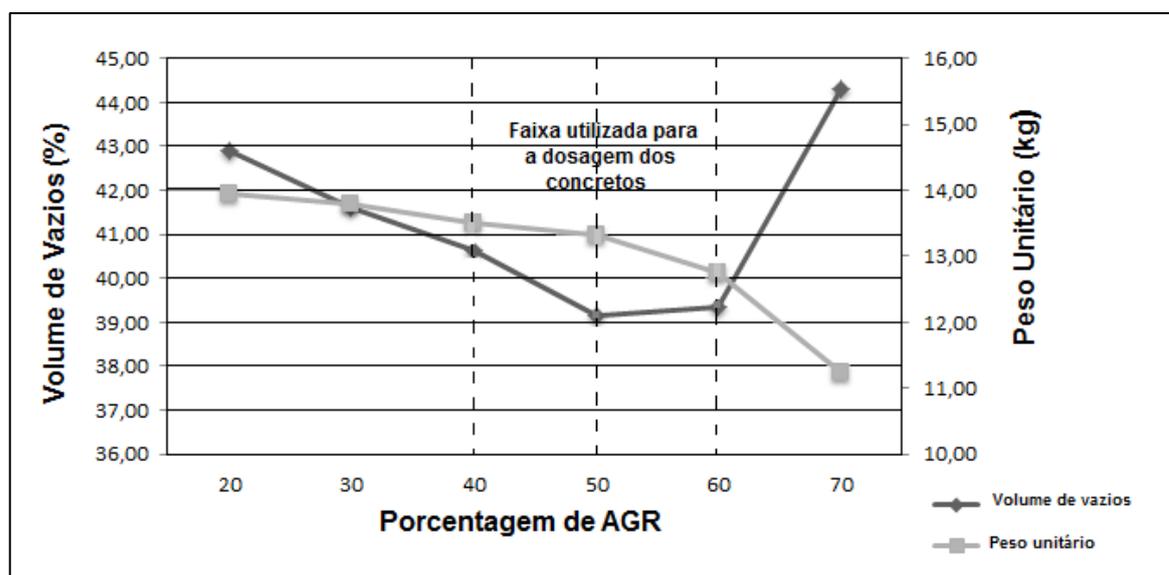
3.2 Determinação da porcentagem de substituição de RCD

Através da norma NBR NM 45 (ABNT, 2006) foi determinado o esqueleto granular ideal para a utilização no CAA, ou seja, a melhor proporção de substituição do agregado grúdo natural por agregado de RCD. Além disso, também foi feita a determinação da melhor proporção entre essa mistura e o agregado miúdo natural, ambos visando o menor volume de vazios possível.

A norma (NM 45) descreve o ensaio para a determinação da massa unitária e o índice de vazios dos agregados não compactados pelo “método C”. Depois de o ensaio ser repetido no mínimo três vezes obtém-se a porcentagem de maior densidade que conseqüentemente gera o menor índice de vazios

O gráfico da Figura 3 mostra o resultado do esqueleto granular entre AGN e AGR.

Figura 3 – Esqueleto granular entre AGN e AGR

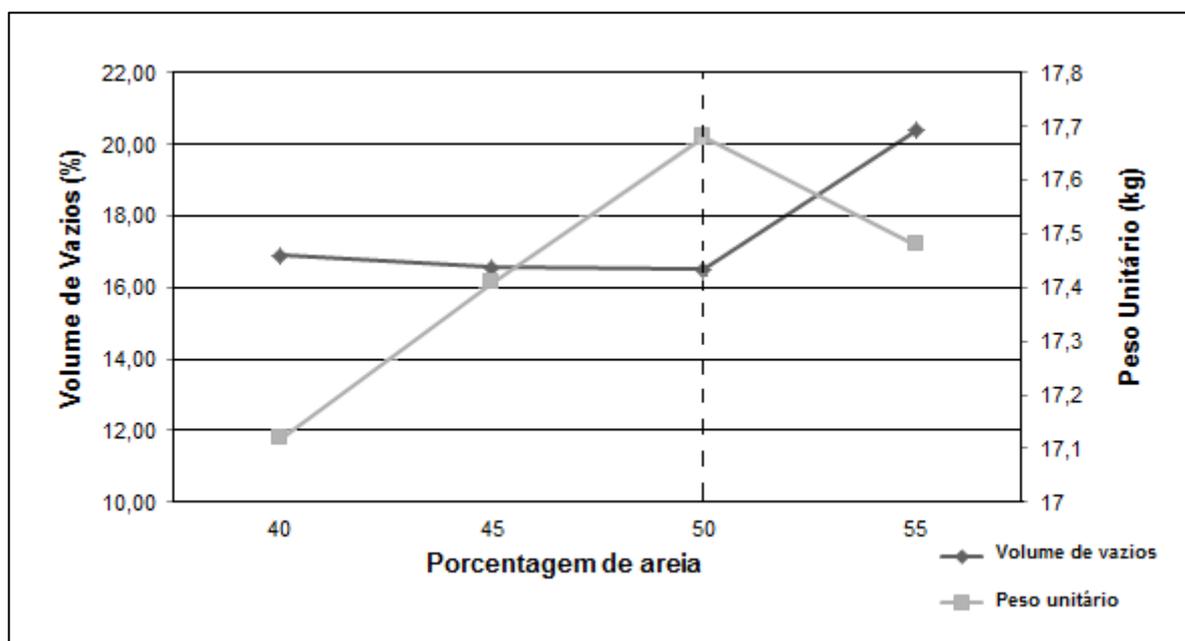


Fonte: autoria própria, 2015.

A partir da análise do gráfico da Figura 3, percebeu-se que a mistura que resultou no menor volume de vazios foi a com 50% de substituição do AGN pelo AGR, denominada AG. Porém, pelo fato do agregado reciclado ter uma massa específica consideravelmente menor que a do agregado natural, a curva do peso unitário decresce, pois quanto maior a porcentagem de AGR na mistura, que é um material de menor densidade, menor será o seu peso. Levando isso em conta, pode-se perceber que a mistura com 60% de AGR apresentou um volume de vazios muito semelhante ao da mistura com 50%, podendo ser também considerada como uma boa porcentagem para substituição. Dessa forma, utilizou-se a faixa compreendida entre 40 e 60% para uma melhor avaliação.

Logo após a escolha da porcentagem de substituição do AGN pelo AGR, foi feito outro esqueleto granular, esse com o objetivo de obter a melhor porcentagem da mistura entre AMN e AG. O gráfico da Figura 4 mostra os resultados.

Figura 4 – Esqueleto granular AMN e AG



Fonte: autoria própria, 2015.

Através da análise do gráfico da Figura 4, foi determinada a mistura entre 50% AMN e 50% AG como a ideal, com o menor volume de vazios e o maior peso unitário.

3.3 Dosagem do CAA

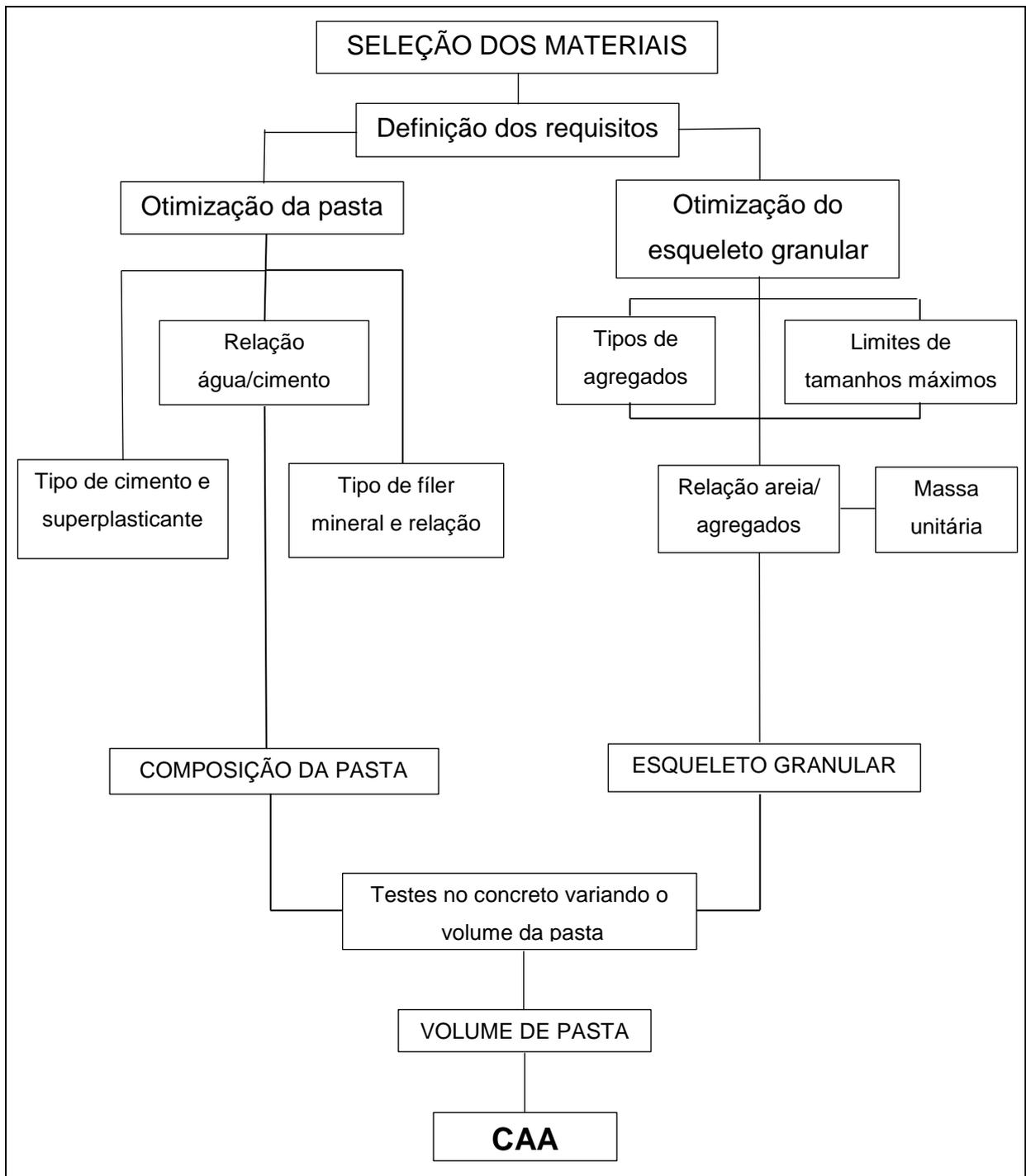
O método escolhido para a dosagem do CAA no presente trabalho foi o método de Gomes, Gettú e Agulló, método esse, que visa obter uma boa reologia para o concreto, não levando em conta as resistências que serão atingidas. A metodologia proposta por esse método é de que o concreto pode ser obtido otimizando-se a composição da pasta e do esqueleto granular de maneira separada, para no final encontrar o conteúdo de pasta necessário para que o concreto tenha características de um CAA (GOMES; BARROS, 2009).

Esse método pode ser separado em três etapas:

- obtenção da composição da pasta;
- determinação da proporção de misturas do agregados;
- seleção do conteúdo da pasta.

A Figura 5 mostra o esquema com os passos da metodologia para aplicação desse método:

Figura 5: Descrição do método de dosagem



Fonte: adaptado de Gomes e Barros, (2009)

Após ser feita a seleção dos materiais que irão compor o CAA, pode-se partir para a definição da composição da pasta. Essa definição foi feita a partir da

quantidade de cimento e das relações dos demais componentes da pasta em função da massa do cimento (GOMES; BARROS, 2009).

As seguintes equações foram utilizadas para a obtenção do volume de pasta:

Massa de água:

$$P_a = \left(\frac{a}{c}\right) \cdot C, \text{ onde:} \quad \begin{array}{l} a/c = \text{Relação água/cimento;} \\ P_a = \text{massa da água.} \end{array} \quad \dots (4)$$

Massa de fíler:

$$P_f = \left(\frac{f}{c}\right) \cdot C, \text{ onde:} \quad \begin{array}{l} P_f = \text{Massa de fíler;} \\ f/c = \text{Relação fíler/cimento.} \end{array} \quad \dots (5)$$

Massa de pozolana:

$$P_{sf} = \left(\frac{sf}{c}\right) \cdot C, \text{ onde:} \quad \begin{array}{l} sf/c = \text{Relação pozolana/cimento;} \\ P_{sf} = \text{massa da pozolana.} \end{array} \quad \dots (6)$$

Massa de superplastificante sólido:

$$P_{sp} = \left(\frac{sp}{c}\right) \cdot C, \text{ onde:} \quad \begin{array}{l} sp/c = \text{relação} \\ \text{superplastificante/cimento;} \\ P_{sp} = \text{massa do} \\ \text{superplastificante sólido.} \end{array} \quad \dots (7)$$

Massa de superplastificante líquido:

$$P_{spl} = \frac{P_{sp}}{\left(\frac{T_{sp}}{100}\right)}, \text{ onde:} \quad \begin{array}{l} T_{sp} = \text{Teor do superplastificante} \\ P_{spl} = \text{massa do superplastificante} \\ \text{líquido.} \end{array} \quad \dots (8)$$

Massa de água contida no superplastificante:

$$P_{asp} = P_{sp} \cdot \left[\left(\frac{100}{T_{sp}}\right) - 1 \right], \text{ onde:} \quad \begin{array}{l} T_{sp} = \text{Teor do superplastificante;} \\ P_{asp} = \text{massa de água} \\ \text{contida no superplastificante.} \end{array} \quad \dots (9)$$

Massa de água corrigida:

$$P_{ac} = P_a - P_{asp}, \text{ onde:} \quad P_{ac} = \text{massa de água corrigida.} \quad \dots (10)$$

O volume da pasta foi obtido através da seguinte equação:

$$Vp = \frac{C}{\rho_c} + \frac{Pa}{\rho_a} + \frac{Pf}{\rho_f} + \frac{Psf}{\rho_{sf}} + \frac{Pspl}{\rho_{sp}} - \frac{Pasp}{\rho_a} \quad \dots (11)$$

Onde:

Vp = volume da pasta;

C = Cimento;

ρ_c = Massa específica do cimento;

ρ_a = Massa específica da água;

ρ_f = Massa específica do fíler;

ρ_{sf} = Massa específica da pozolana;

ρ_{sp} = Massa específica do superplastificante;

Gomes e Barros (2009), explicam detalhadamente como se procede o método. Inicialmente escolhe-se uma relação a/c dependendo das propriedades desejadas para o concreto. Quando adiciona-se uma pozolana como a cinza volante, pode-se substituir até 30% da massa de cimento.

Depois disso define-se o volume de pasta inicial que será necessária para o desenvolvimento dos ensaios, e levando em conta a relação a/c pode-se especificar o volume de cimento necessário.

A dosagem de superplastificante foi feita com um valor predeterminado entre 0,7 e 2,0 % em relação a massa de cimento.

A próxima etapa foi a obtenção do esqueleto granular, ou seja, a mistura ideal entre os agregados. Essa etapa foi feita através da norma NBR NM 45 (ABNT, 2006) como foi apresentada no item 3.2.

Depois disso determina-se a massa de cimento para um metro cúbico de concreto utilizando a equação 12:

$$C = \frac{VP}{\frac{1}{\rho_c} + \frac{a}{\rho_a} + \frac{f}{\rho_f} + \frac{sf}{\rho_{sf}} + \frac{\left(\frac{SP}{C}\right)\left(\frac{100}{T_{SP}}\right)}{\rho_{sp}} - \left[\frac{\left(\frac{SP}{C}\right)\left(\frac{100}{T_{SP}}\right)-1}{\rho_a}\right]} \quad \dots (12)$$

Em seguida, é necessária apenas a determinação do conteúdo de pasta por volume. Essa determinação deve ser feita variando o volume de pasta e fazendo ensaios específicos até encontrar o volume ideal, onde serão atingidas as

propriedades necessárias que satisfizeram os requisitos exigidos para um concreto autoadensável.

Seguindo todas essas etapas, foi possível obter-se o traço para duas misturas, uma que serviu como referência, onde não foi utilizado o agregado reciclado, que foi denominado de CAA_{REF} , e outra onde foi feita a substituição de 50% de agregado gráudo natural pelo agregado gráudo reciclado, denominada $CAA_{50\%}$.

Para a determinação do traço do CAA_{REF} foi fixado uma relação entre a pozolana e o cimento (sf/c) de 10%, e uma relação a/c de 0,585, com isso, a única variável que teve que ser determinada em laboratório foi a relação entre o superplastificante e o cimento (sp/c). Essa determinação foi feita através do ensaio de espalhamento, feito no concreto aumentando o teor de sp, até que se obtivesse um concreto que atende-se as característica de espalhamento de um CAA, entre 550 e 850 mm.

Em seguida, foi determinado o traço para o $CAA_{50\%}$, onde foram substituídos 50% do agregado gráudo natural por agregado reciclado de RCD vermelho. Essa mudança na composição da mistura fez com que o teor de sp tivesse que ser aumentado para 1,2%, para que fosse possível obter os resultados desejados de espalhamento para um CAA, entre 550 e 850 mm.

A composição do traço do $CAA_{50\%}$ só pode ser feita, depois de corrigido na mistura a água absorvida pelo agregado gráudo, pois a absorção do RCD vermelho é muito superior a de um agregado natural. A quantidade de água que foi corrigida correspondente à absorção da mistura AG (50% AGN / 50%AGR), foi de 12,56%.

Em seguida, também foram obtidos outros dois traços que serviram para comparação com os demais, um com substituição de 40% de agregado natural por agregado de RCD vermelho, e outro com 60% de substituição, eles foram denominados respectivamente de $CAA_{40\%}$ e $CAA_{60\%}$.

Nos traços comparativos, $CAA_{40\%}$ e $CAA_{60\%}$, também foi corrigido na mistura a água de absorção da mistura entre os agregados gráudos, que foram respectivamente 10,05% e 15,07%. Porém, na mistura $CAA_{60\%}$ a quantidade de sp teve que ser aumentada, de 1,20% para 1,70%, para atingir os resultados necessários para um CAA.

Os traços de todas as misturas são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Composição das misturas estudadas

Material	Quantidade de materiais			
	CAA _{REF}	CAA _{40%}	CAA _{50%}	CAA _{60%}
Cimento	284,31 kg/m ³	280,19 kg/m ³	280,19 kg/m ³	276,45 kg/m ³
Cinza Volante	30,00 kg/m ³	30,00 kg/m ³	30,00 kg/m ³	30,00 kg/m ³
Agregado graúdo reciclado	-----	245,66 kg/m ³	307,07 kg/m ³	368,49 kg/m ³
Agregado graúdo natural	912,35 kg/m ³	547,41 kg/m ³	456,18 kg/m ³	364,94 kg/m ³
Agregado miúdo natural	915,90 kg/m ³	933,29 kg/m ³	915,90 kg/m ³	933,29 kg/m ³
Super plastificante	8,04 kg/m ³	13,80 kg/m ³	13,80 kg/m ³	19,50 kg/m ³
Água corrigida	-----	0,48 Kg/m ³	0,60 Kg/m ²	0,70 Kg/m ³
Água total	169,56 kg/m ³	165,78 kg/m ³	165,90 kg/m ³	161,94 kg/m ³

Fonte – autoria própria, 2015.

Nota-se que, comparando os traços apresentados na Tabela 5, o consumo de cimento diminui ao mesmo tempo em que se aumenta o teor de sp, o mesmo acontece com a água. No traço CAA_{60%}, que apresenta o maior teor de sp, também obteve-se a menor quantidade de cimento e água, ao mesmo tempo em que o CAA_{REF} apresenta o menor teor de sp, e a maior quantidade de cimento e água.

3.4 Ensaios no concreto no estado fresco

A seguir serão descritos os ensaios reológicos que foram realizados para a verificação dos requisitos para um CAA.

3.4.1 Ensaio de espalhamento (slump flow)

Esse ensaio consiste na verificação de se o concreto sob determinada força, essa provocada pelo seu próprio peso, tem a capacidade de se espalhar até atingir determinada dimensão em um determinado tempo e também uma dimensão limite (GOMES; BARROS, 2009). É considerado um ensaio fácil e de rápida execução, e é normatizado pela NBR 15823-2 (ABNT, 2010).

O ensaio é descrito da seguinte forma:

Equipamento:

- uma base quadrada reta, lisa e de material sólido que não solte material, com dimensões de, no mínimo, 90 cm;

- cone de Abrams, com diâmetro superior de 10 cm e inferior de 20 cm e altura de 30 cm;
- tronco de cone invertido;
- uma colher do tipo concha ou balde;
- um cronômetro;
- uma trena ou uma régua de, no mínimo, 90 cm.

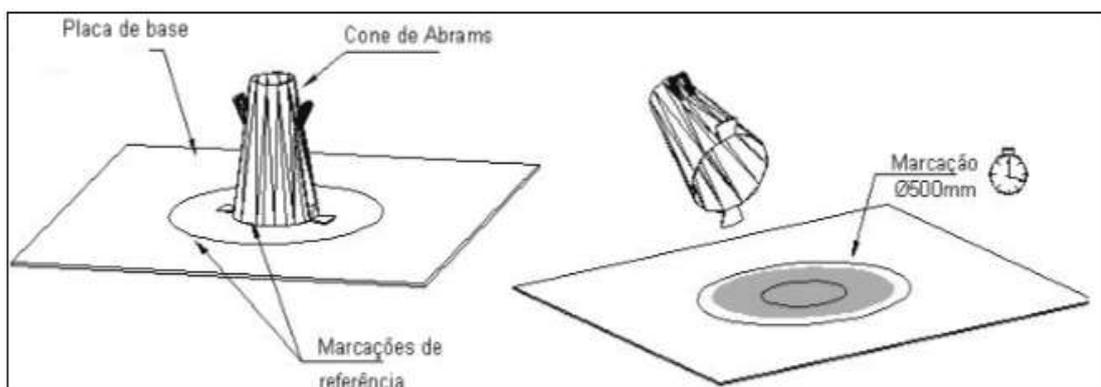
Procedimento:

A base de dimensão 90 x 90 cm deve ser posicionada em uma superfície horizontalmente nivelada e plana. Fazem-se duas marcas circulares, uma de 200 mm e outra de 500 mm, no centro da haste. O cone deve ser posicionado no círculo de 200 mm e fixado com o peso do executor do ensaio, para evitar qualquer vazamento de concreto. Coloca-se uma amostra de cerca de 6 ou 7 litros, de CAA retirado da mistura, dentro do cone sem compactação ou vibração. O excesso de concreto no topo do cone deve ser retirado.

Depois disso o cone deve ser levantado levemente, perpendicularmente à placa, em um movimento único. Simultaneamente ao levantamento do cone, deve-se acionar o cronômetro. Quando o concreto atingir a marca circular de 500 mm, registra-se o tempo denominado tempo de fluxo T_{500} .

O equipamento utilizado para o ensaio é mostrado na Figura 6.

Figura 6: Equipamento para o ensaio de espalhamento



Fonte: NBR 15823-2 (ABNT, 2010)

Após o total espalhamento do concreto, medem-se dois diâmetros perpendiculares (d_1 e d_2) e calcula-se a média desses diâmetros, denominado

diâmetro final de espalhamento (SF). A Figura 7 mostra como foi realizado o ensaio em laboratório.

Figura 7: Ensaio de espalhamento realizado em laboratório



Fonte: autoria própria, 2015

Esse valor final de SF pode ser classificado de três formas, como exposto na Tabela 6:

Tabela 6: Classe de espalhamento do CAA

Classe	Espalhamento (mm)
SF 1	550 a 650
SF 2	660 a 750
SF 3	760 a 850

Fonte: adaptado de NBR 15823-1 (2010)

Essa classificação nos dá os possíveis usos para esse CAA:

- SF 1 – estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura e embutidos; concreto autoadensável bombeado; estruturas que exigem uma curta distância de espalhamento horizontal do CAA;
- SF 2 – adequada para a maioria das construções correntes;
- SF 3 – estruturas com alta densidade de armadura e/ou de forma arquitetônica complexa.

O tempo de fluxo T_{500} medido também gera uma classificação para o CAA, segundo a Tabela 7:

Tabela 7: Classe de viscosidade plástica aparente do CAA

Classe de viscosidade plástica aparente	T ₅₀₀ (s)
VS 1	≤ 2
VS 2	>2

Fonte: adaptado de NBR 15823-1 (2010)

Aplicação:

- VS 1 – adequado para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, mas exige controle da exsudação e da segregação; concretagens realizadas a partir do ponto mais alto com deslocamento livre;
- VS 2 – adequado para a maioria das aplicações correntes. Efeitos negativos podem ser obtidos com relação a superfície de acabamento.

3.4.2 Cone invertido

Esse ensaio, assim como o ensaio do espalhamento, avalia a consistência do concreto, e também a capacidade do concreto fluir de uma abertura maior e passar por uma abertura menor. Os equipamentos utilizados para esse ensaio são o cone de Abrams, uma trena e uma placa de base (MARANGON, 2006). Esse ensaio consiste no uso do cone de Abrams na posição invertida, conforme Figura 8. Preenche-se o cone com o CAA em uma única camada e retira-se o mesmo. Depois de retirado, mede-se o espalhamento do concreto em duas direções.

Figura 8: Ensaio com o cone invertido



Fonte: autoria própria, 2015

3.4.3 Ensaio do Anel-J (J-Ring)

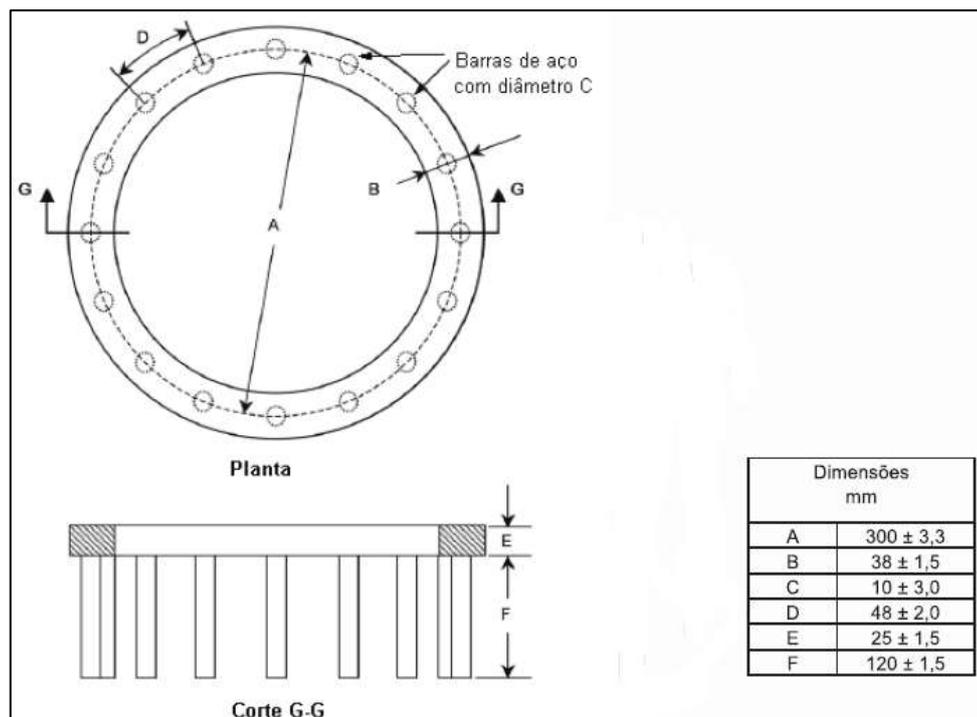
O ensaio do Anel-J é um meio de avaliar a habilidade passante que o CAA possui de fluir entre as armaduras sob fluxo livre.

O ensaio é realizado conforme prescrito pela NBR 15823-3 (ABNT, 2010).

Equipamentos:

- cone de Abrams, com diâmetro superior de 10 cm e inferior de 20 cm e altura de 30 cm;
- uma base quadrada reta, lisa e de material sólido que não solte material, com dimensões de, no mínimo, 90 cm;
- uma colher do tipo concha ou balde;
- uma trena ou uma régua de, no mínimo, 90 cm;
- anel-J, com dimensões como o da Figura 9.

Figura 9: Dimensões do Anel-J



Fonte: NBR 15823-3 (ABNT, 2010)

Procedimento:

O processo do ensaio é semelhante ao do ensaio de espalhamento. Posiciona-se o Anel-J no centro da placa, logo após, o cone de Abrams deve ser

colocado na marcação central da placa, dentro do Anel-J, preenche-se o cone com a amostra de concreto sem adensamento. Retira-se o cone e espera-se cerca de um minuto para o total espalhamento do CAA, e medem-se os diâmetros de espalhamento em duas direções perpendiculares (d_{j1} e d_{j2}) para a obtenção do diâmetro final (d_f).

O resultado final do ensaio é obtido fazendo-se a diferença entre o diâmetro médio de espalhamento sem o Anel-J, obtido segundo o ensaio da NBR 15823-2 (ABNT,2010), e o diâmetro médio obtido neste ensaio. Esse resultado pode ser classificado segundo a NBR 15823-1 (ABNT, 2010) como mostra a Tabela 8:

Tabela 8: Classe de habilidade passante do CAA

Classe de viscosidade plástica aparente	Anel-J (mm)
PJ 1	25 a 50, com 16 barras de aço
PJ 2	0 a 25, com 16 barras de aço

Fonte: adaptado de NBR 15823-1 (ABNT,2010)

Aplicação:

- PJ 1: adequada para elementos estruturais com espaçamento de armadura de 80 mm a 100 mm;
- PJ 2: adequada para a maioria das aplicações correntes. Elementos estruturais com espaçamento de armadura de 60 mm a 80 mm.

A Figura 10 mostra o procedimento de ensaio feito no laboratório.

Figura 10: Ensaio com Anel-J



Fonte: autoria própria, 2015

3.4.4 Ensaio do Funil “V” (V-Funnel test)

Esse ensaio simula a capacidade de passagem do CAA através do estreitamento de uma seção sob a ação do seu próprio peso e também simula o bombeamento do concreto. Ele também serve para verificar se há presença de segregação (GOMES; BARROS, 2009). Esse ensaio é normatizado pela NBR 15823-5 (ABNT, 2010) e será descrito a seguir:

Equipamentos:

- funil em forma de V, com dimensões mostradas na Figura 11;
- uma colher do tipo concha;
- uma recipiente com capacidade de pelo menos 12 litros;
- um cronômetro.

Procedimento:

Posiciona-se o funil V verticalmente em uma superfície plana e regular, e deve-se nivelar a abertura superior horizontalmente. Fecha-se a porta do orifício de saída e coloca-se um recipiente abaixo dela, para reter o concreto passante. O funil deve ser preenchido completamente com uma amostra do CAA, de cerca de 10 litros, sem o auxílio de compactação ou adensamento mecânico. Remove-se o excesso de concreto do topo do funil, espera-se aproximadamente 15 segundos para depois abre-se a porta de saída. Ao mesmo tempo em que a porta é aberta, aciona-se o cronômetro, que só é parado quando verifica-se que a passagem inferior

está totalmente visível. Esse tempo registrado é chamado de tempo de fluxo do ensaio do Funil V (T_{30seg}), e segundo a NBR 15823-1 (ABNT, 2010) pode classificar o CAA quanto a sua viscosidade, como mostra a tabela 9:

Tabela 9: Classe de viscosidade plástica aparente do CAA

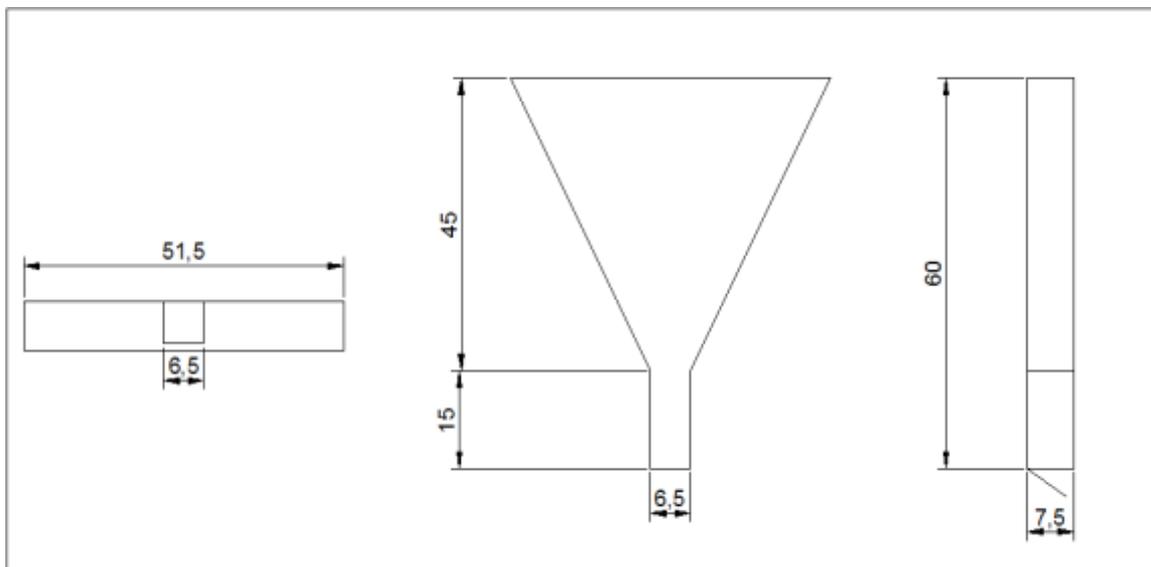
Classe de viscosidade plástica aparente	Funil V (s)
VF 1	≤ 8
VF 2	9 a 25

Fonte: adaptado de NBR 15823-1 (2010)

Aplicação:

- VF 1: adequado para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, mas exige controle da exsudação e da segregação; concretagens realizadas a partir do ponto mais alto com deslocamento livre;
- VF 2: adequado para a maioria das aplicações correntes. Efeitos negativos podem ser obtidos com relação a superfície de acabamento.

Figura 11: Dimensões do Funil-V



Fonte: NBR 15823-5 (ABNT, 2010)

O procedimento feito em laboratório é mostrado na Figura 12.

Figura 12: Ensaio do Funil-V



Fonte: autoria própria, 2015

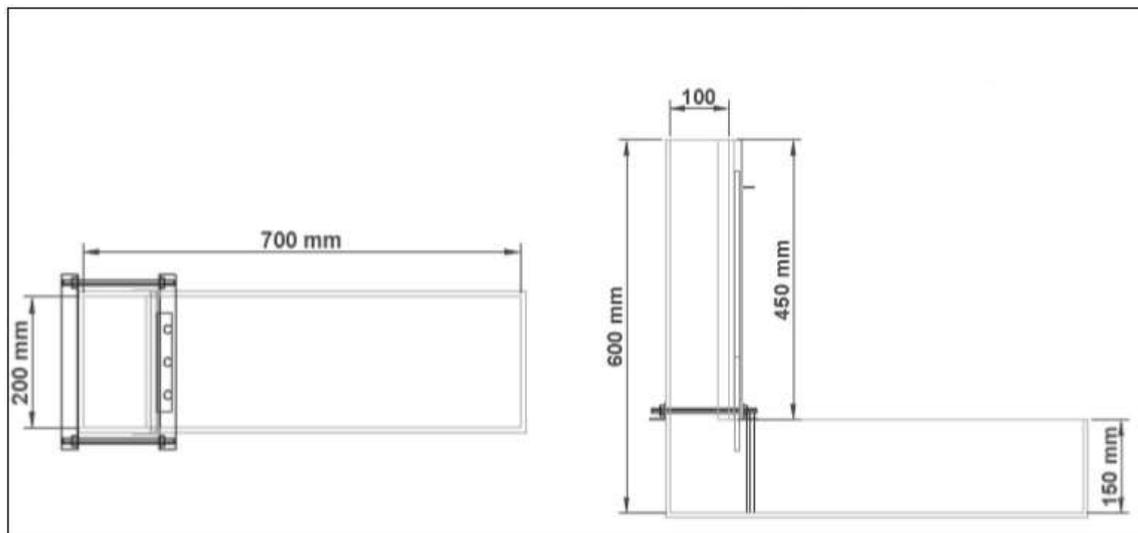
3.4.5 Ensaio da Caixa-L (L-Box test)

Esse tem por objetivo avaliar se o concreto sob a ação do seu próprio peso consegue passar por obstáculos, como por exemplo, armaduras sem que ocorra bloqueio (GOMES; BARROS, 2009). Esse ensaio é normatizado pela NBR 15823-4 (ABNT, 2010) e é descrito a seguir:

Equipamentos:

- uma caixa em forma de L, como mostrada na Figura 13;
- uma colher do tipo concha;
- um balde;
- dois cronômetros;
- uma trena ou régua de, no mínimo, 60 cm.

Figura 13: Dimensões da Caixa-L



Fonte: NBR 15823-4 (ABNT, 2010)

Procedimento:

Coloca-se a caixa L em uma posição estável e nivelada horizontalmente. O interior do equipamento deve ser molhado e removido o excesso de água. Preenche-se o trecho vertical da caixa L com aproximadamente 12 litros de amostra do CAA, levanta-se a porta deslizante e deixa-se o concreto fluir do trecho vertical para o trecho horizontal da caixa. Acionam-se os dois cronômetros quando o porta da caixa é levantada, um dos cronômetros é parado quando o concreto atingir a marca de 20 cm a partir da abertura da passagem, e o outro quando o concreto atingir a marca horizontal de 40 cm a partir da abertura. Esse tempos são denominados respectivamente de T_{L20} e T_{L40} . Também é medida a altura do concreto no final do trecho horizontal quando o mesmo cessa o movimento, e a altura do concreto remanescente do trecho vertical da Caixa-L, denominados respectivamente de H_2 e H_1 .

A habilidade passante (HP) é a relação feita entre H_2 e H_1 , conforme a equação a seguir:

$$HP = \frac{H_2}{H_1} \quad \dots (13)$$

Com esse parâmetro pode-se classificar o concreto de acordo com a Tabela 10:

Tabela 10: Classe de viscosidade aparente do CAA

Classe de viscosidade plástica aparente	Caixa L (H ₂ /H ₁)
PL 1	≥ 0,80, com duas barras de aço
PL 2	≥ 0,80, com três barras de aço

Fonte: adaptado de NBR 15823-1 (2010)

Aplicação:

- PL 1 – Adequada para elementos estruturais com espaçamento de armadura de 80 mm a 100 mm.
- PL 2 - Adequada para a maioria das aplicações correntes. Elementos estruturais com espaçamento de armadura de 60 mm a 80 mm.

O ensaio feito em laboratório é mostrado na Figura 14.

Figura 14: Ensaio com a Caixa-L



Fonte: autoria própria, 2015

3.4.6 Ensaio da Caixa-U (U-Box teste)

Esse ensaio tem o mesmo objetivo que o ensaio anterior, ele mede a fluidez e a habilidade do concreto passar por obstáculos sem segregar. O ensaio da Caixa-U serve principalmente para reconhecer concretos com maior possibilidade de segregação entre o agregado graúdo e a pasta (GOMES; BARROS, 2009). O ensaio é descrito segundo Gomes e Barros (2009):

Equipamentos:

- uma caixa em forma de U, como mostrado na Figura 15;
- um balde;
- uma trena ou uma régua de, no mínimo, 60 cm;

Procedimento:

Posiciona-se a Caixa-U sobre uma superfície estável e nivelada, molhando-se o se interior sem deixar excesso de água. A Caixa-U deve ser preenchida com cerca de 16 litros de amostra do CAA, sem que haja vibração ou adensamento mecânico, pelo compartimento à esquerda a aparato, com a porta de passagem fechada. Espera-se um minuto para a abertura da porta deslizante, e deixa-se o concreto escoar através das armaduras para o outro compartimento. Depois de o concreto estar estável, mede-se a altura do material que ficou no compartimento da esquerda e a altura de material no compartimento da direita, chamadas respectivamente de alturas R_1 e R_2 . A autoadensabilidade do CAA é avaliada aplicando a seguinte equação:

$$R_U = R_1 - R_2 \quad \dots (14)$$

O valor de R_U para um CAA deve se encontrar entre 0 (zero) e 3 cm, sendo que valores mais próximos de 0 (zero), indicam que o concreto é mais autoadensável.

Figura 15: Ensaio com a Caixa-U



Fonte: autoria própria, 2015

3.5 Ensaio no concreto no estado endurecido

Os ensaios mecânicos feitos no CAA foram: ensaio de compressão axial para a determinação da resistência a compressão e ensaio para a determinação da resistência a tração por compressão diametral em corpos de provas cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. .

Serão ensaiados três amostra de concreto para as idades de 7 e 28 dias.

3.5.1 Ensaio de compressão axial

A norma que regulamenta este ensaio é a NBR 5739 (ABNT, 2007), e tem como objetivo determinar a resistência de corpos de prova cilíndricos de concreto quando submetido a um esforço de compressão axial.

O ensaio é descrito a seguir:

Com os corpos-de-prova devidamente moldados e curados conforme especifica as normas NBR 7215 (ABNT, 1997) e NBR 5739 (ABNT, 2007), mede-se com um paquímetro as suas dimensões com exatidão. Limpam-se as faces dos cp's

(corpos-de-prova) e os pratos da prensa, equipamento utilizado para romper os corpos-de-prova (Figura 16), e centraliza-se o corpo-de-prova no meio do prato. O carregamento no ensaio deve ser aplicado continuamente e sem choques, com uma velocidade de $(0,45 \mp 0,15)$ MPa/s e só deve cessar quando ocorrer o rompimento do corpo-de-prova.

O cálculo da resistente a compressão é feito com a seguinte equação:

$$f_c = \frac{4.F}{\pi.d^2} \quad \dots (15)$$

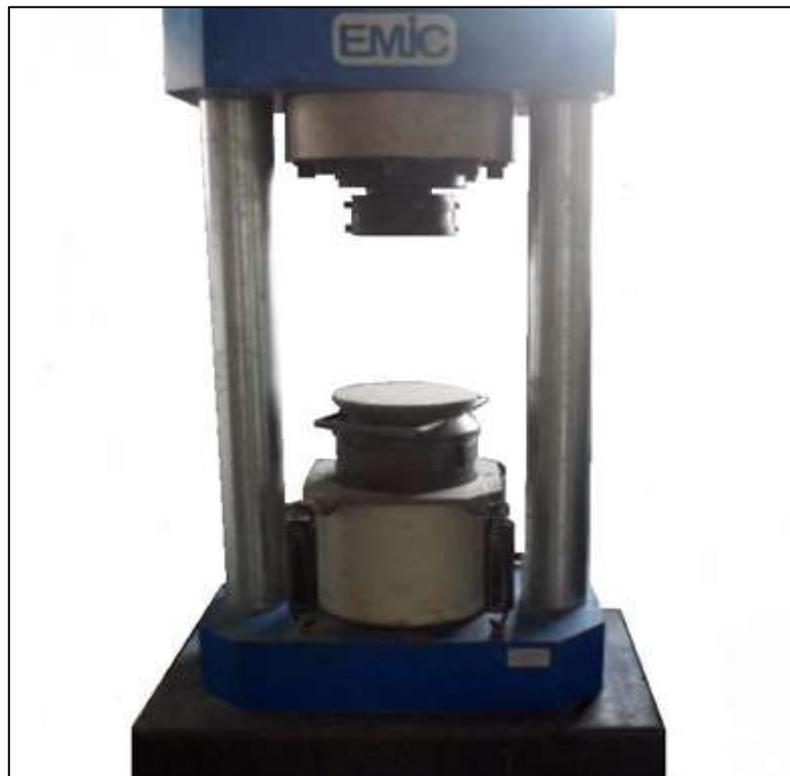
Onde:

f_c = resistência à compressão, em MPa;

F = máxima carga aplicada no ensaio, em Newton;

d = diâmetro do corpo-de-prova, em mm.

Figura 16: Prensa para os ensaios de compressão



Fonte: autoria própria, 2015

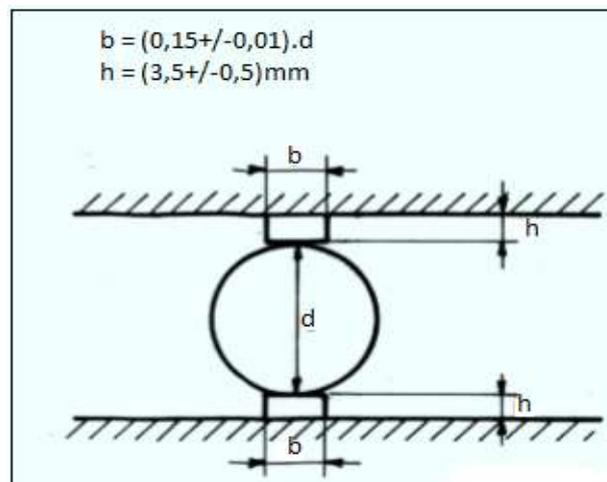
3.5.2 Ensaio de compressão diametral

Este ensaio é normatizado pela NBR 7222 (ABNT, 2011), e tem como objetivo determinar a resistência do concreto a tração por compressão diametral.

O ensaio é descrito a seguir:

Primeiramente os corpos de prova devem ser moldados e curados conforme especifica as normas NBR 7215 (ABNT, 1997) e NBR 5739 (ABNT, 2007). Os cp's devem ser colocados sobre os pratos da máquina de compressão, de modo que fiquem em repouso sobre uma geratriz. Entre os pratos da máquina e o corpo de prova deve-se colocar duas tiras de chapa dura de fibra de madeira conforme especificado na NBR 10024 (ABNT, 2012), com um comprimento igual ao da geratriz e dimensões iguais a Figura 17.

Figura 17 – Disposição do corpo de prova



Fonte: NBR 7222 (2011)

A carga de compressão deve ser aplicada continuamente sobre o corpo de prova, sem choques, para que haja um crescimento constante da tensão de tração. A velocidade a que a carga deve ser aplicada é de $(0,05 \mp 0,02)$ MPa/s, até a ruptura do corpo-de-prova.

Ao final usa-se a seguinte equação para calcular a resistência a tração por compressão diametral:

$$f_{t,D} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot L} \quad \dots (16)$$

Onde:

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

F = máxima carga obtida no ensaio, em Newton;

d = diâmetro do corpo de prova, em mm;

L = altura do corpo de prova, em mm.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esse capítulo apresenta os resultados obtidos das misturas de CAA nos ensaios reológicos no estado fresco e nos ensaios no estado endurecido, assim como a análise desses resultados, e as possíveis causas dos mesmos.

4.1 Ensaios no concreto no estado fresco

4.1.2 Ensaio de Espalhamento

Os resultados dos ensaios de espalhamento e cone invertido, e a classificação conforme a NBR 15823-1 (ABNT, 2010), são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Resultados médios do espalhamento e cone invertido

Mistura	E (mm)	Classe	t_{500} (s)	Classe	E_{CI} (mm)	Teor de sp
CAA _{REF}	625	SF-1	9,85	VS-2	607	0,70
CAA _{40%}	620	SF-1	8,46	VS-2	602	1,20
CAA _{50%}	635	SF-1	7,03	VS-2	605	1,20
CAA _{60%}	615	SF-1	16,6	VS-2	600	1,70

Fonte: autoria própria, 2015

A partir dos dados da Tabela 11, pode-se verificar que todas as misturas apresentaram resultados semelhantes, que lhes caracterizam como CAA, com espalhamento E entre 550 e 850 mm, enquadrando-se na classe SF-1.

No que se refere ao tempo de espalhamento t_{500} , todas apresentaram valores maiores que 2 segundos, que o classifica quanto à classe de viscosidade aparente sob fluxo livre em VS-2, conforme NBR 15823-1 (ABNT, 2010).

No ensaio com o cone invertido, todas as misturas obtiveram um espalhamento acima dos 600 mm, apresentando uma pequena redução em relação aos resultados do ensaio de espalhamento.

O CAA_{REF} precisou de 0,7% de sp para atingir o resultado necessário de espalhamento para classificá-lo como CAA, enquanto o CAA_{40%} e o CAA_{50%} precisaram de 71% mais sp e o CAA_{60%} 142%, para atingir os mesmos resultados.

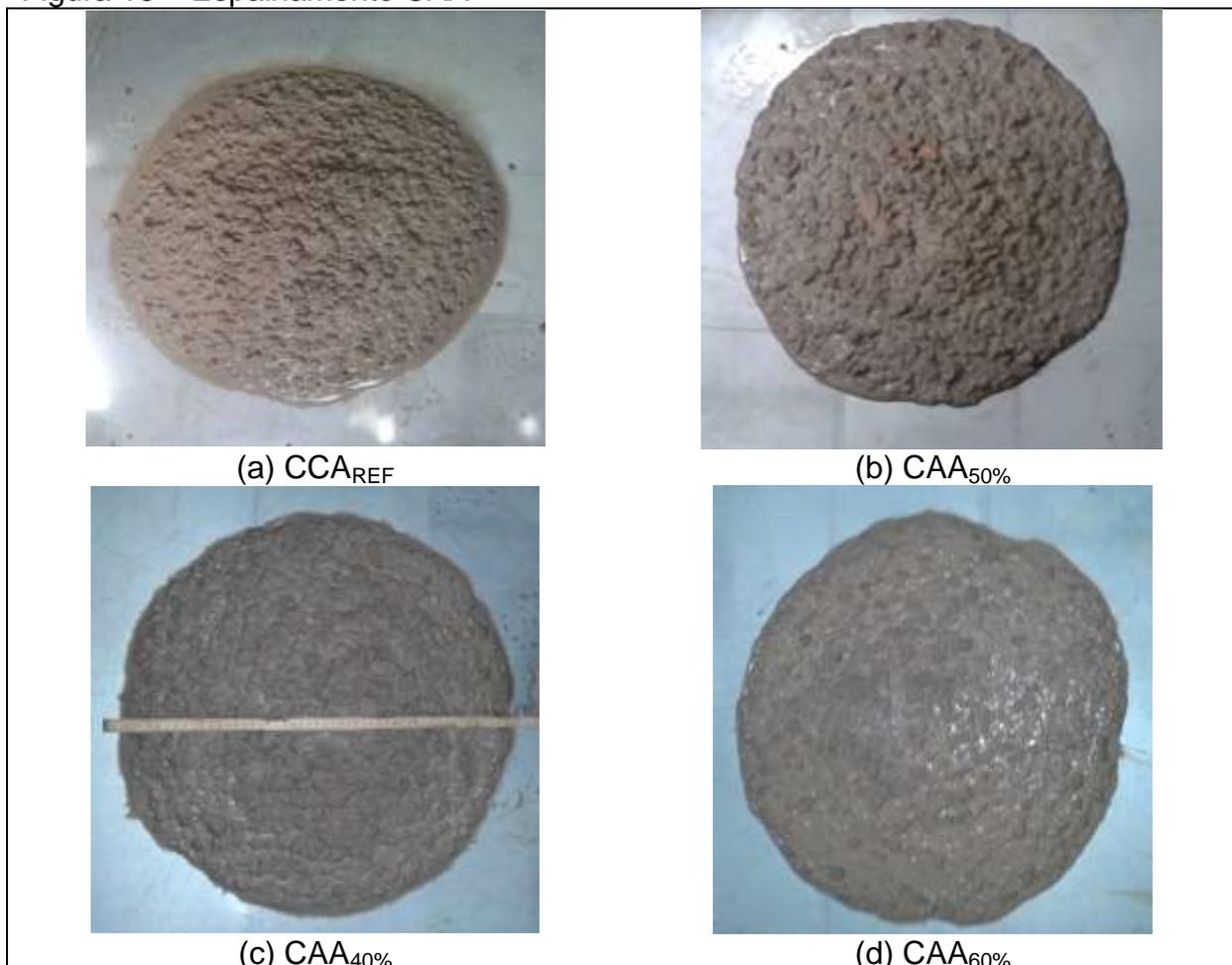
Esse aumento possivelmente deve-se ao fato do agregado reciclado de RCD vermelho ter uma maior área superficial e uma maior rugosidade, em relação ao agregado natural.

Nota-se também, que possivelmente o CAA_{40%} poderia ter atingido resultados satisfatórios com um teor menor de sp, porém o mesmo não foi tentado.

A Figura 18 mostra o espalhamento das misturas estudadas.

Em uma análise visual pode-se observar que as misturas não apresentaram exsudação e segregação dos materiais.

Figura 18 – Espalhamento CAA



Fonte: Autoria própria, 2015.

4.1.3 Escoamento no Anel-J

Os resultados do ensaio de escoamento pelo Anel-J são apresentados na Tabela 12, onde d_F é o espalhamento com o anel J, e Δ é a diferença entre d_F e o espalhamento E, apresentado na Tabela 11.

Tabela 12 – Resultados de d_F a classificação quanto a habilidade passante pelo Anel-J

Mistura	d_F (mm)	Δ (mm)	Classe
CAA _{REF}	535	90	Não-autoadensável
CAA _{40%}	525	95	Não-autoadensável
CAA _{50%}	495	140	Não-autoadensável
CAA _{60%}	395	220	Não-autoadensável

Fonte: autoria própria, 2015.

Os resultados mostrados na Tabela 12 mostram que nenhuma das misturas pode ser considerada com características de CAA nesse ensaio, apresentando um valor de Δ superior a 50 mm. Também pode-se notar a partir dos dados, que quanto maior a quantidade de RCD adicionado à mistura, maior é o valor de Δ . Isso mostra que o uso do RCD pode ter aumentado a viscosidade do concreto, influenciando diretamente os resultados, apesar de eles terem apresentado características de CAA no ensaio de espalhamento.

4.1.4 Fluidez no Funil-V

Os resultados obtidos através do ensaio do Funil-V são mostrados na Tabela 13.

Tabela 13 – Tempo de fluxo e classificação dos CAA no ensaio do Funil-V

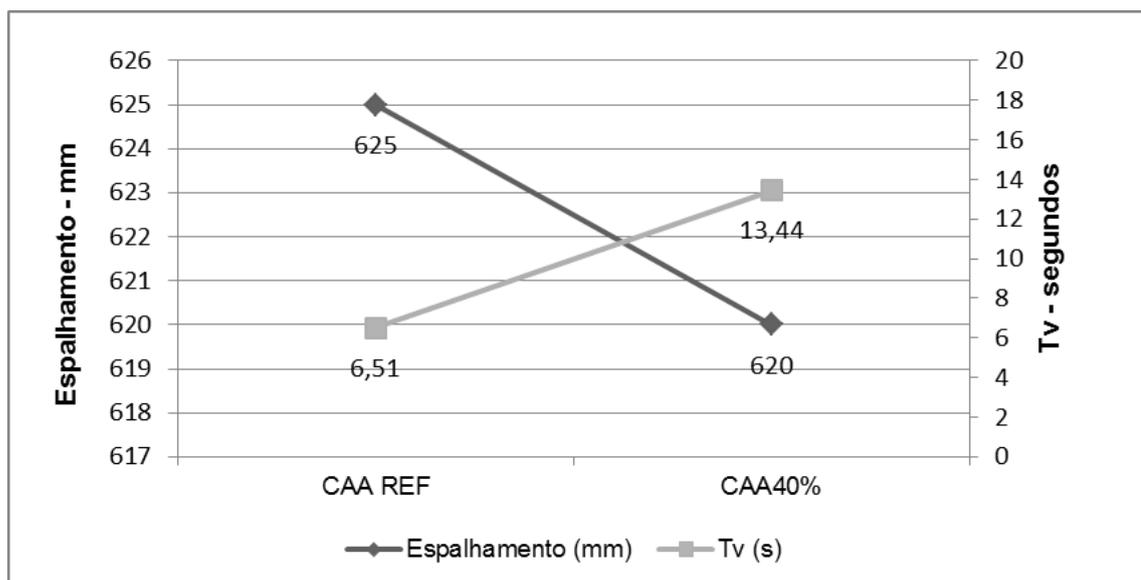
Mistura	T_v (s)	VF
CAA _{REF}	6,51	VF-1
CAA _{40%}	13,44	VF-2
CAA _{50%}	Bloqueado	Não-autoadensável
CAA _{60%}	Bloqueado	Não-autoadensável

Fonte – autoria própria, 2015

O CAA_{REF} e o CAA_{40%} foram classificados quanto à classe de viscosidade plástica aparente (VF) como VF-1 e VF-2, respectivamente, e podem ser considerados como autoadensáveis. No entanto, as misturas CAA_{50%} e CAA_{60%} não puderam ser classificadas como autoadensáveis, uma vez que elas ficaram bloqueadas na saída do funil. Mais uma vez pode-se perceber que o aumento da quantidade de RCD no concreto, possivelmente aumentou a sua viscosidade, não permitindo um fluxo livre e contínuo.

O gráfico da Figura 19 mostra a relação entre o espalhamento e o tempo de escoamento para as misturas CAA_{REF} e CAA_{40%}.

Figura 19 – Espalhamento X T_v



Fonte: autoria própria, 2015

Através da análise do gráfico da Figura 19, pode-se notar que o espalhamento e o T_v são resultados inversamente proporcionais, uma vez que quanto maior foi o diâmetro de espalhamento do CAA, menor foi o tempo de escoamento no funil-V.

4.1.5 Escoamento na Caixa-L

Os resultados obtidos no ensaio da Caixa-L são mostrados na Tabela 14.

Tabela 14 – Habilidade passante e classificação dos CAA no ensaio da Caixa-L

Mistura	H_2/H_1	Classe
CAA _{REF}	0,02	Não-autoadensável
CAA _{40%}	0,13	Não-autoadensável
CAA _{50%}	Bloqueada	Não-autoadensável
CAA _{60%}	Bloqueada	Não-autoadensável

Fonte –autoria própria, 2015

Conforme mostra a Tabela 14, nenhuma das misturas apresentou o resultado de H_2/H_1 igual ou superior a 0,8, não podendo ser classificados como CAA.

Possivelmente, com relação aos CAA com agregado reciclado, o tempo de mistura elevado para a melhor dispersão do sp, pode ter provocado a quebra dos agregados de RCD e com isso pode ter ocorrido um aumento da viscosidade da mistura causando o bloqueamento entre as barras.

Quanto à mistura CAA_{REF}, que também não apresentou os resultados esperados, possivelmente o uso de apenas 10% de pozolana, nesse caso a cinza volante, possa ter influenciado os resultados, pois Silva (2015) produziu um CAA com 20% de cinza volante e obteve resultados satisfatórios para o ensaio da Caixa-L.

4.1.6 Escoamento na Caixa-U

A Tabela 15 mostra os resultados obtidos através do ensaio da Caixa-U.

Tabela 15 – Classificação quanto ao ensaio da Caixa-U

Mistura	R _u (cm)	Classificação
CAA _{REF}	40	Não-autoadensável
CAA _{40%}	40	Não-autoadensável
CAA _{50%}	39	Não-autoadensável
CAA _{60%}	34	Não-autoadensável

Fonte – autoria própria, 2015

A partir dos dados obtidos no ensaio, nenhuma das misturas pode ser classificada como autoadensável através desse ensaio. Acredita-se que não foram obtidos os resultados esperados pelos mesmos motivos do ensaio da Caixa-L.

4.2 Ensaios no concreto no estado endurecido

A Tabela 16 mostra os valores de resistência apresentados pelos diferentes traços desenvolvidos, nos ensaios de compressão axial e compressão diametral, assim como o desvio padrão (DV) e o coeficiente de variação (CV) desses valores.

Tabela 16 – Valores de resistência à compressão (σ_c), resistência à tração por compressão diametral (σ_t), DV e CV

	σ_c (MPa)								
	CAA _{REF}		CAA _{40%}		CAA _{50%}		CAA _{60%}		
	7 dias	28 dias							
MÉD	6,70	9,46	7,29	10,68	6,12	8,00	9,41	11,99	
DV	0,45	0,74	0,17	1,05	0,39	0,54	0,94	1,05	
cv	6,71	7,86	2,33	9,83	6,35	6,75	9,98	8,72	
	σ_t (MPa)								
	MÉD	1,07	1,89	1,06	2,01	0,82	1,67	1,30	2,34
	DV	0,10	0,05	0,06	0,09	0,11	0,07	0,14	0,20
	cv	9,15	2,89	5,95	4,43	13,76	4,12	10,98	8,69

Fonte – autoria própria, 2015

Analisando os dados da Tabela 16, pode-se notar que a mistura de CAA_{REF} apresentou uma resistência à compressão de 6,7 MPa aos 7 dias, enquanto o CAA_{40%} e o CAA_{60%} apresentaram um aumento em relação a essa resistência de 8,8 e 40,45% respectivamente, e o CAA_{50%} apresentou uma diminuição de 8,6%.

Aos 28 dias, o CAA_{REF} apresentou uma resistência à compressão de 9,46 MPa, ao mesmo tempo que o CAA_{40%} e o CAA_{60%} atingiram uma resistência 12,9 e 26,7% maiores respectivamente, e o CAA_{50%} apresentou uma diminuição de 15,4%.

Com relação à resistência à tração, o CAA_{REF} apresentou 1,07 MPa aos 7 dias e o CAA_{40%} obteve um resultado semelhante, enquanto o CAA_{50%} apresentou uma diminuição de 23,3% e o CAA_{60%} um aumento de cerca de 21,5%.

Aos 28 dias, o CAA_{REF} atingiu uma resistência à tração de 1,89 MPa, enquanto o CAA_{40%} e o CAA_{60%} apresentaram respectivamente valores 6,3 e 23,8% maiores, e o CAA_{50%} apresentou o valor de resistência 11,6% menor.

Os valores de resistências do CAA_{50%} e CAA_{60%} reafirmam a hipótese mostrada no item 3.2, de que a substituição de 60% do AGN pelo AGR também seria uma boa opção, mostrando que com essa porcentagem de RCD, possivelmente houve um empacotamento maior dos agregados, resultando em uma resistência à compressão aos 28 dias 49,8% maior que a resistência obtida pelo CAA_{50%}.

4.3 Comparação entre as resistências do CAA com RCD vermelho e o CAA com RCD cinza produzido por Silva (2015)

A comparação feita entre as resistências adquiridas pelo CAA com RCD vermelho e o CAA com RCD cinza é mostrada na Tabela 17, onde o CAA com RCD vermelho é denominado de CAA_v e o CAA com RCD cinza é denominado CAA_c.

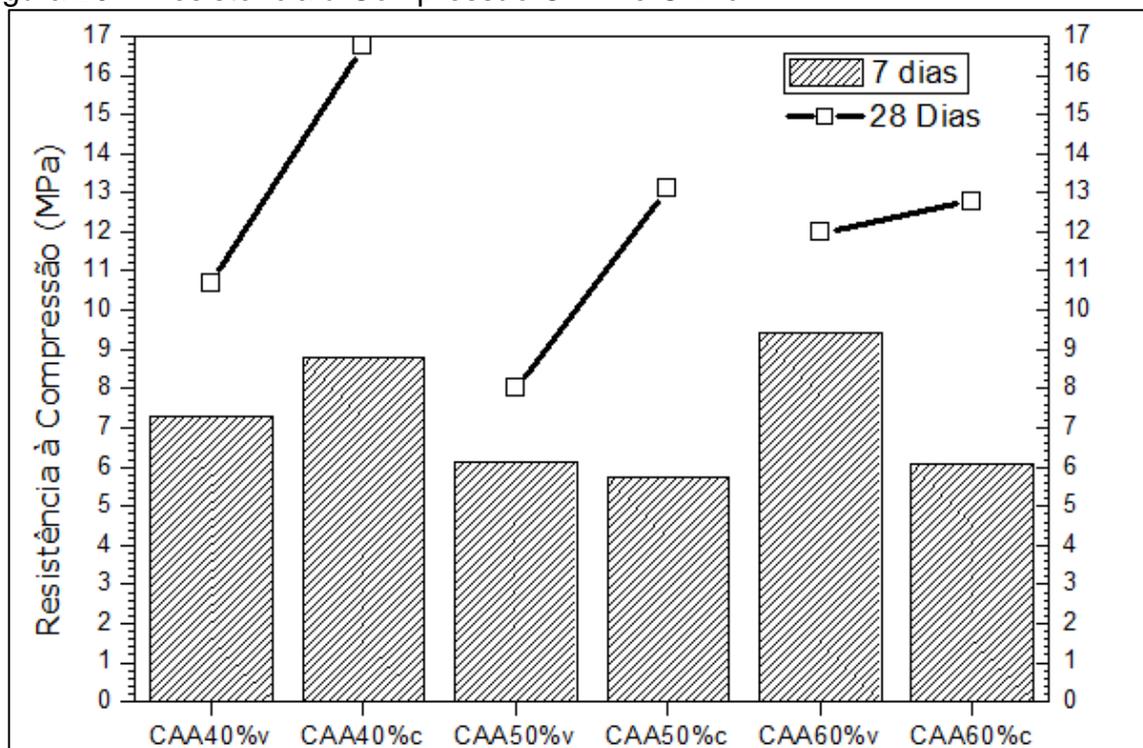
Tabela 17 – Comparação entre as resistências à compressão (σ_c) e à tração (σ_t) dos concretos aos 7 e 28 dias

	σ_c 7 (MPa)	σ_c 28 (MPa)	σ_t 7 (MPa)	σ_t 28 (MPa)
CAA_{40%v}	7,29	10,68	1,06	2,01
CAA_{40%c}	8,79	16,74	1,07	2,05
CAA_{50%v}	6,12	8,00	0,82	1,67
CAA_{50%c}	5,74	13,10	0,80	1,83
CAA_{60%v}	9,41	11,99	1,30	2,34
CAA_{60%c}	6,07	12,78	0,82	1,90

Fonte: autoria própria, 2015

Os resultados de resistência à compressão apresentados na Tabela 17, são mostrados no gráfico da Figura 20.

Figura 20 – Resistência à Compressão CAAv e CAAC



Fonte: autoria própria, 2015.

Analisando o gráfico da Figura 20, é possível notar que o CAAv apresentou uma leve tendência de adquirir uma resistência à compressão maior que o CAAC para as misturas contendo 50 e 60% de agregado reciclado. No entanto, o concreto contendo agregado reciclado classe cinza, apresentou resistências superiores para todas as porcentagens estudadas aos 28 dias. Percebe-se que as maiores diferenças foram para as misturas com 40 e 50%. Essa diferença foi de 56,7% para 40% de substituição e de 63,7% para 60%.

Adicionalmente, uma possibilidade para explicar o pouco ganho de resistência do CAAv pode ser pelo fato de que após os 7 dias de idade, houve uma queda na temperatura ambiente. Essa queda foi de 20,4°C para 13,2°C em média, o que não ocorreu para o concreto produzido por Silva (2015), que foi produzido no verão.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Considerações Finais

De acordo com os resultados obtidos nesse trabalho é possível chegar as seguintes conclusões:

- Com relação ao esqueleto granular, a melhor composição para o CAA foi de 50% AGR e 50% AGN, que resultou no menor volume de vazios, porém a porcentagem com 60% de AGR apresentou um valor muito semelhante de vazios, podendo também ser considerada uma boa porcentagem para substituição. Adicionalmente, na mistura entre o agregado graúdo e miúdo, a porcentagem que obteve maior peso unitário e menor volume de vazios foi a com 50% AMN e 50% da mistura AG.

- Nos ensaios de espalhamento com o cone de Abrams e com o cone invertido, todas as misturas estudadas atingiram resultados que as classificaram com CAA. Segundo a NBR 15823-1 (ABNT, 2010), todos os CAA foram classificados quanto ao espalhamento em SF-1, e quanto ao tempo de espalhamento t_{500} como VS-2. Também percebeu-se através do espalhamento que os CAA não apresentaram segregação ou exsudação.

- No ensaio do Anel-J, nenhuma das misturas pode ser classificada como CAA, segundo a NBR 15823-1 (ABNT, 2010), porém notou-se que quanto maior a porcentagem de RCD na mistura, menor foi o espalhamento com o Anel-J, mostrando que o uso do agregado reciclado influenciou os resultados.

- No ensaio do Funil-V, as mistura CAA_{MATRIZ} e $CAA_{40\%}$ foram classificadas como CAA, segundo a NBR 15823-1 (ABNT, 2010), enquadrando-se como VF-1 e VF-2 respectivamente. As outras misturas não puderam ser classificadas como autoadensáveis, o que pode ter ocorrido pelo fato de que possivelmente, o agregado reciclado aumentou a viscosidade do concreto, impossibilitando a passagem pelo funil.

- Nos ensaios da Caixa-L e da Caixa-U, nenhuma das misturas pode ser classificada como CAA, segunda a NBR 15823-1 (ABNT, 2010). Isso pode ter ocorrido no CAA_{REF} pelo uso de pouca cinza volante em substituição ao cimento.

Nos CAA com agregado reciclado, isso pode ter ocorrido devido ao elevado tempo de mistura para dispersar o super plastificante, o que possivelmente provocou a quebra do AGR, aumentando a área superficial e conseqüentemente a viscosidade plástica do concreto.

- Com relação às resistências à compressão e à tração, o CAA que obteve o melhor resultado foi o da mistura 60% AGR, que apresentou respectivamente, 11,99 MPa e 2,34 MPa, isso aconteceu possivelmente pelo fato dessa porcentagem de substituição ter apresentado um volume de vazios muito semelhante ao da porcentagem de 50%, podendo assim, ter havido um empacotamento maior dos materiais.

- Em relação a todos os ensaios feitos nesse trabalho, pode-se concluir que a mistura que apresentou os melhores resultados no geral foi o CAA_{40%}, pois obteve os melhores resultados nos ensaios reológicos, juntamente com o CAA_{REF}, e ao mesmo tempo atingiu bons resultados com relação às resistências;

- Em comparação com o CAA com agregado reciclado de RCD cinza, produzido por Silva (2015), as resistências aos 7 dias obtidas pelo CAA_v foram, na maioria das porcentagens de substituição, superiores. No entanto, aos 28 dias, o CAA_c atingiu resistências superiores que as do CAA_v em todas as porcentagens de substituição, isso pode ter acontecido devido as baixas temperaturas a que o CAA_v foi submetido após os 7 dias de idade, o que não ocorreu com o CAA_c, que foi produzido no verão.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

O tema CAA com resíduos de construção e demolição ainda foi pouco estudado, então nesse item estão algumas sugestões para estudos futuros:

- estudar a viabilidade econômica e o custo benefício da produção desse tipo de concreto em obra;

- analisar as mudanças nos resultados dos ensaios quando utilizado um agregado graúdo de dimensão máxima de brita zero;

- produzir um CAA com agregado reciclado com outro tipo de cimento, como por exemplo CP II-F, CP II-E ou CP V-ARI;

- realizar o detalhamento do índice de forma dos agregados;

- pesquisar sobre as patologias mais comuns que podem afetar esse tipo de concreto, e o quanto elas afetam a sua durabilidade.

REFERÊNCIAS

ÂNGULO, S. C.; JOHN, V. M.; ULSEN, C.; KAHN, H. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados separados por líquidos densos**. In: I Conferência Latino-americana de Construção Sustentável e X Encontro Nacional de Tecnologia de Ambiente Construído. São Paulo, 2004.

ÂNGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. 2005. 167 p. Tese – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. São Paulo, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificações. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 15116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15823-1**: Concreto autoadensável. Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 15823-2**: Concreto autoadensável. Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento - Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 15823-4**: Concreto autoadensável. Parte 4: Determinação da habilidade passante - Método da caixa L. Rio de Janeiro, 2010.

____. **NBR 15823-5**: Concreto autoadensável. Parte 5: Determinação da viscosidade - Método do funil V. Rio de Janeiro, 2010.

____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

____. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

____. **NBR 7222**: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

____. **NBR 10024**: Chapa dura de fibra de madeira — Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

____. **NBR NM 23**: Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

____. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.

____. **NBR NM 45**: Agregados - determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

____. **NBR NM 47**: Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002.

BRANCO, R. P. **Utilização de resíduos de concreto em concreto autoadensável.** 2012. 118 p. Dissertação – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 307, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. **Diário Oficial da Republica Federativa do Brasil.** Brasília, 2002.

BUTTLER, A. M. **Concreto com agregado graúdo reciclado de concreto – influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados.** 2003. 199 p. Dissertação – Universidade de São Paulo: escola de engenharia de São Carlos, São Carlos, 2003.

GLENIUM 51. **Ficha técnica.** Disponível em { http://www.ntcdistribuidora.com.br/uploads/produtos/especificacoes_completas_glenium_51_2507135731.pdf}. Acessado 16 de junho de 2014.

GOMES, P. C.; BARROS, A. R. **Métodos de Dosagem de Concreto Autoadensável.** São Paulo: Ed. PINI, 2009.

LISBOA, E. M. **Obtenção do concreto autoadensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas.** 2004. Não paginado. Dissertação – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2004.

MARANGON, E. **Desenvolvimento e caracterização de concretos autoadensáveis reforçados com fibras de aço.** 2006. 128p. Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

_____. **Caracterização material e estrutural de concretos autoadensáveis reforçados com fibras de aço.** 2011. 309p. Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais.** São Paulo: Ed. PINI, 1994.

MIRANDA, L. F.; ÂNGULO, S. C.; CARECI, E. D. **A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008**. Porto Alegre, 2009.

MMA (Ministério do Meio Ambiente); ICLEI (Secretaria para a América do Sul). **Planos de gestão de resíduos sólidos**: manual de orientação. Brasília, 2012.

PERIUS, G. R. **Influência das propriedades físicas de agregados reciclados sobre a retração por secagem em concretos autoadensáveis**. 2009. 128p. Dissertação – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SANTOS, H. N.; CÂNDIDA, A. C.; FERREIRA, T. K. S. Ações referentes à gestão de resíduos da construção civil em Araguari-MG. In: XVI ENCONTRO NACIONAL DOS GEÓGRAFOS (ENG), 2010, Porto Alegre, RS. **Anais...** Porto Alegre, AGB, 2010, 12p.

SILVA, R. K. **Influência da substituição parcial de agregados de RCD classe cinza em concretos autoadensáveis**. 2015. 67p. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2015.

TUTIKIAN, B.F. **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis**. Porto Alegre. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

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