

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS NAS PROPRIEDADES DO
CONCRETO AUTOADENSÁVEL**

FABRÍCIO GONZALES DE REZENDE

ORIENTADORA: VALDIRENE MARIA SILVA CAPUZZO

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA
CIVIL**

BRASÍLIA / DF: DEZEMBRO / 2016

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS NAS PROPRIEDADES DO
CONCRETO AUTOADENSÁVEL

FABRÍCIO GONZALES DE REZENDE

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

VALDIRENE MARIA SILVA CAPUZZO, DSc. (UnB)
(ORIENTADORA)

ELIANE KRAUS DE CASTRO, DSc. (UnB)
(EXAMINADORA INTERNA)

SHELLA PEREIRA VIEIRA, Mestranda. (UNIPAM)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 06 DE DEZEMBRO DE 2016

FICHA CATALOGRÁFICA

FABRICIO GONZALES DE REZENDE

Influência dos materiais nas propriedades do concreto autoadensável

[Distrito Federal] 2016

x, 64 p, 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2016)

Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Concreto autoadensável

2. Concreto convencional

3. Propriedades mecânicas

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

REZENDE, F.G. (2016). Influência dos materiais nas propriedades do concreto autoadensável. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 74 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Fabrício Gonzales de Rezende.

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Influência dos materiais nas propriedades do concreto autoadensável.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2016

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Fabrício Gonzales de Rezende

SHIN, QI 11 conjunto 4 casa 14, Lago Norte

71515-740 – Brasília/DF – Brasil

RESUMO

O concreto autoadensável está incluso em um grupo denominado Concretos Especiais, ele possui uma peculiaridade única de moldagem sem o uso de procedimentos mecânicos. Esta capacidade é obtida com o equilíbrio entre a fluidez e a viscosidade. A alta fluidez é alcançada com a utilização do aditivo superplastificante e a moderada viscosidade com a adição mineral com granulometria muito fina e/ou aditivos modificadores de viscosidade. Para efeito de comparação, foi produzido o concreto convencional e autoadensável. Para produzir o concreto convencional (CCV) e autoadensável (CAA), foram empregados diferentes materiais da região de Brasília-DF, avaliando-se o comportamento no estado fresco e endurecido. Para o CCV seguiu-se o método de dosagem de Helene e Terzian (1992) enquanto para o CAA foi realizado a composição do esqueleto granular utilizando o conceito de massa unitária no estado compactado juntamente com conceito da metodologia Tutikian e Dal Molin (2007). Foram realizados diferentes traços de concreto e para efeito de comparação entre CCV e CAA fixou-se a relação água material seco (H). Para o CAA realizou-se os ensaios no estado fresco de massa específica, de espalhamento, da caixa L, do funil V e índice de estabilidade visual, critério em estudo na revisão das normas de autoadensável. Para o CCV efetuou os ensaios de abatimento utilizando o tronco de cone e massa específica. Com os resultados dos ensaios do CAA no estado fresco avaliou se o mesmo atende aos requisitos de um concreto autoadensável segundo a NBR 15823:2010 e avaliou a influência dos diferentes agregados miúdos utilizados. No estado endurecido foi realizado os ensaios de módulo de elasticidade, resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral para ambos os concretos. Com os resultados dos ensaios no estado endurecido foi possível realizar um estudo comparativo do comportamento mecânico destes concretos com diferentes agregados. Os valores das propriedades mecânicas do CAA e do CCV, obtidos experimentalmente, foram comparados com os valores estimados conforme os novos critérios apresentados na NBR 6118:2014.

Palavras chave: *concreto autoadensável concreto convencional, e propriedades mecânicas.*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Justificativa	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo geral.....	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Definição do concreto autoadensável	3
2.2. Desenvolvimento do concreto autoadensável	4
2.3. Materiais constituintes	8
2.3.1. Cimento Portland	9
2.3.2. Agregados	10
2.3.3. Esqueleto Granular.....	10
2.3.4. Água.....	11
2.3.5. Adições Minerais	12
2.3.6. Aditivo Superplastificante.....	13
2.4. Propriedades do CAA no estado fresco	155
2.4.1. Fluidez do CAA	166
2.4.1.1. Ensaio de Espalhamento.....	166
2.4.2. Habilidade passante do CAA	18
2.4.2.1. Ensaio da Caixa L.....	188
2.4.3. Resistência à segregação do CAA.....	199
2.4.3.1. Ensaio do Funil V.....	199
2.4.3.2. Índice de Estabilidade Visual.....	21
2.5. Propriedades mecânicas do CAA no estado endurecido	22
2.5.1. Resistência à compressão simples axial e resistência à tração por compressão diametral	22
2.5.2. Módulo de elasticidade	244
3. METODOLOGIA	266
3.1. Programa experimental	27
3.2. Escolha e caracterização dos materiais	277
3.3. Estudo de dosagem dos concretos	288
3.4. Ensaio do concreto	3030
3.4.1. Ensaio do CAA no estado fresco	311
3.4.1.1. Espalhamento e T ₅₀₀	31

3.4.1.2. Caixa L.....	32
3.4.1.3. Funil V	32
3.4.1.4. Índice de Estabilidade Visual.....	33
3.4.2. Ensaio no estado endurecido	33
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	34
4.1. Caracterização dos materiais.....	34
4.2. Determinação dos traços dos concretos	36
4.3. Propriedades do CAA no estado fresco	37
4.4. Propriedades mecânicas dos concretos	41
4.4.1. Comparação das propriedades mecânicas com as novas estimativas propostas pela NBR 6118:2014. ...	46
5. CONCLUSÃO	53
5.1. Sugestão para trabalhos futuros.....	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56
ANEXOS	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.A – Ponte Akashi-Kaikyo no Japão, na qual foi utilizado CAA	6
Figura 1.B – Blocos de ancoragem da ponte Akashi-Kaikyo.....	6
Figura 2 – Parede de simulação de terremotos.....	6
Figura 3 – Edifício Camila, em Goiânia, primeira grande obra com uso de CAA no Brasil.....	7
Figura 4 – Composição da pasta de cimento em diversos estágios de hidratação.....	12
Figura 5 – Relação entre o espalhamento na mesa de espalhamento e relação quantidade de água no concreto produzido com e sem superplastificante.....	14
Figura 6 – Mecanismo de repulsão estérica para a cadeia de policarboxilato.....	15
Figura 7 – Equipamentos do ensaio de espalhamento.....	17
Figura 8 – Ensaio de espalhamento.....	17
Figura 9 – Caixa L.....	19
Figura 10 – Ensaio da caixa L.....	19
Figura 11 – Funil V.....	20
Figura 12 – Ensaio do funil V.....	20
Figura 13 – Classes do índice de estabilidade visual.....	21
Figura 14 – Fluxograma do programa experimental realizado nesta pesquisa.....	26
Figura 15 – Fluxograma da caracterização dos materiais realizados.....	27
Figura 16 – Fluxograma dos concretos dosados.....	29
Figura 17 – Fluxograma dos ensaios realizados para os concretos CAA e CCV.....	30
Figura 18 – Composição granulométricas brita diâmetro máximo 12,5 mm.....	35
Figura 19 – (A) areia britada, (B) Areia natural (módulo de finura=1,27), (C) Areia natural (módulo de finura=2,36) e (D) composição entre a areia britada e a Areia natural (módulo de finura=1,27).....	35
Figura 20 – Inspeção visual do 1ª CAA 1:3,5 (A), 1:6,5 (B), do 2ª CAA 1:3,5 (C), e do 3ª CAA 1:3,5 (D), 1:5(E)	39
Figura 21 – Distribuição dos agregados na pasta de cimento do 1ª CAA (A), 2ª CAA (B) e 3ª CAA (C).....	41
Figura 22 – Resultados de resistência à compressão (A), à tração por compressão diametral (B) e módulo de elasticidade (C) em função da idade do CCV e do 1ª CAA.....	42
Figura 23 – Resultados de resistência à compressão (A), à tração por compressão diametral (B) e módulo de elasticidade (C) em função da idade do 1ª CAA e do 3ª CCV	44
Figura 24 – Tendência das resistências à compressão dos concretos.....	46
Figura 25 – Relação da resistência à tração por compressão diametral com a resistência à compressão simples para o CCV, 1ª CAA, 2ª CAA e o 3ª CAA.....	48
Figura 26 – Relação do módulo de elasticidade com a resistência à compressão simples para o CCV, 1ª CAA, 2ª CAA e o 3ª CAA.....	50
Figura 27 – Resultado do módulo de elasticidade experimental e teórico em função da idade do CCV (A), 1ª CAA (B), 2ª CAA (C) e do 3ª CAA (D).....	51

Figura E.1 – Diagrama de dosagem do concreto convencional para um teor de argamassa de 55% e abatimento de 100mm.....	63
Figura E.2 – Diagrama de dosagem do concreto autoadensável.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classe de espalhamento (slump-flow) e sua aplicação.....	17
Tabela 2 – Classe de viscosidade plástica aparente do CAA e sua aplicação.....	18
Tabela 3 – Classe de habilidade passante caixa L e sua aplicação.....	19
Tabela 4 – Classe de viscosidade plástica aparente do CAA e sua aplicação.....	21
Tabela 5 – Classes do índice de estabilidade visual (IEV).....	22
Tabela 6 – Resumo dos ensaios de caracterização dos materiais realizados.....	28
Tabela 7 – Resumo dos ensaios realizados nos concretos.....	31
Tabela 8 – Resultado dos ensaios de caracterização dos materiais.....	34
Tabela 9 – Traços dos concretos convencional (CCV) e autoadensável (CAA).....	36
Tabela 10 – Resultado dos ensaios dos CAA no estado fresco.....	37
Tabela 11 – Resultado do ensaio índice de estabilidade visual.....	40
Tabela 12 – Propriedades mecânicas dos concretos convencional (CCV) e autoadensável (CAA).....	41
Tabela 13 – Resultado experimental e teórico da resistência à tração média.....	47
Tabela 14 – Resultado experimental e teórico do módulo de elasticidade.....	49
Tabela A.1 – Variação dos materiais na determinação do teor de argamassa seca ideal.....	60
Tabela A.2 – Quantidade de materiais utilizados nos traços do CCV.....	61
Tabela B.1 – Quantidade de materiais utilizados nos traços do 1ª CAA.....	61
Tabela C.1 – Quantidade de materiais utilizados no traço do 2ª CAA.....	62
Tabela D.1 – Quantidade de materiais utilizados nos traços do 3ª CAA.....	62

LISTA DE ABREVIACOES

1ª CAA – primeiro concreto autoadensável;

2ª CAA – segundo concreto autoadensável;

3ª CAA – terceiro concreto autoadensável;

CCV – concreto convencional;

a_{n-} = Areia natural (módulo de finura=1,27);

a_{n+} = Areia natural (módulo de finura=2,36);

a_b = areia britada;

p = agregado graúdo;

f = fíler calcário;

SP = superplastificante;

C = consumo de cimento;

a/c – relação água/cimento;

H – relação água material seco;

Eq. – Equação;

min – minuto (s);

seg – segundo (s).

1. INTRODUÇÃO

1.1. Justificativa

Segundo a NBR 15823-1:2010 um concreto é considerado autoadensável quando este flui, autoadensar pelo seu peso próprio, preencher a forma e passar por embutidos (armaduras, dutos e insertos), enquanto mantém sua homogeneidade (ausência de segregação) nas etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento.

O concreto autoadensável é uma mistura que está incluso em um grupo que possuem tecnologias inovadoras, denominado concretos especiais. De acordo com Geyer (2005) o emprego dessa tecnologia possibilita vários ganhos diretos e indiretos para o mercado da construção, como facilidade no lançamento, qualidade do acabamento, facilidade de aplicação, redução da mão de obra, melhoria das condições de trabalho, redução de ruídos, aumento da durabilidade devido à redução de defeitos de concretagem e redução do custo de aplicação por m³ de concreto.

Várias pesquisas sobre CAA foram e estão sendo realizadas com diferentes focos de abordagens. De uma forma geral existem as pesquisas que avaliam as influências dos materiais constituintes e suas composições, as propriedades deste concreto no estado fresco, as propriedades mecânicas e a durabilidade.

Galán *et al* (2015) ao estudar o CAA comparou os valores experimentais do módulo de elasticidade em função da resistência à compressão com as estimativas de diferentes normas. Verificaram que a relação entre o módulo de deformação e a resistência à compressão independe da idade e que os valores experimentais são coerentes com os valores teóricos.

O conhecimento das propriedades do concreto é fundamental para o dimensionamento das estruturas. Para se produzir o concreto autoadensável é imprescindível a utilização de menores valores de diâmetro máximo do agregado graúdo. Dentre os componentes do concreto, os agregados, principalmente os graúdos, tem uma ampla influência no módulo de elasticidade. Esta mudança pode influenciar nas propriedades mecânicas do concreto, principalmente no valor do módulo de elasticidade (BENETTI, 2012).

A NBR 6118: 2014 aceita o cálculo da resistência à tração e do módulo de elasticidade através dos resultados derivados do ensaio de resistência à compressão. Normalmente os resultados das

resistências à tração e dos módulos de elasticidade aplicados nos cálculos para projetos de concreto são estimados a partir das expressões empíricas que expõe sujeição direta da resistência à tração e do módulo de elasticidade com a resistência à compressão e massa específica do concreto. Essas expressões empíricas compõem os novos critérios propostos pela NBR 6118:2014.

Nesse contexto, o presente projeto teve como finalidade produzir concretos autoadensável e um concreto convencional, empregando diferentes materiais da região de Brasília/DF e comparar as suas propriedades no estado fresco e endurecido. Foram comparados os valores das propriedades mecânicas de ambos os concretos com os novos critérios apresentados na NBR 6118:2014.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

Esta pesquisa teve como objetivo geral avaliar as propriedades no estado fresco e endurecido dos concretos convencional e autoadensável, produzidos com diferentes materiais da região de Brasília-DF.

1.2.2. Objetivos específicos

Para se realizar a proposta estabelecida, especificam-se abaixo os objetivos específicos a serem alcançados:

- Produzir concretos autoadensáveis com diferentes tipos de agregado miúdo e realizar e analisar ensaios no estado fresco de acordo com a NBR 15823:2010.
- Avaliar o comportamento no estado endurecido do concreto autoadensável e comparar com os do concreto convencional produzido com o mesmo tipo de agregado. Foram realizados ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade.
- Comparar o comportamento no estado endurecido dos concretos autoadensáveis produzidos com diferentes tipos de agregado miúdo.
- Comparar os resultados das propriedades mecânicas obtidas com as novas estimativas proposta pela NBR 6118:2014.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico são apresentadas definições introdutórias do projeto desenvolvido. São exibidos conceitos teóricos e relevantes para esse projeto. Entre os pontos mais consideráveis pode-se citar: a definição de concreto autoadensável, os materiais fundamentais para a sua execução e algumas propriedades importantes como viscosidade, fluidez e ausência de segregação. Quando possível, foi realizado uma comparação entre o concreto convencional e o concreto autoadensável.

2.1. Definição do concreto autoadensável

De acordo com NBR 15823-1:2010, um concreto só será considerado autoadensável, se três propriedades forem alcançadas: a fluidez, a coesão necessária para que a mistura escoe intacta entre barras de aço ou habilidade passante e a resistência à segregação.

A propriedade referida como fluidez é especificada pela capacidade que a mistura tem de fluir dentro da fôrma e ocupar todos os espaços vazios através da ação da força gravitacional. Habilidade passante é a capacidade que o concreto tem de escoar pela a fôrma, avançando pelas armaduras, sem apresentar bloqueio do fluxo ou segregação. E resistência à segregação é a propriedade que define a capacidade do CAA de se manter coeso ao fluir dentro das fôrmas, passando ou não por obstáculos (BOSILJKOV, 2003).

Em tese os materiais utilizados para produção do concreto autoadensável, são os mesmos empregados para a produção de concretos convencionais, porém com maior adição de finos e de aditivos superplastificante. A incorporação de adições minerais e aditivos químicos ao concreto, resulta em uma maior facilidade de bombeamento, excelente homogeneidade, resistência e durabilidade. Com isso o alto teor de finos utilizados para dar estabilidade a principal característica que o define, aumenta o consumo de água e por consequência a retração por secagem.

Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), a característica de habilidade de preencher as fôrmas sem o surgimento de bolhas de ar ou falhas de concretagem, seja um CAA ou não, é um dos principais fatores que interferem na qualidade final do concreto endurecido. É absolutamente proibido o uso de qualquer tipo de adensamento no lançamento do CAA, seja ele mecânico ou manual. A única forma para a sua compactação é o seu peso próprio, ou seja, a ação da força da gravidade em sua massa. Dessa forma é essencial tomar os cabíveis cuidados com a sua homogeneidade, pois uma

mistura mal dosada pode levar a segregação, mesmo parecendo coesa. Por tanto o CAA no estado fresco deve ser previamente testado por equipamentos, normatizados pela NBR 15823:2010, que simulem as condições reais, pois é preciso assegurar de que suas propriedades estão adequadas.

Uma das grandes vantagens do CAA, aumento da velocidade de concretagem, se tornou um grande risco, pois ele aumenta a pressão exercida nas fôrmas, fazendo com que elas cedam caso não se tenha cuidados extras, conhecido como colapso de fôrmas. Segundo Walravem (2005), a velocidade de concretagem influi diretamente na pressão das fôrmas.

Brameshuber e Uebachs (2003) demonstraram que a pressão nas fôrmas exercida pelo CAA é aproximadamente o dobro quando este é bombeado pela parte inferior de uma estrutura vertical se comparado com bombeamento pela parte superior.

O concreto autoadensável vem sendo caracterizado como uma grande revolução na tecnologia do concreto para a construção civil, possibilitando vários ganhos, diretos e indiretos para o mercado da construção, dentre os principais cita-se:

Redução do custo de aplicação por m³ de concreto; garantia de excelente acabamento em concreto aparente; permite bombeamento em grandes distâncias horizontais e verticais com maior velocidade; melhoria nas condições de segurança na obra; significativa redução nas atividades de espalhamento e de vibração; permite a concretagem sem adensamento em regiões com grande densidade de armadura; aumento das possibilidades de trabalho com fôrmas de pequenas dimensões; redução do custo final da obra em comparação ao sistema de concretagem convencional; acelera o lançamento do concreto na estrutura, permitindo concretagens mais rápidas; redução da mão-de-obra no canteiro; melhoria do acabamento superficial; aumento da durabilidade devido à redução de falhas na concretagem.

2.2. Desenvolvimento do concreto autoadensável

O concreto autoadensável foi desenvolvido no Japão em 1988 para cumprir com as exigências do mercado e as técnicas construtivas que cada vez mais requisitam concretos com características especiais. Distintos autores classificam, teoricamente, o CAA não como um novo tipo ou classe de concreto, e sim como uma nova tecnologia (SZECSY, 2005).

Segundo Okamura (1999), no Japão, o desenvolvimento de concretos especiais como os CAA, foram imprescindíveis para assegurar estruturas mais duráveis, uma vez que o mercado

apresentava insuficiência de mão-de-obra qualificada e de equipamentos adequados para atender às exigências das estruturas com elevada taxa de armadura, já que as mesmas são comuns pela frequência de abalos sísmicos no país. Os estudos sobre o CAA tiveram início em 1986, na Universidade de Tóquio, com seu primeiro protótipo em 1988 (OKAMURA e OUCHI, 1999).

Entre 1993 e 2003, Domone (2006) fez um apuramento das publicações que descreviam o uso do CAA. Em sua pesquisa, verificou inúmeras curiosidades, entre elas que 14% das obras que optaram pelo uso do CAA foi por razões econômicas, através da redução do número de trabalhadores ou o tempo de construção, 67% que utilizaram este tipo de concreto, o fizeram devido às vantagens técnicas do material comparado ao CCV, como o impedimento de acesso ao local ou dificuldade de vibração e 10% que decidiram pelo uso do CAA, o fizeram por este material ser uma modernidade. Em todos os casos observados, a trabalhabilidade do CAA foi conferida com o uso do ensaio de espalhamento e esporadicamente como parâmetro foram usados outros ensaios, como caixa L, caixa U e anel J.

O CAA pode ser fabricado na indústria de pré-fabricados e em construções onde o concreto é moldado no local. A produção do CAA é maior no primeiro caso, devido a sua sensibilidade a variações em relação ao CCV, o que é mais fácil de controlar em um recinto como uma indústria de pré-fabricados (TUTIKIAN *et al.*, 2005b).

O CAA é indicado para utilização em obras convencionais onde se quer maior velocidade de concretagem, redução de custos, locais de difícil acesso, peças onde seja difícil a utilização de vibradores, fôrmas com grande concentração de ferragens, paredes, vigas, pilares, fundações executadas com hélice contínua, lajes de pequenas espessuras, obras com acabamento em concreto aparente e uma melhor qualidade do concreto, exige-se que as fôrmas sejam estanques para impedir a perda de material, já que o concreto é altamente fluído. Também é recomendado para a recuperação de estruturas antigas, onde não é aconselhável a existência de vibração, pois poderia provocar defeitos maiores ou ruptura do elemento estrutural.

Estudos feitos por entidades americanas desde 2008 para normatização, padronização e especificações para o CAA, vem fazendo com que sua aplicação seja cada vez maior (ARAÚJO, 2007). Dentre as execuções com concreto autoadensável pelo mundo, podemos citar:

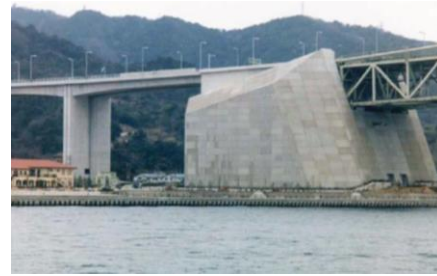
As duas ancoragens da ponte Akashi-Kaikyo (Figura 1, A e B), no Japão, em 1988. Foi uma das primeiras utilizações do concreto autoadensável no mundo, ela possuía um vão de 1991 m, na

época era o maior vão do mundo, e foram lançados 290.000 m³ de CAA. O concreto foi bombeado em tubos de 200 metros de comprimento. A economia de tempo foi da grandeza de 20%, reduzindo o seu tempo de execução de 2,5 anos para 2 anos (GEYER, 2005).

Figura 1.A – Ponte Akashi-Kaikyo no Japão, na qual foi utilizado CAA. Fonte: Comunidade da Construção (2012)



Figura 1.B – Blocos de ancoragem da ponte Akashi-Kaikyo. Fonte: Comunidade da Construção (2012)



Na Universidade de Illinois nos Estados Unidos, foi desenvolvido um projeto que consistiu em uma parede altamente armada em forma de “L” que seria resistente a inúmeros terremotos para simulação (Figura 2). A estrutura possuía vários sensores para medições e os mesmos não poderiam se mover, dessa forma, a prática de adensamento foi desconsiderada. Usou-se o CAA e depois da desfôrma, constatou-se que a parede não demandava reparos e que os sensores se encontravam intactos. (GRACE, 2005).

Figura 2 – Parede de simulação de terremotos. Fonte: Grace (2005)



O concreto autoadensável é um material que vem ganhando gradativamente a confiança dos construtores, que dele se vale para viabilizar soluções técnicas em complexas estruturas moldadas in loco. Antes da normatização dos ensaios do CAA no estado fresco em 2010, no Brasil eram utilizados valores estabelecidos por diversos autores que caracterizavam o concreto nestes ensaios. Podemos citar como exemplo Peterssen (1998 e 1999), Noor e Uomoto (1999), Coppola (2000), Gomes (2002) e a comissão EFNARC, que em 2002 publicou um manual com limites que determinavam se um concreto era autoadensável.

De acordo com Geyer (2005), no Brasil, o provável primeiro edifício residencial a utilizar na totalidade da sua estrutura o CAA foi em Goiás, na cidade de Goiânia, na concretagem do Ed. Camila (Figura 3), em 2004, localizada no Residencial Sorelle. Ele cita algumas vantagens observadas com o uso do CAA na construção desse edifício. Uma maior velocidade da concretagem da estrutura, uma redução em média de 70% do número de trabalhadores na concretagem, uma melhor qualidade e facilidade no nivelamento da laje e eliminação de ninhos e falhas de concretagem.

Figura 3 – Edifício Camila, em Goiânia, primeira grande obra com uso de CAA no Brasil. Fonte: Geyer (2005)



Tutikian *et al.* (2005a) efetuaram uma pesquisa comparativa de custos globais em pré-fabricados, entre o CAA e o CCV, englobando todas as fases do processo, desde a composição unitária dos insumos até a fase de reparos, a qual foi suprimida com o uso do CAA. Neste trabalho foi analisado os resultados comparativos entre os concretos de uma empresa, foi observado que o custo global do CAA apresentou uma redução de 3% em relação ao CCV, e ainda apresentou inúmeros benefícios que não foram possíveis serem estimados, como a diminuição do barulho de vibração, uma maior vida útil das fôrmas, a economia de energia elétrica e um ganho ambiental, uma vez que uma fração do cimento foi substituído por cinza volante.

A seguir será exemplificado alguns casos no Brasil, retirados da Revista TECHNE (2008), onde o CAA foi aplicado na construção civil.

“A obra do Metrô de São Paulo na estação Luz da linha 4 em 2007, onde o CAA foi utilizado na região de engaste da laje com as paredes do poço. Essa era uma região com alta taxa de armadura, a qual as equipes que executavam a concretagem teriam dificuldades em realizar a adequada

vibração do concreto. O concreto autoadensável foi usado para garantir a qualidade da execução da laje por dispensar a etapa de adensamento. ”

“Na obra da unidade JK-Itaim do Laboratório Fleury, também em São Paulo, da empresa BKO, era preciso agilidade em todas as etapas, pois tinha prazo de entrega de 189 dias. Na execução dos quatro pavimentos da estrutura, que deveriam ficar prontos em dois meses, os engenheiros optaram para cada um desses níveis concretar, ao mesmo tempo, pilares, vigas e lajes, uma solução pouco usual. Com o concreto convencional seria necessário executar primeiro os pilares e depois as lajes e as vigas, mas com o concreto autoadensável foi possível reduzir o tempo da execução. Também durante a concretagem, foi possível utilizar cerca de 20% menos funcionários que foram remanejados para adiantar outros serviços na obra. ”

“Inaugurado na década de 1980, em Goiânia, o Shopping Flamboyant, passou por obras de ampliação em 2006. Nela, cerca de 3 mil m³ de concreto autoadensável foram utilizados no reforço de algumas fundações e pilares de concreto já existentes. Esse concreto também foi escolhido para proporcionar maior velocidade na execução das lajes da nova estrutura, composta ainda por pilares e vigas metálicos. Durante a obra, o shopping continuou funcionando normalmente, o que muitas vezes obrigava as equipes a realizar concretagens durante a madrugada, quando o custo da hora extra é maior, com o CAA foi possível reduzir a quantidade de mão de obra e com isso uma redução brutal de horas extras dos trabalhadores. Do ponto de vista técnico, o uso de um material mais fluido tornava muito mais fácil o transporte por bombas a grandes distâncias horizontais, características de shopping centers. Segundo o gerente da Realmix, essas distâncias chegavam a 90 m. A expansão do Flamboyant foi concluída em seis meses. ”

2.3.Materiais constituintes

Os materiais essenciais para a dosagem do CAA são em sua maioria os mesmos aplicados na composição do CCV. São o cimento Portland, o agregado miúdo, o agregado graúdo e a água podendo ser utilizados também aditivos e adições. A diferença de materiais está na dosagem de finos e aditivos químicos, que são colocados com um maior teor em comparação com o CCV.

A qualidade de qualquer concreto, independentemente do método de dosagem utilizado, depende da qualidade dos materiais empregados. Dessa forma, para se alcançar satisfatórias qualidades do

concreto (fluidez, propriedades mecânica, durabilidade e impermeabilidade) se faz necessário realizar uma seleção cuidadosa dos materiais.

2.3.1. Cimento Portland

O cimento Portland resulta da queima do calcário com a argila e minério de ferro, utilizado para reduzir a temperatura de fusão parcial, formando um produto denominado clínquer. Após a formação do clínquer, ele é moído junto com a gipsita, sulfato de cálcio, que tem a função de retardar a pega, dessa forma sua quantidade não pode ultrapassar os 4% (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

O clínquer pode ser moído com três tipos de adição mineral: fíler calcário, escoria de alto forno ou pozolana. Cada teor dessas adições produz diferentes tipos de cimento Portland, com propriedades únicas e utilizações específicas. Os cimentos produzidos são denominados no Brasil de Cimento Portland comum - CP I, CP I-S, Cimento Portland composto - CP II-E, CP II-Z, CPII-F, CP III, CP IV e CP V (ARI).

O mesmo cimento empregado para a confecção do CCV pode ser usado para a produção do CAA. Cientificamente não existe definição de um cimento adequado para produção de CAA, desde que seja o que possua menor variabilidade de resistência à compressão (TUTIKIAN, 2004).

A trabalhabilidade e a necessidade de água da mistura estão diretamente ligadas à quantidade de aluminato tricálcico (C_3A) e a granulometria do cimento. O controle na quantidade de C_3A e a granulometria do cimento são importantes para a determinação do seu comportamento e fluxo. Cimento com mais de 10% de C_3A não é indicado para produção do CAA, pois a sua aplicação afeta o tempo de fluidez, em razão do aumento da velocidade do endurecimento. Para a produção de concretos em geral, a finura do cimento se torna mais vantajosa na hidratação do cimento, a medida que ele se torna mais fino, pois aumenta a superfície específica ampliando a quantidade de partículas em contato com a água (NEVILLE, 2016).

2.3.2. Agregados

O agregado é um material granular, sem forma e volume definidos, normalmente é inerte. Como exemplo de agregados temos as rochas britadas, os fragmentos rolados no leito dos cursos d'água e os materiais encontrados em jazidas provenientes de alterações de rocha (FURNAS, 1997).

Os agregados exercem uma função fundamental na produção do concreto, tanto economicamente como mecanicamente, fornecendo-lhe características importantes, como retração e aumento ao desgaste, sem prejudicar as propriedades mecânicas do concreto (FURNAS, 1997).

Na dosagem do CAA pode-se utilizar tanto areias naturais, quanto as britadas. As areias naturais por terem a sua forma mais arredondada e lisa, aumentam a fluidez da pasta para um mesmo volume de água, dessa forma elas são mais apropriadas para a dosagem do CAA. A resistência ao cisalhamento da argamassa será maior quanto maior o ângulo da partícula, diminuindo a possibilidade de deformação do concreto (OKAMURA e OUCHI, 2003).

O CAA é um concreto que requer adição de finos para uma melhor coesão, assim, quanto mais fino o agregado miúdo, melhor. O uso de areia grossa pode levar o concreto a segregação.

O agregado graúdo que possui superfície lisa é o mais adequado para dosagem de CAA. Agregados porosos e angulares têm melhor aderência com a pasta de cimento, porém, a porosidade faz com que ocorra um maior consumo de água (TUTIKIAN & DAL MOLIN, 2008).

Segundo Gomes e Barros (2009), os agregados devem responder os requisitos da norma iguais as utilizadas para o CCV. Aconselha-se considerar a granulometria abaixo de 0,125 mm parte dos finos da dosagem, já que a mesma irá contribuir para a melhoria da coesão e aumento da viscosidade. Para o agregado graúdo, o diâmetro máximo característico deve ser de 20 mm, a ACI recomenda um diâmetro máximo de 12 mm para o agregado graúdo, essa redução na granulometria do agregado graúdo pode influenciar de forma negativa no módulo de elasticidade do concreto autoadensável.

2.3.3. Esqueleto Granular

O esqueleto granular é determinado pela relação ótima entre agregado miúdo e agregado graúdo, que proporcione uma máxima densidade. A combinação ótima entre os agregados é obtida através de vários procedimentos de mistura, podendo ser utilizado compactação ou não. Com o objetivo

de se obter o ponto de maior massa unitária da mistura e o menor volume de vazios entre eles o ideal é que seja realizado o ensaio de massa unitária no estado compactado para a determinação do esqueleto granular. A combinação entre os agregados se inicia pelo de maior granulometria até chegar no de menor granulometria. Nesse contexto, partículas de menor tamanho podem ocupar os espaços de vazios deixados livres pelo empacotamento de partículas de tamanho superior, o que eleva a densidade do sistema (SILVA *et al*, 2004).

Com a busca de teores adequadamente combinados de agregados graúdos e miúdos, contribuindo para minimizar a quantidade de interstícios, obtém-se uma maior densidade e como benefício uma maior resistência. Quanto maior for a densidade granular do material, menor será o volume de vazios da mistura e assim menos pasta será necessário (CHANG, 2004)

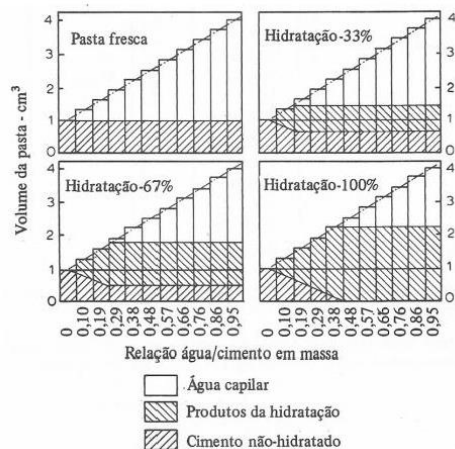
2.3.4. Água

A água é o material mais importante que controla as propriedades mecânicas do concreto, independente do traço a sua dosagem tem uma função determinante na resistência do concreto e hidratação do cimento. A quantidade de água em uma mistura depende de vários fatores, tais como: propriedades dos agregados, quantidade de água necessária para hidratação do cimento, quantidade total de partículas finas na mistura, uso de adições ou aditivos (BARROS, 2009).

De acordo com a Lei de Abrams a resistência do concreto é inversamente proporcional à relação água/cimento (a/c), essa analogia também determina a porosidade. “Se a relação água cimento efetiva da mistura, prevista a exsudação, for menor que, aproximadamente, 0,38, em massa, não é possível a hidratação completa, pois o volume disponível é insuficiente para acomodar todos os produtos de hidratação. Por outro lado, se a relação água/cimento for maior do que, aproximadamente, 0,38, todo cimento pode se hidratar, mas também estarão presentes poros capilares.” (NEVILLE, 2016).

A Figura 4 ilustra como se comporta a hidratação do cimento em diferentes estágios com diferentes relações a/c :

Figura 4 – Composição da pasta de cimento em diversos estágios de hidratação. Fonte: Neville. (2016)



Segundo Cavalcanti (2006), quanto maior a quantidade de água no concreto, menor é a tensão limite de escoamento, aumentando sua deformabilidade e diminuindo a viscosidade da mistura. No entanto, um elevado teor de água pode provocar segregação e redução da resistência. Para garantir a alta fluidez do CAA, sem afetar negativamente suas propriedades, parte da água pode ser substituída por superplastificantes.

2.3.5. Adições Minerais

Adições minerais são materiais arenosos pulverulentos, granulometria com diâmetro menor que 0,075 mm, que ao serem adicionados ao concreto fornecem melhorias nas características do mesmo. Seu uso também resulta em uma considerável economia de energia e custo (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Mendes e Bauer (2015), afirmam que os efeitos dos finos sobre as propriedades no estado fresco do CAA são mais relevantes que os efeitos dos agregados graúdos. As adições minerais são usadas para aumentar a coesão e evitar a segregação do CAA. Além de estarem diretamente ligadas às propriedades de resistência à segregação, também possuem um papel importante na durabilidade e resistência do concreto. O aumento do desempenho mecânico e da durabilidade do concreto acontece quando os vazios são ocupados por silicato de cálcio hidratado, que é um composto resistente derivado da hidratação do cimento Portland, quando recebe a adição de minerais que reagem com o hidróxido de cálcio (NEVILLE, 2013).

Os finos atuam como pontos de nucleação, isto é, quebram a inércia do sistema fazendo com que as partículas de cimento sofram reação mais rápida com a água, promovendo ganhos de resistências nas primeiras idades. Influenciam ainda no aumento do pacote de finos, fazendo com que haja um aumento na densidade da pasta, dificultando a difusão de agentes agressivos e melhorando a zona de transição (BOSILJKOV, 2003).

Quanto mais fina forem as adições, menores serão os teores de substituição, por causa do aumento da frequência de contato entre elas em determinado volume, o que influencia no aumento da viscosidade e coesão das misturas (TUTIKIAN e MOLIN, 2008).

Existem diversas adições, mas para a sua escolha é necessário passar por uma análise técnica e econômica e também é fundamental que tenham áreas superficiais maiores que a do associado que vão substituir. Dessa forma se faz necessário conhecer os dois tipos de adições, que são classificadas de acordo com a sua ação físico-química. Segundo Khayat e De Schutter (2014), podem ser classificadas como quimicamente ativas e sem atividade química ou predominantemente reativas (A.P.R) e predominantemente inertes (A.P.I), respectivamente. As A.P.I. reagem fisicamente, proporcionando uma maior compacidade, entre elas estão: fíleres de calcário, quartzo e resíduo de serragem e mármore e granito. Já as A.P.R. reagem quimicamente com a pasta de cimento, são exemplos: pozolanas, cinza volante, sílica ativa e metacaulim. Os dois tipos de adições podem ser utilizados para a produção do CAA.

2.3.6. Aditivo Superplastificante

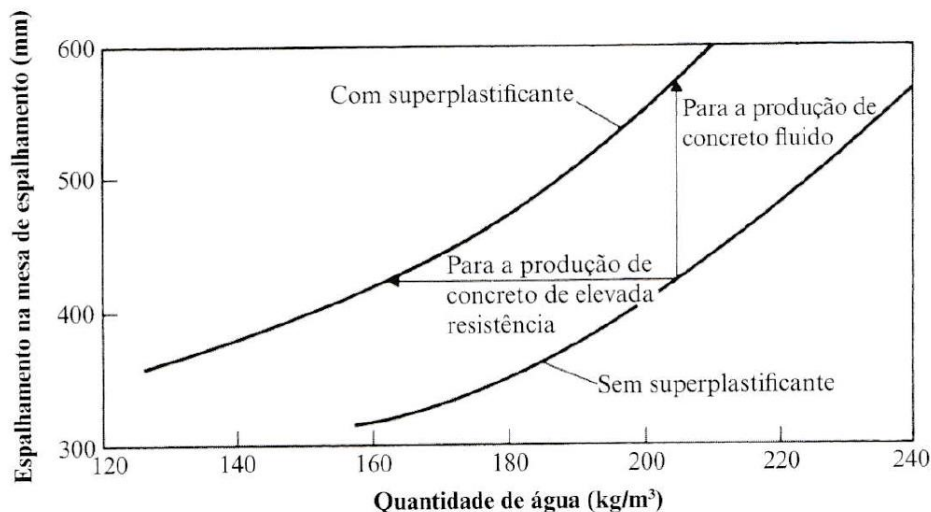
A NBR 11768:2011 define aditivo como o produto que, adicionado durante o processo de preparação do concreto, quantidade máxima de 5% da massa de material cimentício, modificam suas propriedades no estado fresco e/ou endurecido.

De acordo com Neville (2013), estes são o mais recente e eficiente tipo de aditivo redutor de água. Possíveis efeitos colaterais são amplamente reduzidos com o seu uso apesar de sua dosagem geralmente ser maior que os redutores de água convencionas.

Seu uso está voltado para produção de concretos fluídos, como o CAA. O concreto produzido é utilizado em situações nas quais é fundamental um lançamento rápido ou em lançamentos feitos em locais inacessíveis. Uma segunda utilização dos superplastificantes é na fabricação de concreto

de alta resistência com trabalhabilidade normal, pois esse necessita de uma baixa relação água/cimento (NEVILLE, 2013). A Figura 5 ilustra essas duas aplicações dos superplastificantes.

Figura 5 – Relação entre o espalhamento na mesa de espalhamento e relação quantidade de água no concreto produzido com e sem superplastificante. Fonte: A.M. Neville e J.J. Brooks (2013)

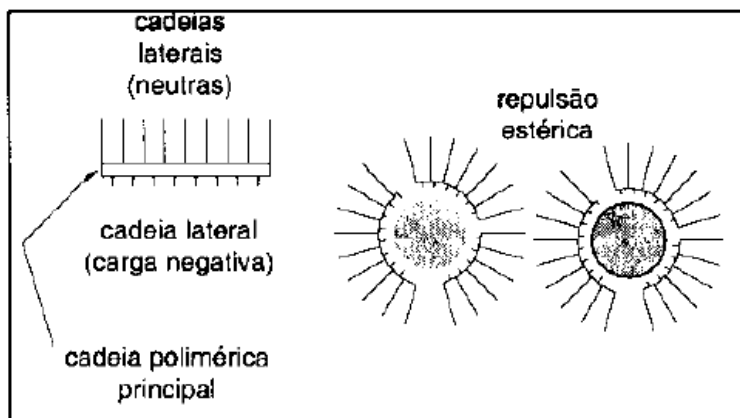


A ação do superplastificante à superfície das partículas de cimento faz com que elas se tornem carregada negativamente, fazendo com que elas mutuamente se repilam, dessa forma o cimento se dispersa, aumentando a consistência com uma baixa relação água/cimento. O concreto resultante é coeso e não sujeito à excessiva exsudação ou segregação e o teor de agregado miúdo é aumentado em 4 a 5%. Tem que se tomar as devidas precauções na confecção das fôrmas, pois o concreto autoadensável gera grande pressão hidrostática nas mesmas (NEVILLE, 2013).

A tecnologia dominante de aditivo superplastificante mais utilizado na produção do concreto autoadesável é a base de policarboxilato, 3ª geração. Seu mecanismo principal de ação é por repulsão estérica, produzida pela presença de uma extensa cadeia lateral ligada em vários pontos na cadeia central do polímero. Esta disposição causa forte efeito dispersante, pois o impedimento do entrelaçamento das cadeias laterais de diferentes moléculas de aditivos cria uma capa de adsorção de grande volume que impede a aproximação das partículas de cimento (HARTMANN; HELENE, 2003).

A Figura 6 ilustra o mecanismo de repulsão do aditivo a base de policarboxilato.

Figura 6 – Mecanismo de repulsão estérica para a cadeia de policarboxilato. Fonte: HARTMANN; HELENE. (2003)



A alta trabalhabilidade produzida tem uma curta duração, entre 30 e 90 minutos, depois desse intervalo de tempo a trabalhabilidade volta ao normal. Por esse motivo somente deve-se adicionar o superplastificante imediatamente antes do lançamento, quando o caminhão betoneira chegar ao local do lançamento (NEVILLE, 2013).

Os superplastificantes não atingem consideravelmente a pega do cimento, outras propriedades de longo prazo do concreto não são afetadas significativamente. Com isso Neville afirma que a única desvantagem real dos superplastificantes é o seu custo relativamente alto, que é proporcional ao custo de produção do superplastificantes, um produto de elevada massa molecular.

Tutikian (2007), afirmar que o valor comercial dos materiais utilizados para a confecção do CAA varia de local para local, e sabe-se, com raras exceções, que o custo do aditivo representa quase a totalidade do acréscimo de valor entre o CAA e o CCV. Então, deve-se, ao máximo, utilizar a menor dosagem possível de aditivo, a fim de se facilitar a viabilidade econômica do CAA.

2.4. Propriedades do CAA no estado fresco

De acordo com Gomes (2009), o comportamento no estado fresco do CAA exige misturas com alta fluidez e suficiente viscosidade e coesão entre os componentes, com o objetivo de obter um fluxo contínuo e homogêneo de toda a mistura, dessa forma ocupando todos os espaços de vazio da fôrma fluindo entre as armaduras ou obstáculos sem apresentar segregação.

No estado fresco o CAA apresenta características especiais que definem as principais propriedades de autoadensabilidade do CAA, são elas: habilidade de preenchimento, habilidade de passar entre

obstáculos e resistência à segregação. Essas propriedades estão inter-relacionadas. As respostas dos métodos de ensaio para uma propriedade são bastante afetadas pelas outras propriedades do concreto que está sendo testado.

Para verificar essas propriedades foram desenvolvidos procedimentos de ensaios que permitem qualificar e quantificar o comportamento dos CAA mediante técnicas que propiciam o controle de qualidade desses concretos. A seguir serão mostrados três tipos de ensaios, que foram realizados nessa pesquisa, permitindo verificar essas principais propriedades de autoadensabilidade do CAA. De acordo com a NBR 15823:2010 essas propriedades são requisitos de aceitação do concreto autoadensável no estado fresco.

2.4.1. Fluidéz do CAA

De acordo com Gomes (2009) a fluidez é a propriedade do concreto autoadensável de fluir e preencher todos os espaços da forma, sem interferência no fluxo, somente com a ação de seu peso próprio.

2.4.1.1. Ensaio de Espalhamento

O ensaio de espalhamento foi normalizado no Japão em 1990 (JSCE-F503, 1990). Ele é responsável por apurar se o concreto sob determinada força, provocada pelo seu peso, é capaz de se espalhar até atingir determinada dimensão em determinado tempo.

De acordo com a NBR 15823-2:2010 para a execução do ensaio, são necessários os seguintes equipamentos: Cone de Abrams (molde), conforme a ABNT NBR NM 67:1998, confeccionado em chapa metálica de 1,5 mm de espessura, e as dimensões conforme a Figura 7. Para apoio do molde, deve ser utilizada uma chapa metálica quadrada de no mínimo 900 mm de lado, com espessura de pelo menos 1,5 mm. Essa chapa deve ser provida de três marcações circulares centradas conforme mostra a Figura 7. Além desses materiais, para auxiliar no ensaio são necessários régua graduada, recipiente de pelo menos 10 L, complemento tronco-cônico, colher de pedreiro e cronômetro.

A amostra para realização do ensaio deve ser de acordo com o especificado pela ABNT NBR NM 33:1998. Na figura 8 é apresentado o ensaio de espalhamento realizado.

Figura 7 – Equipamentos do ensaio de espalhamento. Fonte: NBR 15823-2:2010

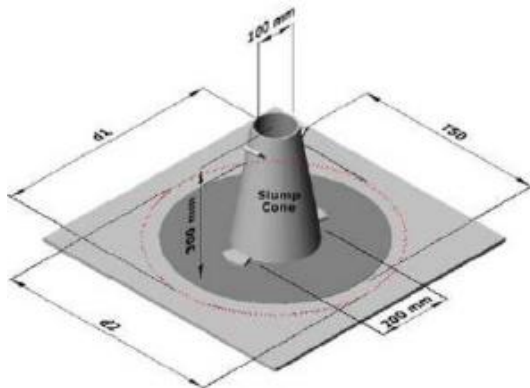


Figura 8 – Ensaio de espalhamento



A classificação do ensaio de espalhamento está estabelecida na Tabela 1 e de viscosidade plástica aparente na Tabela 2.

Tabela 1– Classe de espalhamento (slump-flow) e sua aplicação. Fonte: NBR 15823-1

Classe	Espalhamento (mm)	Aplicação	Exemplo	Método de ensaio
SF 1	550 a 650	-Estruturas não armados ou com baixa taxa de armadura e embutidos, cuja concretagem é realizada a partir do ponto mais alto com deslocamento livre. -Estruturas que exigem uma curta distância de espalhamento horizontal do concreto autoadensável. -Concreto autoadensável bombeado.	-Lajes -Estacas e certas fundações profundas -Revestimentos de túnel	ABNT NBR 15823-2
SF 2	660 a 750	Adequada para a maioria das aplicações correntes.	Paredes, vigas, pilares e outras	
SF 3	760 a 850	Estruturas com alta densidade de armadura e/ou de forma arquitetônica complexa, com o uso de concreto com agregado graúdo de pequenas dimensões (menores que 12,5 mm).	Pilares-parede Paredes-diafragma Pilares	

As classes de espalhamento são típicas para as aplicações apresentadas na Tabela 1.

Tabela 2 – Classe de viscosidade plástica aparente do CAA e sua aplicação. Fonte: NBR 15823-1

Classe	T ₅₀₀ (s)	Aplicação	Exemplo	Método de ensaio
VS 1	≤ 2	-Adequado para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, mas exige controle da exsudação e da segregação. -Concretagem realizadas a partir do ponto mais alto com deslocamento livre.	Lajes, paredes-diafragma, pilares-parede, indústria de pré-moldados e concreto aparente.	ABNT NBR 15823-2
VS 2	> 2	-Adequado para a maioria das aplicações correntes. Apresenta efeitos tixotrópicos que acarreta menor pressão sobre as fôrmas e melhor resistência à segregação. -Efeitos negativos podem ser obtidos com relação à superfície de acabamento (ar aprisionado), no preenchimento de cantos e suscetibilidade a interrupções ou demora entre sucessivas camadas.	Vigas, pilares e outras.	

A determinação da viscosidade plástica aparente do concreto é importante quando for demandado um bom acabamento superficial ou quando a densidade de armadura for significativa.

2.4.2. Habilidade passante do CAA

De acordo com Gomes (2009), a habilidade de passagem é a propriedade que caracteriza a capacidade do CAA de passar por entre obstáculos, como: armaduras, diminuições de seções e aberturas e seções estreitas, sem que haja obstrução do fluxo.

2.4.2.1. Ensaio da Caixa L

O ensaio com a caixa-L tem como finalidade analisar a capacidade de passagem do CAA. O ensaio tem como objetivo verificar se o concreto sob a força de seu próprio peso consegue passar por obstáculos, como armaduras, sem que ocorra bloqueio.

De acordo com a NBR 15823-4:2010 para a execução do ensaio, são necessários os seguintes equipamentos: Caixa de seção retangular com perfil em forma de L, confeccionada em chapa metálica com espessura mínima de 1,5 mm. Além da caixa L, para auxiliar no ensaio são necessária régua graduada, recipiente, colher de pedreiro.

A amostra para realização do ensaio deve ser de acordo com o especificado pela ABNT NBR NM 33:1998.

As Figuras 9 e 10 mostram como é medido o ensaio da caixa L.

Figura 9 – Caixa L. Fonte: NBR 15823-4:2010

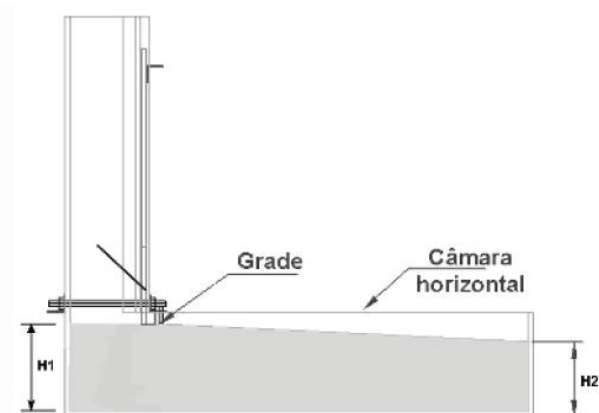


Figura 10 – Ensaio da caixa L



A classificação do ensaio da caixa L está estabelecida na Tabela 3.

Tabela 3 – Classe de habilidade passante caixa L e sua aplicação. Fonte: NBR 15823-1

Classe	Caixa L (H2/H1)	Aplicação	Exemplo	Método de ensaio
PL 1	$\geq 0,80$, com duas barras de aço	Adequada para elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 80 mm a 100 mm.	Lajes, painéis, elementos de fundação.	ABNT NBR 15823-4
PL 2	$\geq 0,80$, com três barras de aço	Adequada para a maioria das aplicações correntes. Elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 60 mm a 80 mm.	Vigas, pilares, tirantes, indústrias de pré-moldados.	

As classes de habilidade passante são típicas para as aplicações apresentadas na Tabela 3.

2.4.3. Resistência à segregação do CAA

A estabilidade ou a resistência à segregação é a propriedade que caracteriza a capacidade do CAA de evitar a segregação de seus componentes. Essa propriedade melhora a homogeneidade da mistura durante o transporte, o lançamento e o acabamento. (GOMES, 2009).

2.4.3.1. Ensaio do Funil V

O ensaio do Funil V foi desenvolvido na Universidade de Tóquio para simular a capacidade de passagem do CAA através do estreitamento de uma seção, apenas sob a ação de seu próprio peso.

Esse ensaio também é utilizado para verificar a presença de segregação, quando o concreto é impedido de escorrer pela saída do funil V.

Segundo a NBR 15823-1:2010 a realização do ensaio do anel J se torna dispensável quando é especificado a realização do ensaio do funil V.

De acordo com a NBR 15823-5:2010 para a execução do ensaio, são necessários os seguintes equipamentos: Funil V, deve ser confeccionado em chapa metálica com pelo menos 1,5 mm de espessura, em forma de funil de bases retangulares, suas dimensões são conforme a Figura 11. Além do Funil-V, para auxílio no ensaio são necessários recipiente de pelo menos 12 L, concha metálica, cronômetro e colher de pedreiro.

A amostra para realização do ensaio deve ser de acordo com o especificado pela ABNT NBR NM 33:1998. Na figura 12 é apresentado o ensaio do funil V sendo realizado.

Figura 11 – Funil V. Fonte: NBR 15823-5:2010

Figura 12 – Ensaio do funil V

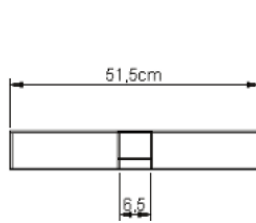


Figura 1a – Vista em planta

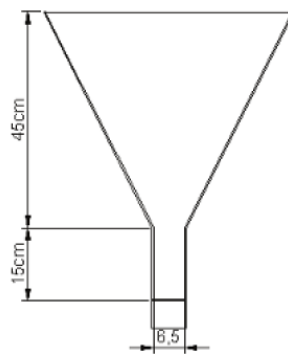


Figura 1b – Vista frontal



A classificação do ensaio está estabelecida na Tabela 4.

Tabela 4 – Classe de viscosidade plástica aparente do CAA e sua aplicação. Fonte: NBR 15823-1

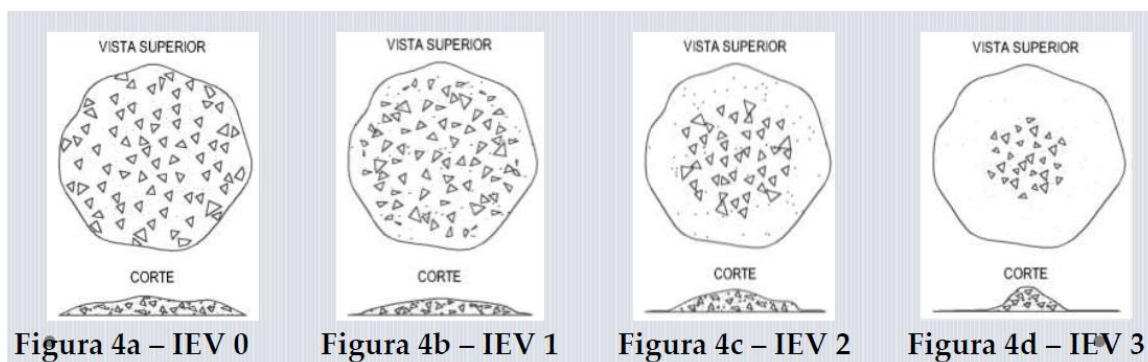
Classe	Funil V (s)	Aplicação	Exemplo	Método de ensaio
VF 1	<9	-Adequado para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, mas exige controle da exsudação e da segregação. -Concretagem realizadas a partir do ponto mais alto com deslocamento livre.	Lajes, paredes-diafragma, pilares-parede, indústria de pré-moldados e concreto aparente.	ABNT NBR 15823-5
VF 2	9 a 25	-Adequado para a maioria das aplicações correntes. Apresenta efeitos tixotrópicos que acarreta menor pressão sobre as fôrmas e melhor resistência à segregação. -Efeitos negativos podem ser obtidos com relação à superfície de acabamento (ar aprisionado), no preenchimento de cantos e suscetibilidade a interrupções ou demora entre sucessivas camadas.	Vigas, pilares e outras.	

As classes de viscosidade plástica aparente são típicas para as aplicações apresentadas na Tabela 4.

2.4.3.2. Índice de Estabilidade Visual

A NBR 15823 em todas as partes está em processo de revisão, um dos ensaios possíveis de serem implementados é a verificação da resistência à segregação por aspecto visual. A verificação visual é feita paralelamente a realização do ensaio de espalhamento, dessa forma é possível verificar se o agregado graúdo está acompanhando a pasta de cimento até a sua extremidade. A análise é feita a partir de fotos tiradas do ensaio de espalhamento após ser finalizado e essas são comparadas com imagens ilustrativas, disponíveis na NBR 15823-2 Revisada (Barbosa, 2016), que classificam a estabilidade do concreto. Na Figura 13 são apresentadas essas imagens com as suas respectivas classes.

Figura 13 – Classes do índice de estabilidade visual (IEV). Fonte: NBR 15823-2 Revisada (BARBOSA,2016).



A classificação do ensaio está estabelecida na Tabela 5.

Tabela 5 – Classes do índice de estabilidade visual (IEV). Fonte: NBR 15823-2 REVISADA.

Classe	IEV	Método de ensaio
IEV 0 (Altamente estável)	Sem evidência de segregação ou exsudação	ABNT NBR 15823-2 REVISADA
IEV 1 (Estável)	Sem evidência de segregação e leve exsudação	
IEV 2 (Instável)	Uma pequena auréola de argamassa ($\leq 10\text{mm}$) e/ou empilhamento de agregados no centro do concreto	
IEV 3 (Altamente instável)	Segregação claramente evidenciada pela concentração de agregados no centro do concreto ou pela dispersão de argamassa nas extremidades	

2.5. Propriedades mecânicas do CAA no estado endurecido

As propriedades mecânicas do concreto estão relacionadas com a capacidade de ele resistir a esforços mecânicos sem atingir a ruptura. O CAA se difere do CCV em suas propriedades no estado fresco, no estado endurecido suas propriedades são parecidas, mas para se produzir o concreto autoadensável é imprescindível a utilização de adições, menores valores de diâmetro máximo do agregado graúdo e uso de aditivo superplastificante. Estas mudanças podem alterar o desenvolvimento das propriedades mecânicas do concreto. (BENETTI, 2012).

Cavalcanti (2006), afirma que os benefícios do CAA devem ser atribuídos principalmente às suas propriedades no estado fresco, mas também as propriedades no estado endurecido devem ser pesquisadas de maneira cautelosa, assim o CAA pode ser aplicado da forma correta.

Dessa forma, nessa pesquisa pretende-se realizar no estado endurecido os ensaios de módulo de elasticidade, resistência à compressão simples axial e resistência à tração por compressão diametral, objetivando comparar seus resultados.

2.5.1. Resistência à compressão simples axial e resistência à tração por compressão diametral

Em virtude da facilidade de ser obtida, com ensaios acessíveis, a resistência do concreto é uma propriedade usualmente especificada em projetos estruturais, mais especificamente a resistência à compressão (MEHTA e MONTEIRO, 2008). A resistência do concreto é tradicionalmente caracterizada pelo valor aos 28 dias de idade.

A resistência depende de dois fatores fundamentais: a relação água/cimento e o grau de adensamento. A relação a/c define a porosidade da matriz do concreto. Quanto maior a quantidade de água vigente na pasta, maior é o afastamento das partículas do cimento, e, após a hidratação do mesmo, maior será a quantidade de poros existentes, reduzindo a resistência do concreto (HASTENPFLUG, 2007). O adensamento é a etapa que reduz e elimina os espaços de vazios no concreto, com a tecnologia do concreto autoadensável essa etapa é dispensada.

De acordo com De Schutter *et al.* (2008), o CAA produzido com a mesma relação água cimento que o concreto convencional obtém uma resistência maior ou igual que o concreto convencional. Esta tendência é observada em numerosas pesquisas de autores distintos, como Brooks (1999), Bosiljkov (2003), Tutikian (2004), Bonen e Shah (2005) e Rezende e Capuzzo (2016).

Bosiljkov (2003) afirmou que o aumento da resistência do CAA comparado ao CCV, pode ser atribuído à maior quantidade de finos. Ele fez a comparação entre traços de CAA contendo fíler calcário com relação de 0,43 e diferente finura e graduação e observou o aumento na resistência à compressão dos traços contendo fíler mais finos e com melhor distribuição granulométrica. Segundo ele, isto foi atribuído ao maior grau de hidratação do cimento e melhor empacotamento dos materiais cimentícios, melhorando a zona de transição. A resistência à compressão do concreto é medida em laboratório por um ensaio de compressão uniaxial, normatizado pela NBR 5739:2007.

O comportamento estudado para a resistência à compressão é semelhante ao verificado para resistência à tração, ou seja, o CAA produzido com a mesma relação água cimento que o CCV obtém uma resistência maior ou igual que o concreto convencional (DOMONE, 2007). A resistência à tração do concreto é medida em laboratório por dois métodos de ensaio. Nessa pesquisa será realizado somente a determinação da resistência à tração por compressão diametral, normatizado pela NBR 7222:2011.

De acordo com as estimativas proposta pela NBR 6118:2014 a resistência à tração indireta $f_{ct,sp}$ deve ser obtido por meio de ensaios, conforme NBR 7222: 2011, e a resistência à tração direta f_{ct} pode ser considerada igual a 0,9 $f_{ct,sp}$. Na falta de ensaio para a obtenção de $f_{ct,sp}$ este pode ser avaliado por meio de seu valor médio ou característico conforme equações 1, 2, 3 e 4.

$$f_{ct,m} = 0,3 f_{ck}^{2/3}, \text{ para concretos de classes até C50} \quad \text{Eq. (1)}$$

$$f_{ct,m} = 2,12 \ln(1 + 0,11f_{ck}), \text{ para concretos de classes C55 até C90} \quad \text{Eq. (2)}$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7f_{ct,m} \quad \text{Eq. (3)}$$

$$f_{ctk,sup} = 1,3f_{ct,m} \quad \text{Eq. (4)}$$

Sendo: f_{ck} = resistência característica à compressão do concreto; $f_{ct,m}$ = resistência média à tração do concreto; $f_{ctk,inf}$ = resistência característica à tração do concreto, inferior; $f_{ctk,sup}$ = resistência característica à tração do concreto, superior.

2.5.2. Módulo de elasticidade

O módulo estático de elasticidade à compressão, NBR 8522:2008, de um material é dado pela declividade da curva tensão/deformação. Ele aumenta com a resistência à compressão do concreto, de acordo com L.Cabral *et al.* (2008) essa característica se origina da associação do comportamento de tensão-deformação dos três componentes do concreto (agregado, matriz da pasta de cimento e zona de transição na interface) com as suas resistências individuais, as quais estão afiliadas à resistência última do concreto. No entanto a massa específica, a fração volumétrica e o módulo de deformação dos principais componentes, além das características da zona de transição do compósito definem o comportamento elástico do concreto, que é um material heterogêneo.

Diversos estudos sobre CAA foram e estão sendo executados com diferentes focos de questionamento. Galán *et al* (2015) ao estudar o CAA comparou os valores experimentais do módulo de elasticidade em função da resistência à compressão com as estimativas de diferentes normas. Verificaram que a relação entre o módulo de deformação e a resistência à compressão independe da idade e que os valores experimentais são coerentes com os valores teóricos.

Apesar dos traços do concreto autoadensável empregar os mesmos materiais que os traços do concreto convencional, é imprescindível que seja feita algumas alterações em sua composição, por exemplo, o incremento de adição mineral com granulometria muito fina e a utilização do aditivo superplastificante. Dessa forma, devido à maior quantidade adições, associada à menor quantidade de agregados graúdos, esperam-se valores mais baixos para o módulo de elasticidade do CAA (HOLSHMACHER, 2004). A ACI recomenda um diâmetro de 12 mm para o agregado graúdo. Vários ensaios e pesquisas que foram feitas comparando concretos de mesma resistência obtiveram

resultados do módulo de elasticidade da maioria dos traços de CAA mais baixo que o de um CCV de mesma relação a/c.

Conforme a NBR 6118:2014 o módulo de elasticidade E_{ci} deve ser obtido experimentalmente segundo a NBR 8522:2008, sendo este o módulo de deformação tangencial inicial obtido aos 28 dias de idade. Quando não for realizado o ensaio este pode ser estimado conforme equações 5 e 6. O módulo de deformação secante E_{cs} pode ser obtido experimentalmente conforme NBR 8522:2008 ou estimado conforme equações 7 e 8. O módulo de elasticidade em uma idade menor que 28 dias pode ser avaliado conforme equações 9 e 10.

$$E_{ci} = \alpha_E 5600 \sqrt{f_{ck}}, \text{ para } f_{ck} \text{ de 20 MPa a 50 MPa} \quad \text{Eq (5)}$$

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \alpha_E \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{1/3}, \text{ para } f_{ck} \text{ de 55 MPa a 90 MPa} \quad \text{Eq (6)}$$

$$E_{cs} = \alpha_i E_{ci} \quad \text{Eq (7)}$$

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \frac{f_{ck}}{80} \leq 1,0 \quad \text{Eq (8)}$$

$$E_{ci}(t) = \left[\frac{f_c(t)}{f_c} \right]^{0,5} E_{ci}, \text{ para os concretos com } f_{ck} \text{ de 20 MPa a 45 MPa} \quad \text{Eq (9)}$$

$$E_{ci}(t) = \left[\frac{f_c(t)}{f_c} \right]^{0,3} E_{ci}, \text{ para os concretos com } f_{ck} \text{ de 50 MPa a 90 MPa} \quad \text{Eq (10)}$$

Sendo: $\alpha_E = 1,0$ para granito e gnaise; E_{ci} = módulo de elasticidade inicial; $E_{ci}(t)$ = módulo de elasticidade do concreto em uma idade entre 7 e 28 dias; E_{cs} = módulo de deformação secante; $f_c(t)$ = resistência à compressão do concreto na idade que se pretende estimar o módulo de elasticidade; f_c = resistência à compressão do concreto aos 28 dias de idade.

3. METODOLOGIA

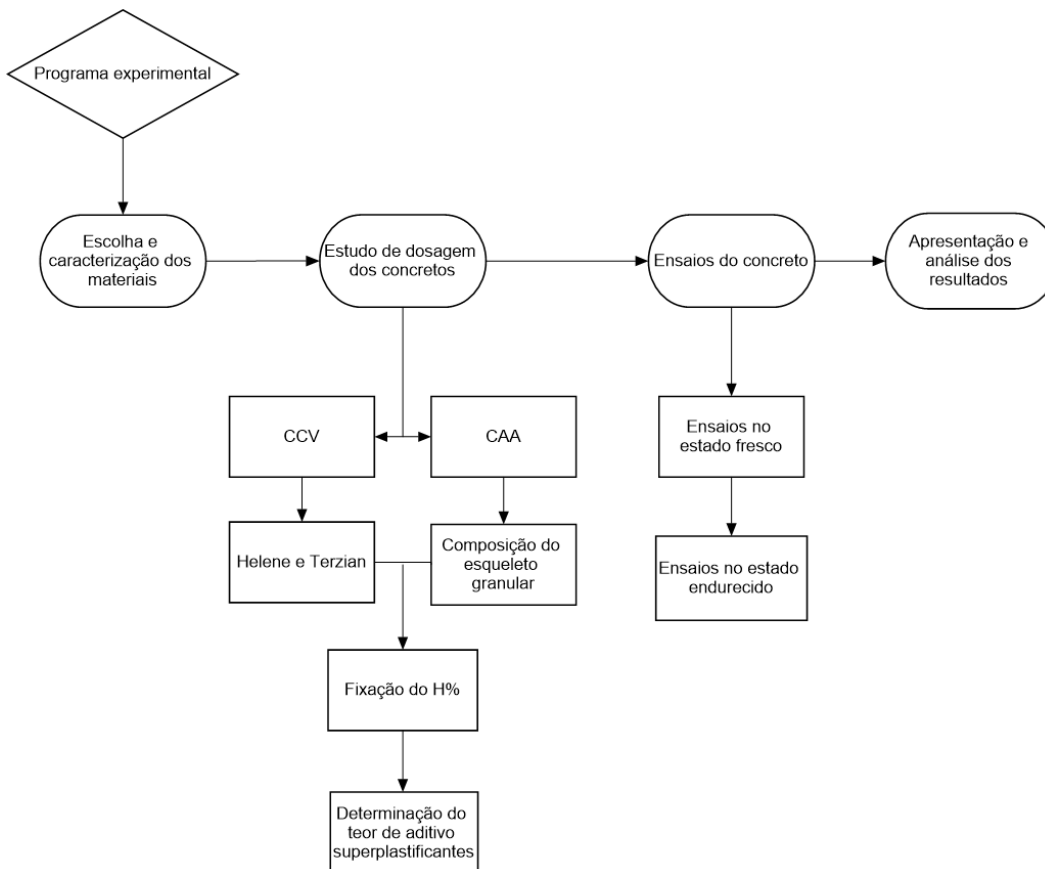
3.1. Programa experimental

No programa experimental, realizado no Laboratório de Ensaio de Materiais da UnB (LEM – UnB), foram efetivados: a caracterização dos materiais, o estudo de dosagem dos diferentes tipos de concretos, os ensaios dos concretos no estado fresco e endurecido.

Na análise dos resultados foram comparados os concretos fabricados com diferentes agregados miúdos, para concluir qual dosagem proporciona um melhor desempenho nas propriedades mecânicas dos concretos produzidos.

A Figura 14 exibe o fluxograma do programa experimental que foi seguido nessa pesquisa.

Figura 14 – Fluxograma do programa experimental realizado nesta pesquisa



Em seguida, será especificado cada um dos passos que foram aplicados, a fim de se concluir o programa experimental.

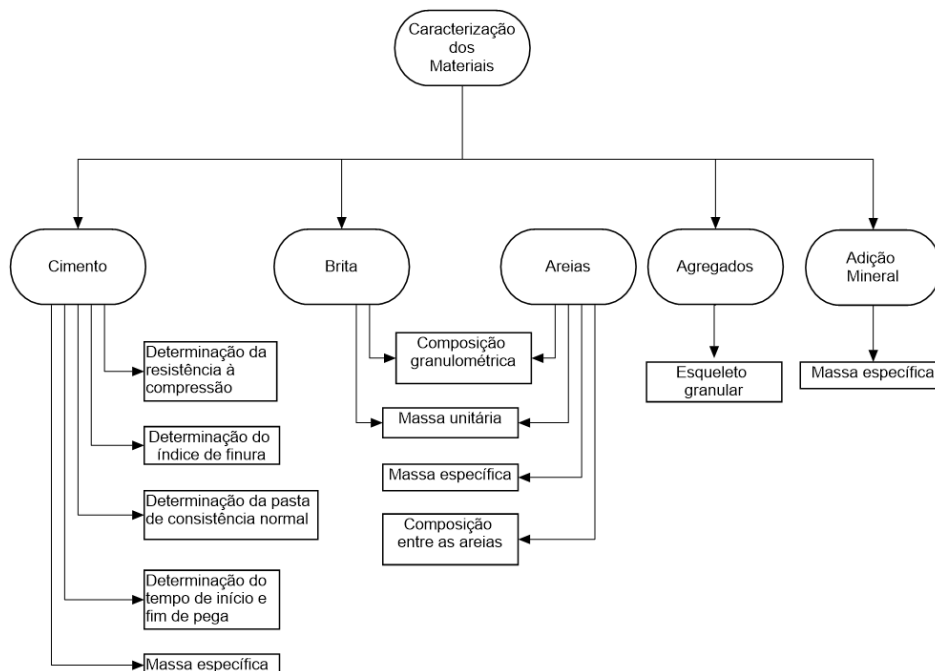
3.2. Escolha e caracterização dos materiais

Primeiramente escolheu-se materiais para a produção dos concretos. Foram utilizados materiais disponíveis na região de Brasília-DF.

O cimento Portland empregado foi o CP II – Z 32 RS, pois seu uso é indicado para aplicações gerais e representa 70% dos cimentos comercializados. Foram usados três tipos de agregado miúdo, areia britada, areia natural (módulo de finura=2,36) e areia natural (módulo de finura=1,27), para quatro diferentes concretos, um CCV e três CAA. O agregado graúdo empregado em todos os concretos foi a brita diâmetro máximo 12,5 mm . O fino utilizado foi o filer calcário, material não pozolânico que proporciona melhora na coesão e ameniza o efeito da segregação, utilizado somente na produção dos concretos autoadensáveis. O aditivo superplastificante empregado para se obter os requisitos de aceitação do concreto autoadensável no estado fresco de acordo com a NBR 15823:2010, é a base de policarboxilato, pois é o tipo de superplastificante mais utilizado no mercado.

Depois de escolhido os materiais utilizados na fabricação dos concretos, foi feita a caracterização dos mesmos, como apresentado no fluxograma da Figura 15.

Figura 15 – Fluxograma da caracterização dos materiais realizados



Na Tabela 6 são apresentadas as respectivas normas seguidas para cada ensaio.

Tabela 6 – Resumo dos ensaios de caracterização dos materiais realizados

Material	Ensaio	Normas
Cimento	Determinação da resistência à compressão	NBR 7215:2009
	Determinação do índice de finura	NBR 11579:2012
	Determinação da pasta de consistência normal	NBR NM 43:2003
	Determinação do tempo de início e fim de pega	NBR NM 65:2003
	Massa específica	NBR NM 23:2001
Brita	Composição granulométrica	NBR NM 248:2003
	Massa unitária	NBR NM 45:2006
Areias	Composição granulométrica	NBR NM 248:2003
	Massa específica	NBR NM 52:2009
	Massa unitária	NBR NM 45:2006
	Composição entre as areias	NBR NM 45:2006
Agregados	Esqueleto granular	NBR NM 45:2006
Adição mineral	Massa específica	NBR NM 23:2001

A adição mineral só foi realizada na dosagem do concreto autoadensável e constituiu o esqueleto granular.

3.3. Estudo de dosagem dos concretos

Para a dosagem dos concretos foram adotados os critérios de Helene e Terzian (1992) na confecção do CCV, onde foi feita a composição granulométrica entre os agregados miúdos areia britada e areia natural (módulo de finura=1,27). Para o CAA foi realizado a composição do esqueleto granular que consiste em determinar, por meio do ensaio de massa unitária no estado compactado, a mistura de diferentes materiais com o maior valor de massa unitária e conseqüentemente menor índice de vazios. Iniciou-se a combinação entre os agregados de maior granulometria até chegar a adição mineral, finalizando o empacotamento.

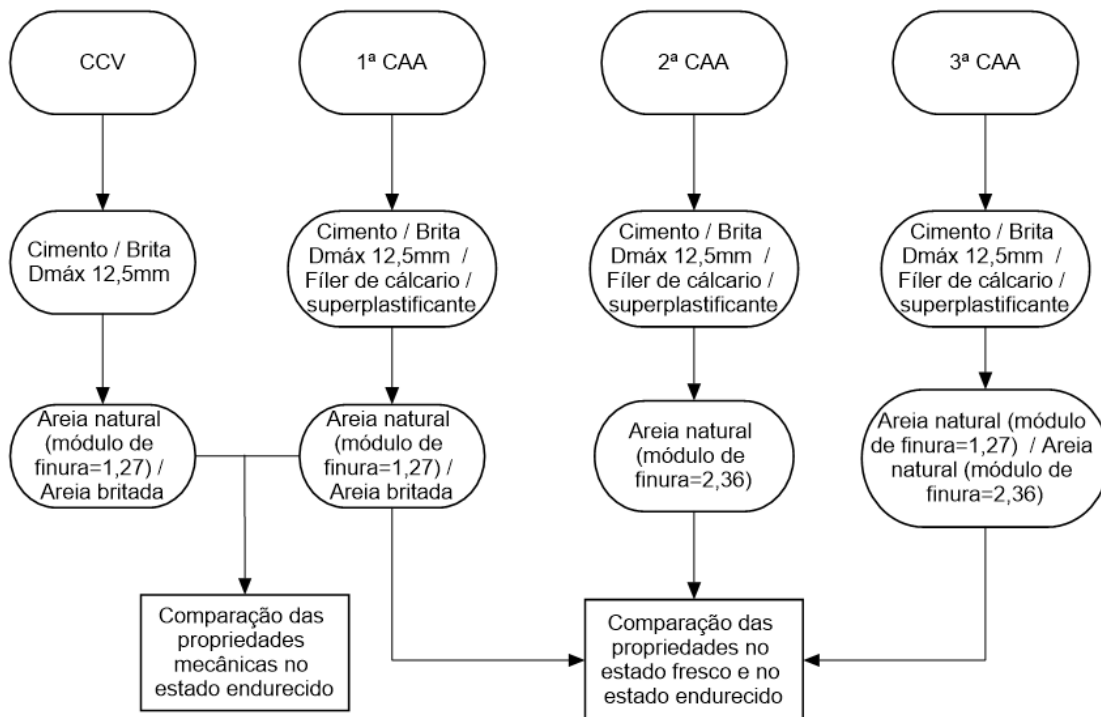
O esqueleto granular obtido, 1ª CAA, foi fixado para todas as proporções modificando os agregados miúdos em cada traço. O 1ª CAA foi composto por brita diâmetro máximo 12,5 mm , areia britada, areia natural (módulo de finura=1,27) e fíler calcário. O 2ª CAA com o uso de brita diâmetro máximo 12,5 mm , areia natural (módulo de finura=2,36) e fíler calcário. Os materiais empregados no 3ª CAA foram a brita diâmetro máximo 12,5 mm , a areia natural (módulo de finura=2,36), a areia natural (módulo de finura=1,27) e o fíler calcário.

Inicialmente para comparação, foi proposto produzir somente dois tipos de concretos autoadensáveis. Apesar de ter sido fixado a proporção do 1ª esqueleto granular para a produção do 2ª CAA, por motivo de curiosidade, foi feito o empacotamento dos materiais para a produção do 2ª CAA, que por coincidência apresentou a mesma proporção já fixada. O concreto produzido apresentou mau comportamento nas suas propriedades no estado fresco, pois possuía pouca composição de finos tornando-se propício à segregação. Decidiu-se, então, produzir um terceiro concreto autoadensável. Se faz necessário frisar que para este manteve-se a proporção do esqueleto granular obtido para o 1ª concreto autoadensável, substituindo a areia britada pela areia natural (módulo de finura=2,36) utilizada no 2ª CAA.

Os traços dosados para o CCV e para o 1ª CAA foram 1:3,5; 1:5,0 e 1:6,5; para o 2ª CAA foi realizado somente o traço 1:5,0, pois como o mesmo apresentou baixa resistência à segregação optou-se por não continuar os estudos com esse traço. Para o 3ª CAA foram realizados os traços 1:3,5; 1:5,0. O traço 1:6,5 não foi possível ser produzido, pois a brita diâmetro máximo 12,5 mm utilizada na produção dos concretos esgotou.

O fluxograma da Figura 16 apresenta cada concreto produzido, com os seus respectivos materiais.

Figura 16 – Fluxograma dos concretos dosados



Com o objetivo de tornar os concretos comparativos, para cada traço foi fixado a relação água/materiais secos (H). O valor da relação água/cimento e quantidade de superplastificante foi obtida de forma experimental, utilizando respectivamente o ensaio de abatimento do tronco de cone e os ensaios no estado fresco do CAA recomendados pela NBR 15823:2010.

3.4. Ensaios do concreto

No estado fresco foram realizados os ensaios de massa específica e abatimento do tronco de cone, *slump* teste fixado em 100 ± 10 mm, para o concreto convencional. Enquanto para o concreto autoadensável foram realizados os ensaios de massa específica, espalhamento, caixa L, funil V e índice de estabilidade visual.

No estado endurecido foram realizados os ensaios de módulo de elasticidade, resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral para todos os concretos.

O fluxograma da Figura 17 ilustra a sequência desses ensaios. Na Tabela 7 são apresentadas as respectivas normas seguidas para cada ensaio.

Figura 17 – Fluxograma dos ensaios realizados para os concretos CAA e CCV

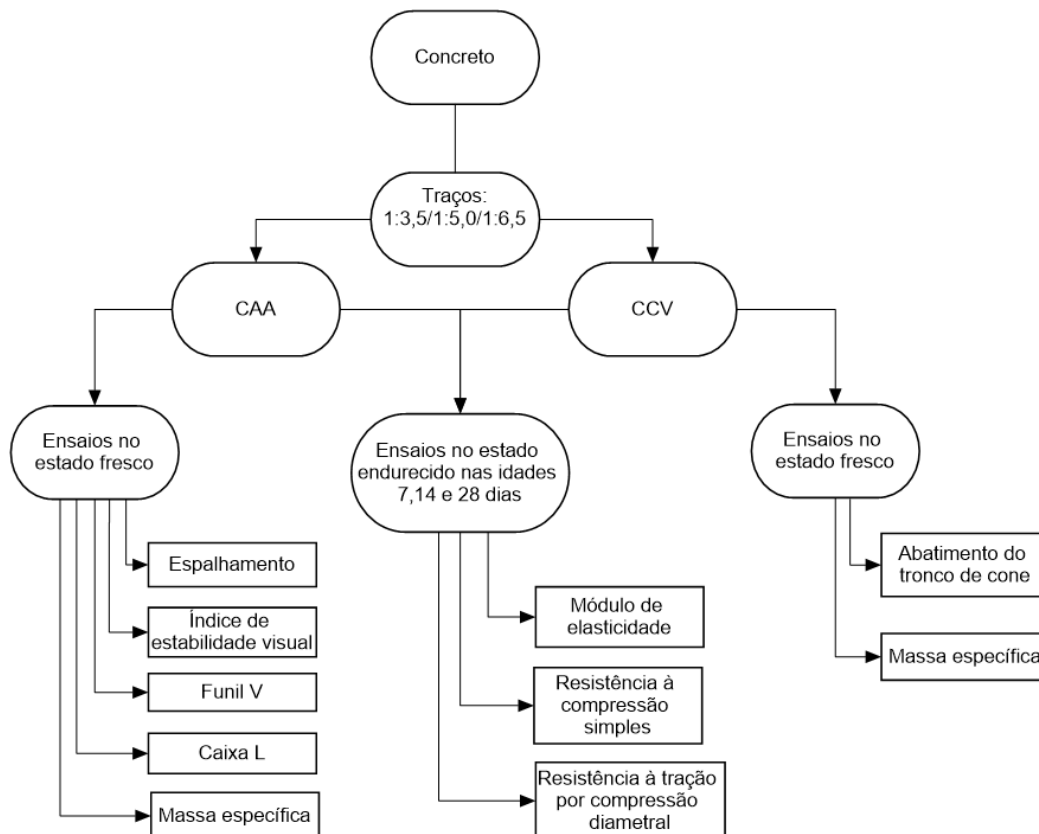


Tabela 7 – Resumo dos ensaios realizados nos concretos

Material	Ensaio	Normas
Concreto	Espalhamento	NBR 15823-2:2010
	Índice de estabilidade visual	NBR 15823-2 Revisada
	Funil V	NBR15823-5:2010
	Caixa L	NBR15823-4:2010
	Massa específica	Helene e Terzian (1992)
	Módulo de elasticidade	NBR 8522:2008
	Resistência à compressão simples	NBR 5739:2007
	Resistência à tração por compressão diametral	NBR 7222:2011

3.4.1. Ensaio do CAA no estado fresco

Durante a mistura dos traços se faz necessário executar os ensaios exclusivos para se avaliar as propriedades especiais do CAA no estado fresco. É importante que o processo seja feito o mais rápido possível, pois o aditivo detém um tempo de trabalho limitado dependente das condições ambientais e dos materiais utilizados na dosagem do concreto. A seguir será detalhado os procedimentos feitos para a realização dos ensaios do CAA no estado fresco. Foi considerado necessário detalhar somente os ensaios no estado fresco realizados para os CAA, pois não são usuais e para muitos pesquisadores são inéditos.

3.4.1.1. Espalhamento e T₅₀₀

A determinação da fluidez do CAA foi obtida com a realização do ensaio de espalhamento, os ensaios foram realizados seguindo as suas respectivas normas. De acordo com a NBR 15823-2:2010 o procedimento do ensaio segue as seguintes etapas: deve-se preencher o molde sem adensar, de forma contínua e uniforme, após finalizar o preenchimento a desmoldagem é efetuada levantando-se cuidadosamente o molde pelas alças, na direção vertical, com velocidade constante e uniforme, em tempo não superior a 5 segundos. Todo o processo deve ser realizado em tempo não superior a 1 min. Simultaneamente ao início do levantamento do cone, o cronômetro é acionado. Quando o concreto atinge a marca circular feita na placa, com diâmetro de 500 mm, o cronômetro é parado e o tempo, registrado. Esse tempo é denominado tempo de fluxo T₅₀₀. Cessado o espalhamento do concreto, medem-se, com uma régua, dois diâmetros perpendiculares (d1 e d2) e calcula-se a média desses, que é denominado diâmetro final de espalhamento (D_{final}).

3.4.1.2. Caixa L

A determinação da habilidade passante do CAA foi obtida através do ensaio da caixa L, o ensaio foi realizado seguindo a sua respectiva norma. De acordo com a NBR 15823-4:2010 o procedimento do ensaio segue as seguintes etapas: a caixa L deve ser nivelada em uma superfície plana, a câmara vertical da caixa L deve ser preenchida totalmente de forma uniforme e sem adensamento. Após 30 a 60 segundos do final do preenchimento da câmara vertical, deve ser efetuada a abertura da comporta de forma rápida, uniforme e sem interrupção, permitindo escoamento do concreto para a câmara horizontal. Quando o concreto cessa o movimento, é medida sua altura no final do trecho horizontal (H_2) e a altura do concreto remanescente do trecho vertical (H_1) da caixa L. Com esses resultados é feita uma relação (RB) entre as duas alturas, conforme a Equação (11), e essa relação tem que ser $\geq 0,80$.

$$RB = \frac{H_2}{H_1} \quad \text{Eq. (11)}$$

3.4.1.3. Funil V

A obtenção da resistência à segregação do CAA foi obtida utilizando o ensaio do funil V, o ensaio foi realizado seguindo a sua respectiva norma. De acordo com a NBR 15823-5:2010 o procedimento do ensaio do funil V segue os seguintes passos: O Funil V deve ser apoiado em uma superfície rígida, plana e horizontal. Ele deve ser preenchido totalmente, de forma uniforme, sem adensamento e sem interrupções. O recipiente deve ser posicionado sob o funil para coleta de concreto. A abertura da comporta deve ser efetuada em um tempo não superior a 30 segundos após o final de seu preenchimento. O cronômetro deve ser acionado simultaneamente à abertura da comporta e parado quando todo o concreto houver escoado. O intervalo de tempo para escoamento completo da massa do concreto ($T_{30\text{seg}}$) deve ser registrado. Em casos especiais pode ser efetuada a medida do tempo de escoamento do concreto após 5 min do preenchimento do funil V ($T_{5\text{min}}$). Imediatamente após o $T_{30\text{seg}}$ o funil deve ser novamente preenchido com o concreto coletado, a comporta deve ser aberta 5 min após o preenchimento, sendo registrado o intervalo de tempo para escoamento total da massa de concreto.

3.4.1.4. Índice de Estabilidade Visual

A NBR 15823 encontra-se em processo de revisão e a Comissão de Estudos está propondo o ensaio índice de estabilidade visual para avaliar a resistência à segregação do concreto autoadensável. A inspeção visual foi realizada paralelamente ao ensaio de espalhamento, onde ao final do experimento foi feita uma série de fotos para serem analisadas, desse modo podendo determinar se o concreto autoadensável segregou ou não.

Ao final destas etapas moldou-se os corpos de prova, para determinar as propriedades mecânicas, de acordo com a NBR 5738:2008, exceto o prescrito na Seção 6 e em 7.4, pois os mesmos são moldados sem adensamento manual ou mecânico.

3.4.2. Ensaio no estado endurecido

Depois da moldagem e da cura dos corpos de prova, foram feitos os ensaios mecânicos de resistência à compressão simples axial segundo a NBR 5739:2007, resistência à tração por compressão diametral de acordo com a NBR 7222:2011 e módulo de elasticidade segundo a NBR 8522:2008. Os corpos de prova foram curados em câmara úmida até a data do ensaio. Todos os ensaios foram realizados nas idades de 7, 14 e 28 dias exceto o ensaio do módulo de elasticidade do 2ª CAA e do 3ª CAA. Foi observado que o valor do módulo de elasticidade do CCV e do 1ª CAA nas idade de 7 e 14 dias apresentaram uma diferença de resultados muito pequena em relação aos 28 dias de idade, dessa forma para essa pesquisa concluiu-se que era necessário ser realizado somente aos 28 dias de idade.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados na pesquisa conforme descrito no programa experimental. As determinações da dosagem dos traços dos concretos estão apresentadas nos Anexos.

4.1. Caracterização dos materiais

A Tabela 8 apresenta os ensaios de caracterização dos materiais realizados com os seus respectivos resultados obtidos.

Tabela 8 – Resultado dos ensaios de caracterização dos materiais

Material	Ensaio	Resultado
CP II – Z 32 RS	Determinação da resistência à compressão	7 dias = 30,7 MPa
		14 dias = 34,2 MPa
		28 dias = 35,8 MPa
	Determinação do índice de finura	1,3%
	Determinação da pasta de consistência normal	a/c=0,296
	Determinação do tempo de início e fim de pega	Início de pega: 2h e 8 min Fim de pega: 2h e 47 min
Massa específica	3,076 g/cm ³	
Fíler calcário	Massa específica	2,857 g/cm ³
Brita diâmetro máximo 12,5 mm	Composição granulométrica	Diâmetro máximo = 12,5 mm Módulo de finura = 6,04
	Massa unitária	1,37 Kg/dm ³
Areia britada	Composição granulométrica	Diâmetro máximo = 2,36 mm Módulo de finura = 3,25
	Massa específica	2,72 g/cm ³
	Massa unitária	1,58 Kg/dm ³
Areia natural (módulo de finura=1,27)	Composição granulométrica	Diâmetro máximo = 0,6 mm Módulo de finura = 1,27
	Massa específica	2,62 g/cm ³
	Massa unitária	1,29 Kg/dm ³
Areias	Composição entre areia britada e areia natural (módulo de finura=1,27), utilizada no CCV	75% / 25%
Areia natural (módulo de finura=2,36)	Composição granulométrica	Diâmetro máximo = 2,4 mm Módulo de finura = 2,36
	Massa específica	2,65 g/cm ³
	Massa unitária	1,58 kg/dm ³

Na Figura 18 e na Figura 19 (A,B,C e D) são apresentados os gráficos referentes aos ensaios de composição granulométrica da brita diâmetro máximo 12,5 mm, da areia britada, das areias naturais e da composição entre a areia britada e areia natural (módulo de finura=1,27).

Figura 18– Composição granulométrica brita diâmetro máximo 12,5 mm

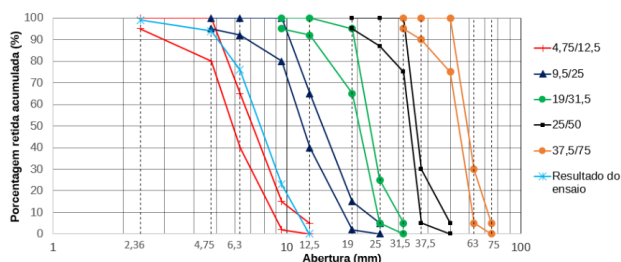
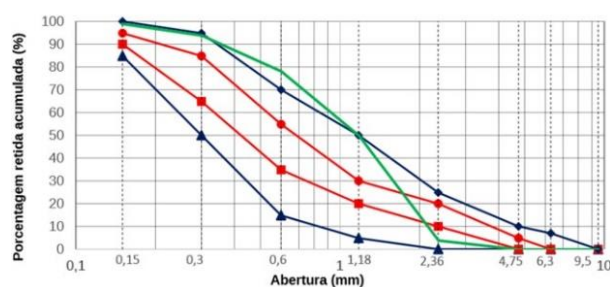
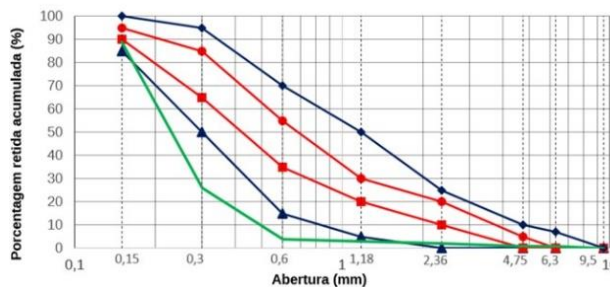


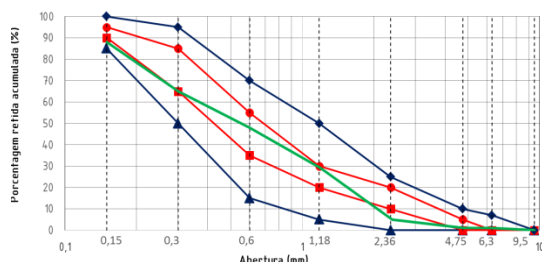
Figura 19 – (A) areia britada, (B) Areia natural (módulo de finura=1,27), (C) Areia natural (módulo de finura=2,36) e (D) composição entre a areia britada e a Areia natural (módulo de finura=1,27)



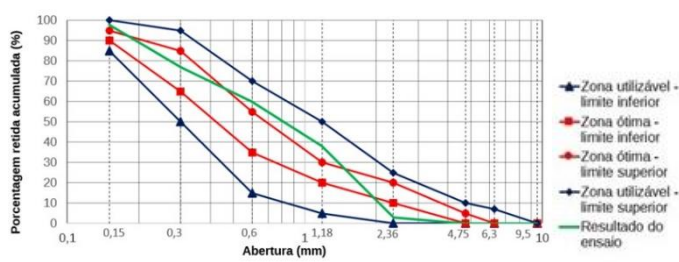
(A)



(B)



(C)



(D)

Ao analisar o gráfico da Figura 18 observa-se que a brita diâmetro máximo 12,5 mm possui uma boa distribuição granulométrica. Na Figura 19 (C) observa-se que a areia natural (módulo de finura=2,36) possui uma distribuição granulométrica que se encaixa dentro da zona utilizável, entretanto, em alguns pontos ele se desviou da zona ótima de utilização nos limites inferiores, apesar disso é um material apropriado para a produção de concreto.

Ao observar os gráficos da Figura 19 (A,B e D) verifica-se que tanto a areia natural (módulo de finura=1,27) quanto a britada possuem uma distribuição granulométrica que se encaixam fora da zona utilizável estabelecida por norma. Ao realizar o ensaio de composição entre os dois materiais

obteve o maior valor de massa unitária para a proporção de 75% da areia britada e de 25% de areia natural (módulo de finura=1,27), sendo esta a composição adotada para a confecção do concreto convencional. Observa-se que o material composto fica dentro da zona utilizável, ilustrando a importância da composição dos materiais para a obtenção do esqueleto granular.

4.2. Determinação dos traços dos concretos

Após feito o ensaio de massa unitária no estado compactado, a proporção que se chegou para o esqueleto granular do 1ª CAA foi: 0,34 de brita diâmetro máximo 12,5 mm; 0,34 de areia britada; 0,17 de areia natural (módulo de finura=1,27) e 0,15 de fíler calcário. O esqueleto granular obtido para o 2ª CAA foi: 0,34 de brita diâmetro máximo 12,5 mm; 0,51 de areia natural (módulo de finura=2,36) e 0,15 de fíler calcário. Observa-se que para efeito de comparação foi mantida a proporção dos agregados graúdos e miúdos. Para a determinação dos traços do 3ª concreto autoadensável, a mesma proporção dos materiais do esqueleto granular obtida no 1ª concreto autoadensável foi mantida, fazendo-se a substituição da areia britada por uma areia natural com o módulo de finura de 2,36.

Na tabela 9 são apresentados os traços do concreto convencional (CCV), do 1ª concreto autoadensável (1ª CAA), do 2ª concreto autoadensável (2ª CAA) e do 3ª concreto autoadensável (3ª CAA).

Tabela 9 – Traços dos concretos convencional (CCV) e autoadensável (CAA)

Concreto	Traço 1 : m	Traço 1 : f : a _{n-} : a _b : p : a/c	SP (%)	H (%)	Massa específica (kg/m ³)	C (kg/m ³)
CCV	1:3,5	1:0,37:1,11:2,02:0,47	0	10,44	2373,3	477,5
	1:5,0	1:0,575:1,725:2,70:0,60	0	10	2357,9	357,3
	1:6,5	1:0,78:2,35:3,37:0,78	0	10,40	2350,2	283,7
1ª CAA	1:3,5	1:0,525:0,595:1,19:1,19:0,47	1	10,44	2367,0	476,3
	1:5,0	1:0,75:0,85:1,70:1,70:0,60	1	10	2348,8	355,9
	1:6,5	1:0,975:1,105:2,21:2,21:0,78	1,15	10,40	2354,4	284,4
Concreto	Traço 1 : m	Traço 1 : f : a _{n-} : a _{n+} : p : a/c	SP (%)	H (%)	Massa específica (kg/m ³)	C (kg/m ³)
2ª CAA	1:5,0	1:0,75:2,55:1,7:0,6	0,67	10	2311,6	350,2
3ª CAA	1:3,5	1:0,525:0,595:1,19:1,19:0,47	0,83	10,44	2365,6	476,0
	1:5,0	1:0,75:0,85:1,7:1,7:0,60	0,67	10	2522,1	382,14

f = fíler calcário, utilizado apenas no CAA; a_{n-} = Areia natural (módulo de finura=1,27); a_{n+} = Areia natural (módulo de finura=2,36); a_b = areia britada; p = agregado graúdo; SP = superplastificante; H = relação água/materiais secos e C = consumo de cimento.

O consumo de cimento (C) foi determinado experimentalmente através da massa específica do concreto. Analisando a Tabela 9, observa-se, como proposto, que a relação água material seco foi mantida a mesma entre cada traço para os diferentes tipos de concretos produzidos, dessa forma a relação água cimento obtida na produção do CCV foi utilizada na dosagem dos concretos autoadensável. A fim de obter as propriedades esperadas do CAA no estado fresco, o ajuste foi realizado na quantidade de superplastificante. O aditivo superplastificante foi utilizado somente na produção dos concretos autoadensável.

Pode-se observar que o consumo de cimento entre cada traço para os diferentes tipos de concreto foi semelhante, dessa forma para efeito de comparação foi possível manter o maior número de variáveis possíveis entre os diferentes tipos de concretos.

4.3. Propriedades do CAA no estado fresco

Na Tabela 10 são apresentados os resultados dos ensaios dos concretos autoadensável no estado fresco.

Tabela 10 – Resultado dos ensaios dos CAA no estado fresco

Concreto	Traço 1:m	Espalhamento (mm)	T ₅₀₀ (seg)	Funil V (seg)		Caixa L (H ₂ /H ₁)	Classe
				T _{30seg}	T _{5min}		
1ª CAA	1:3,5	580	3,73	6,85	9,67	0,8	SF1/VS2/VF1/PL2
	1:5,0	748	2	6,30	7,20	1,0	SF2/VS1/VF1/PL2
	1:6,5	750	1,85	4,41	5,54	0,9	SF2/VS1/VF1/PL2
2ª CAA	1:5,0	620	2,57	10,52	11,05	0,8	SF1/VS2/VF2/PL2
3ª CAA	1:3,5	698	2,39	8,64	10,30	0,9	SF2/VS2/VF1/PL2
	1:5,0	680	2,24	9,82	10,33	0,8	SF2/VS2/VF2/PL2
Critérios NBR 15823-1:2010		SF1 – 550 a 650 mm SF2 – 660 a 750 mm SF3 – 760 a 850 mm	VS1 ≤ 2 s VS2 > 2 s	VF1 < 9 s VF2 – 9 a 25 s	PL1 ≥ 0,80 – duas barras de aço PL2 ≥ 0,80 - três barras de aço		

Os ensaios de espalhamento, viscosidade e habilidade passante são requisitos de aceitação do concreto autoadensável no estado fresco de acordo com a NBR 15823:2010. Conforme os resultados apresentados na Tabela 10 verifica-se que todos os concretos produzidos atendem aos critérios de um autoadensável. O ensaio na caixa L foi realizado utilizando três barras de aço, situação considerada mais crítica para medir a habilidade passante do concreto.

Avaliando o espalhamento dos concretos observa-se que os traços 1:3,5 do 1ª CAA e o 1:5,0 do 2ª CAA estão na classe SF 1, que tem como aplicação estruturas com baixa taxa de armadura e embutidos. Apesar do baixo valor do espalhamento, ao analisar os resultados da caixa L, utilizando três barras, os dois concretos cumpriram o requisito de aprovação de habilidade passante proposto pela NBR 15823:2010 sendo classificados como PL2, adequado para a maioria das aplicações correntes. Medindo a viscosidade nota-se que os concretos possuem uma viscosidade moderada sendo classificados como VS2 e VF1 e VF2 respectivamente. Os concretos 1:5,0, 1:6,5 do 1ª CAA e 1:3,5, 1:5,0 do 3ª CAA estão classificados na mesma classe de espalhamento, SF 2, adequada para a maioria das aplicações correntes. Assim como os concretos avaliados anteriormente, esses traços também cumpriram com a condição da habilidade passante utilizando três barras na caixa L. Analisando a viscosidade observa-se que ambos os traços do 1ª CAA se classifica como VS1 e VF1, indicados para estrutura com alta taxa de armaduras, o traço 1:3,5 do 3ª CAA foi classificado como VS2 e VF1 e traço 1:5,0 do 3ª CAA foi classificado como VS2 e VF2 mostrando ser um concreto mais viscoso. Um CAA com alta viscosidade se move de forma lenta e progressiva por um tempo mais prolongado.

Com a análise feita do espalhamento, da viscosidade e da habilidade passante do CAA para os diferentes traços de concreto estudados pode-se afirmar que os 1:3,5 do 1ª CAA e o 1:5,0 do 2ª CAA são indicados para estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura, já os traços 1:5,0; 1:6,5 do 1ª CAA e 1:3,5; 1:5,0 do 3ª CAA podem ser indicados para a maioria das aplicações correntes, conforme a NBR 15823:2010.

Comparando os resultados das propriedades no estado fresco apresentados na Tabela 10, do 1ª CAA com o 3ª CAA, observa-se que a mudança de material não interferiu significativamente nas mesmas, exceto na produção do traço 1:3,5, onde foi constatado uma melhora significativa na fluidez do 3ª CAA mesmo sendo utilizado um menor teor de aditivo superplastificante. Ao se produzir o 2ª CAA utilizando somente um tipo de areia afirma-se que o mau empacotamento dos finos pode interferir nas propriedades do CAA, desenvolvendo um concreto com uma baixa resistência a segregação, visto que no laboratório os traços dosados segregaram e o traço 1:5,0, produzido, experimentalmente ficou bem próximo da segregação mesmo utilizando a mesma relação água material seco dos outros concretos e uma baixa porcentagem de aditivo superplastificante. Com isso constata-se que apesar da areia natural ser a mais recomendada para

a produção do CAA, por conta da sua forma mais arredondada, o uso da areia britada é essencial para auxiliar na não segregação do CAA, pois a mesma possui uma grande quantidade de finos gerados no processo de britagem que melhoram as propriedades do concreto nesse quesito.

O ensaio de índice de estabilidade visual foi feito paralelamente ao ensaio de espalhamento. A Figura 20 (A,B,C,D e E) mostra as fotos do ensaio de espalhamento utilizadas para a inspeção visual. O único concreto que não foi realizado esse ensaio foi o 1ª CAA 1:5,0 , pois como foi o primeiro concreto a ser produzido, na ocasião não se pensava em realizar a inspeção visual.

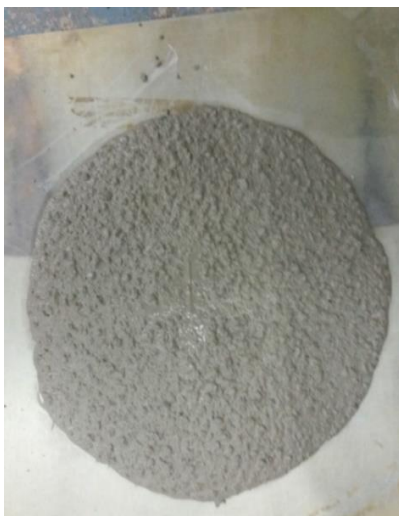
Figura 20 – Inspeção visual do 1ª CAA 1:3,5 (A), 1:6,5 (B), do 2ª CAA 1:5 (C), e do 3ª CAA 1:3,5 (D), 1:5 (E)



(A)



(B)



(C)



(D)



(E)

Na Tabela 11 são apresentados o resultado do índice de estabilidade visual dos concretos de acordo com a classificação proposta pela NBR 15823-2 Revisada.

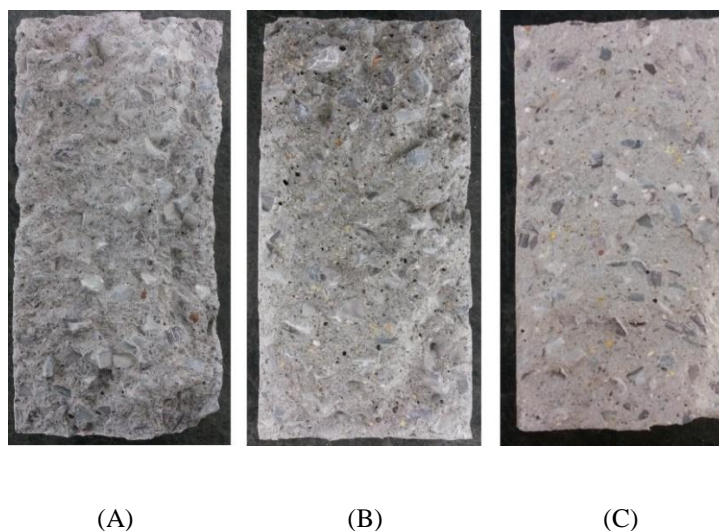
Tabela 11 – Resultado do ensaio índice de estabilidade visual

Concreto	Traço 1:m	Índice de estabilidade visual
1ª CAA	1:3,5	IEV 0 – Altamente estável
	1:6,5	IEV 1- Estável
2ª CAA	1:5,0	IEV 0 – Altamente estável
3ª CAA	1:5,0	IEV 0 – Altamente estável
	1:3,5	IEV 0 – Altamente estável

Analisando-se as fotos observa-se que visualmente nenhum dos concretos produzidos apresentaram segregação e todos fluíram satisfatoriamente pela abertura do Funil V, dessa forma pode-se confirmar a não segregação dos concretos autoadensável fabricados. Vale ressaltar que os traços do 2ª CAA que segregaram não foram apresentados nesse relatório e apesar dessa família de concreto ter se mostrado propícia à segregação, foi possível produzir CAA com os materiais empregados no traço.

A Figura 21 (A, B e C) mostra a distribuição dos agregados na pasta de cimento dos concretos 1ª CAA, 2ª CAA e 3ª CAA, no estado endurecido. Com essas fotos também foi possível verificar a distribuição homogênea do agregado nos corpos de provas após a ruptura à tração por compressão diametral, descartando a possibilidade de segregação desses concretos. Esta avaliação foi realizada somente em caráter de curiosidade, não sendo recomendada pela Comissão de Estudo que está revisando a NBR 15823.

Figura 21 – Distribuição dos agregados na pasta de cimento do 1ª CAA (A), 2ª CAA (B) e 3ª CAA (C)



4.4. Propriedades mecânicas dos concretos

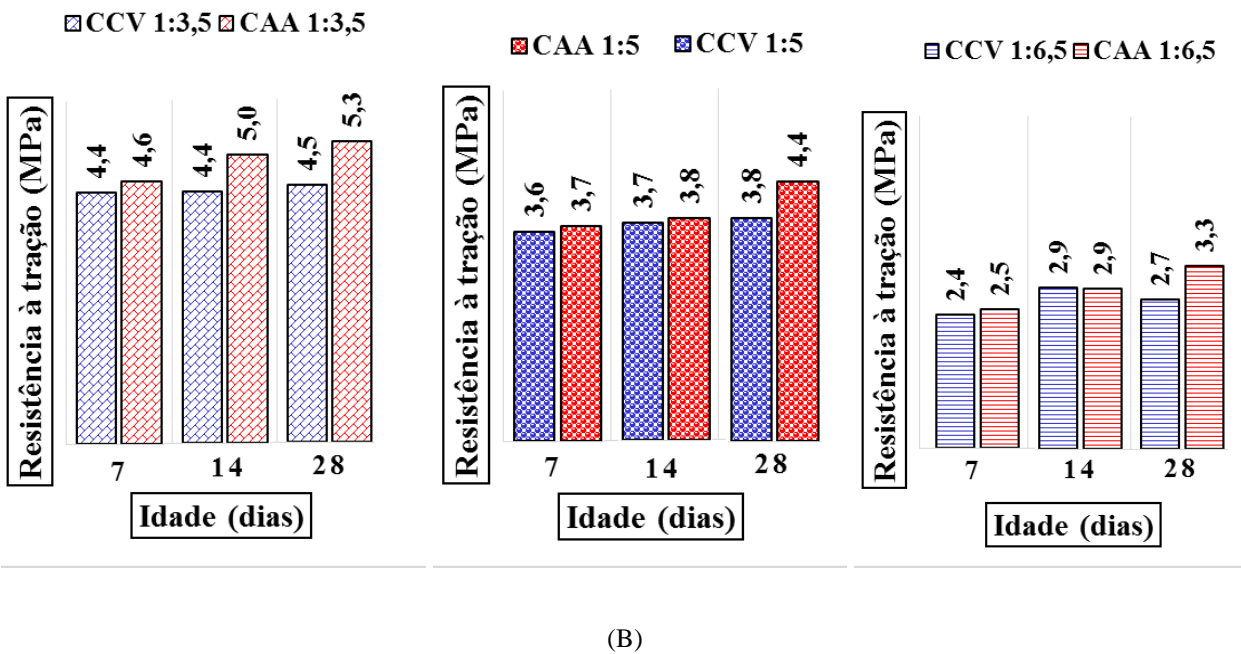
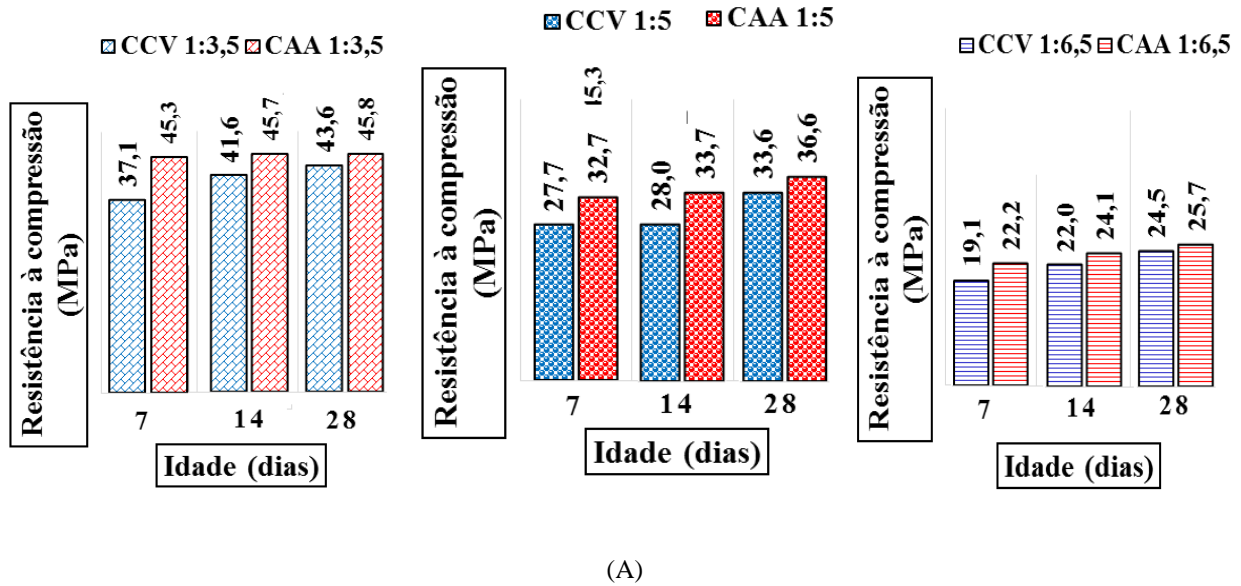
Na tabela 12 são apresentados os valores médios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade aos 7, 14 e 28 dias de idade. O módulo de elasticidade do 2ª CAA e do 3ª CAA foram realizados somente na idade de 28 dias.

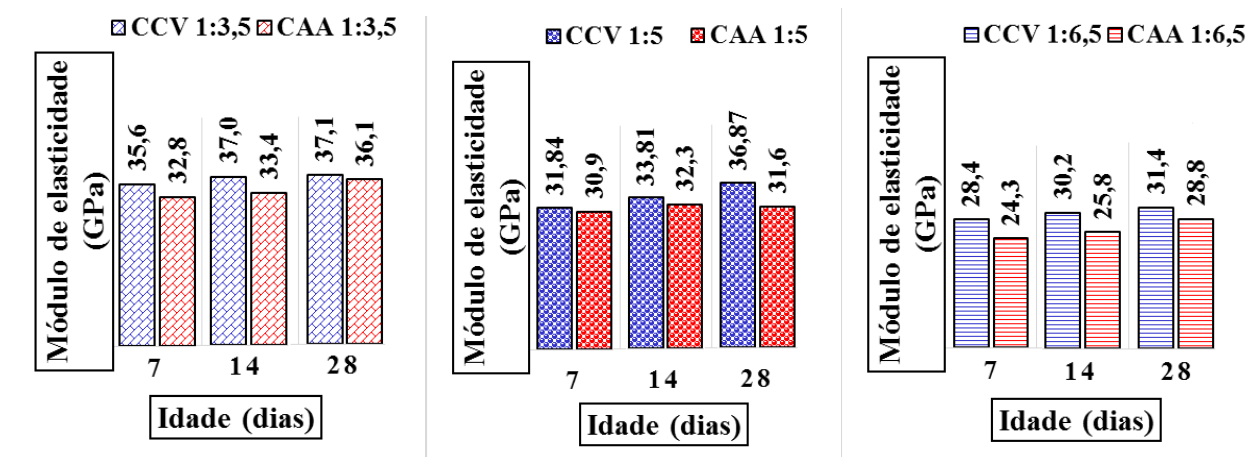
Tabela 12 – Propriedades mecânicas dos concretos convencional (CCV) e autoadensável (CAA)

Concreto	Traço 1:m	f_{cj} (MPa)			$f_{ct,sp}$ (MPa)			E (GPa)		
		7 dias	14 dias	28 dias	7 dias	14 dias	28 dias	7 dias	14 dias	28 dias
CCV	1:3,5	37,1	41,6	43,6	4,4	4,4	4,5	35,6	37,0	37,1
	1:5,0	27,7	28,0	33,6	3,6	3,7	3,8	31,8	33,8	36,9
	1:6,5	19,1	22,0	24,5	2,4	2,9	2,7	28,4	30,2	31,4
1ª CAA	1:3,5	45,3	45,7	45,8	4,6	5,0	5,3	32,8	33,4	36,1
	1:5,0	32,7	33,7	36,6	3,7	3,8	4,4	30,9	32,3	31,6
	1:6,5	22,2	24,1	25,7	2,5	2,9	3,3	24,3	25,8	28,8
2ª CAA	1:5,0	26,1	28,8	30,3	3,0	3,0	3,2	-	-	29,9
3ª CAA	1:3,5	39,2	42,8	44,3	3,4	4,2	4,7	-	-	34,4
	1:5,0	29,7	30,8	32,2	3,2	3,4	3,6	-	-	32,0

Para uma melhor visualização e comparação dos resultados, na Figura 22 (A, B e C) e Figura 23 (A, B e C), são apresentados os resultados da resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade em função das idades dos concretos em forma de gráfico.

Figura 22 – Resultados de resistência à compressão (A), à tração por compressão diametral (B) e módulo de elasticidade (C) em função da idade do CCV e do 1ª CAA

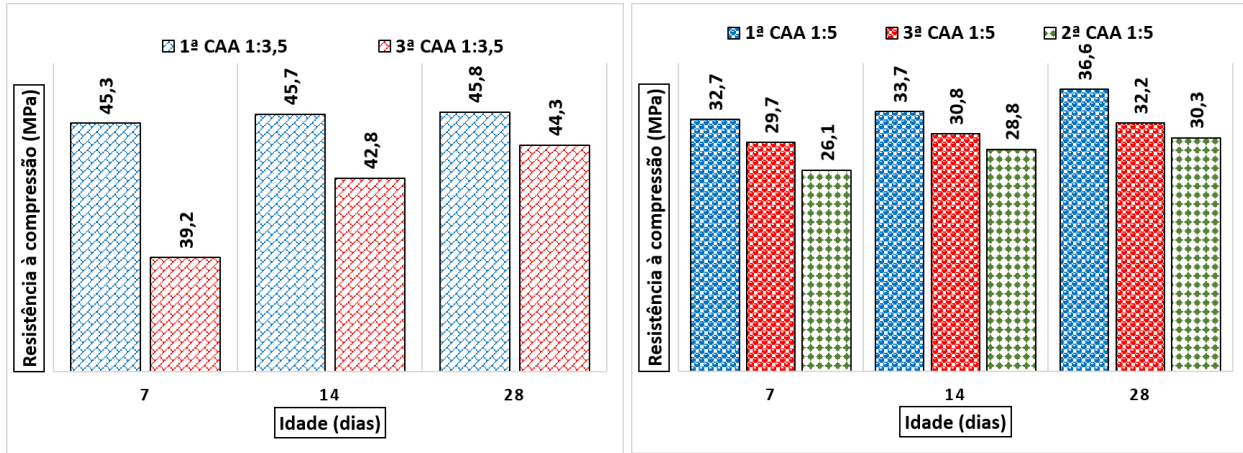




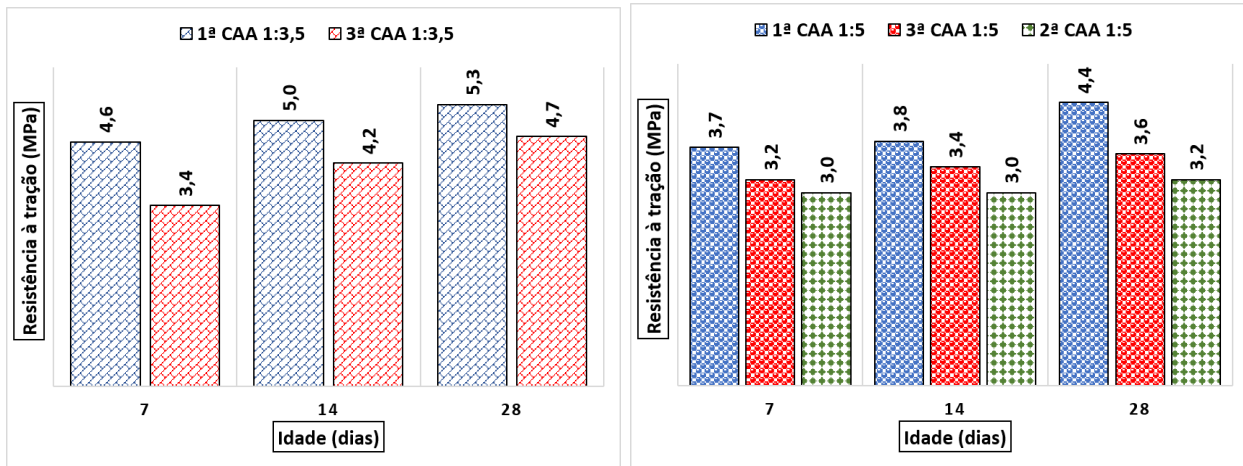
(C)

Comparando os resultados do CCV com os do 1ª CAA observa-se para todos os resultados que há um pequeno acréscimo no ganho de resistência após os 7 dias de idade. O CAA, como esperado, tende a apresentar uma maior resistência à compressão simples e a tração por compressão diametral. Já o módulo de elasticidade do concreto autoadensável tende a apresentar uma pequena redução em relação ao resultado do módulo de elasticidade do concreto convencional. Essa diferença foi menor que 10%, valor que em caso de ensaios realizados em laboratório pode-se considerar que não ocorreu variação nos resultados. Em casos como esses, onde a porcentagem da diferença entre os resultados foi muito pequena, o mais recomendado seria fazer uma análise estatística. As bibliografias afirmam que a redução do módulo de elasticidade do CAA para o do CCV está relacionado com a redução da granulometria do agregado graúdo, mas como nessa pesquisa o agregado graúdo dos dois concretos foram os mesmos, pode-se afirmar que esta tendência de comportamento deve-se ao incremento de finos na produção do concreto autoadensável.

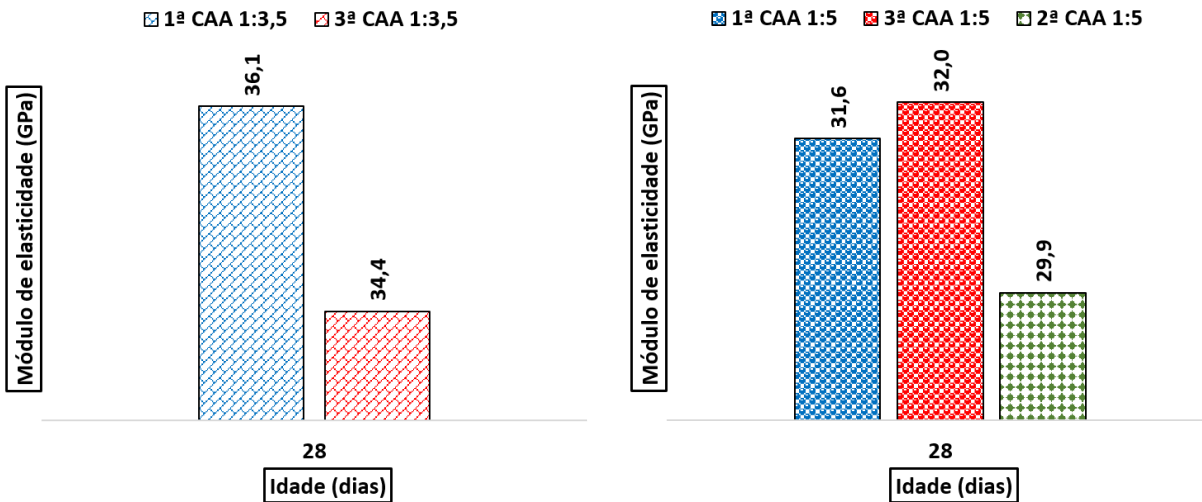
Figura 23 – Resultados de resistência à compressão (A), à tração por compressão diametral (B) e módulo de elasticidade (C) em função da idade do 1ª CAA e do 3ª CCV



(A)



(B)



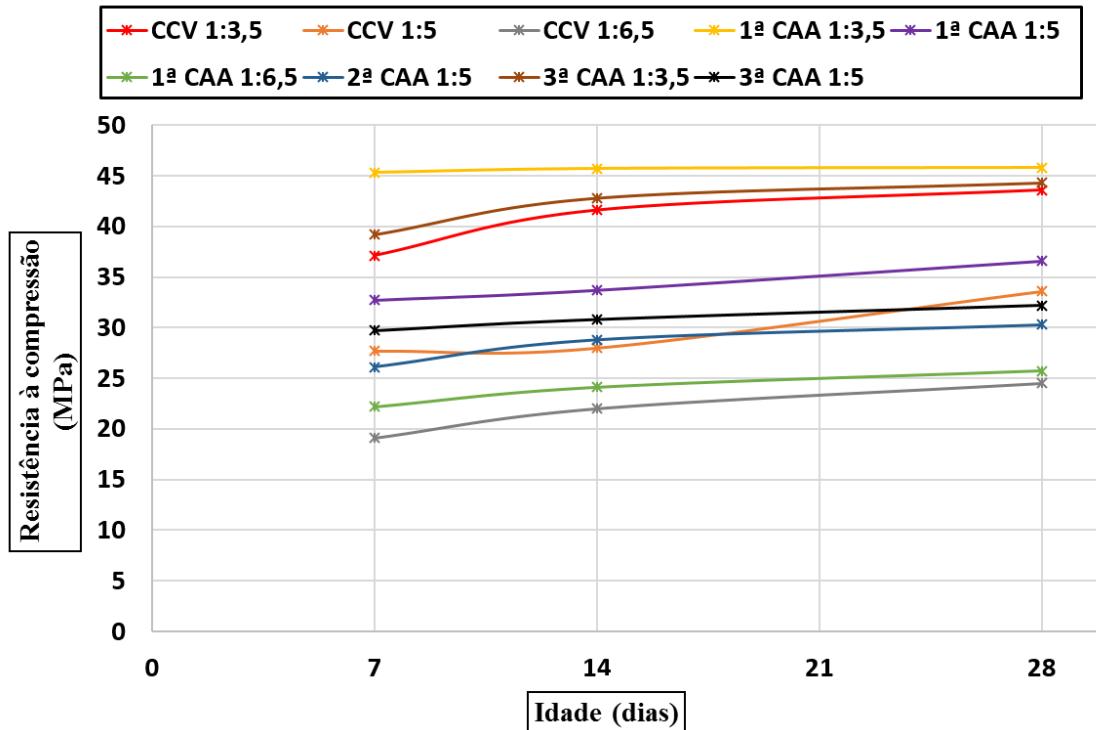
(C)

Comparando os resultados analisa-se que as resistências dos 1ª CAA foram maiores que as do 3ª CAA, por sua vez, as resistências do 3ª CAA foram maiores que as do 2ª CAA. Apesar de não ter sido um aumento muito expressivo, essa diferença, mesmo fixando a relação água material seco, se deve aos diferentes tipos de agregados miúdo nos traços. A areia britada possui uma grande quantidade de finos produzidos no processo de britagem, esses finos favorecem as propriedades mecânicas dos concretos produzidos com esse agregado, como observado nos resultados do 1ª CAA.

O módulo de elasticidade do 1ª CAA apresentou um maior valor no traço mais rico, diferença muito pequena, e no traço piloto os resultados de ambos os concretos se mantiveram muito próximos, mostrando que a substituição das areias não interferiu significativamente nas propriedades do mesmo, mas que uma combinação entre as areias favorece o módulo de elasticidade, visto que o 2ª CAA apresentou o menor valor.

Na Figura 24 os resultados da resistência à compressão são exibidos em forma de gráfico linear, dessa forma podendo verificar a tendência das resistências de todos do concretos dosados.

Figura 24 – Tendência das resistências à compressão dos concretos



4.4.1. Comparação das propriedades mecânicas com as novas estimativas propostas pela NBR 6118:2014

A NBR 6118:2014 apresenta novos critérios que permitem estimar a resistência à tração e o módulo de elasticidade do concreto a partir da resistência característica à compressão (f_{ck}) para concretos de até 90 MPa. Quando não for possível realizar o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, NBR 7222:2011, e o módulo de elasticidade, NBR 8522:2008, pode-se avaliá-los utilizando esses novos critérios, os quais já foram supracitados na revisão bibliográfica desse trabalho. É importante enfatizar, que tanto para cálculo da resistência à tração quanto para o módulo de elasticidade existem duas equações, uma que atende a resistência característica à compressão de 20 a 50 MPa e outra para resistências entre 55 e 90 MPa. Dessa forma, umas das propostas dessa pesquisa foi comparar esses valores teóricos com os resultados obtidos experimentalmente.

Na Tabela 13 são apresentados os resultados de resistência à compressão característica (f_{ck}) e da resistência à tração média (f_{ct}) e para comparação também são apresentados os valores teóricos da

resistência à tração média (f_{ctm}), característico inferior ($f_{ctk,inf}$) e característica superior ($f_{ctk,sup}$) de acordo com a NBR 6118:2014. Os valores experimentais são de todos os traços produzidos nas idades de 7,14 e 28 dias.

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 \times S_d \quad \text{Eq (12)}$$

O valor considerado para S_d foi igual à 4,0 MPa, condição em que o cimento e os agregados são medidos em massa.

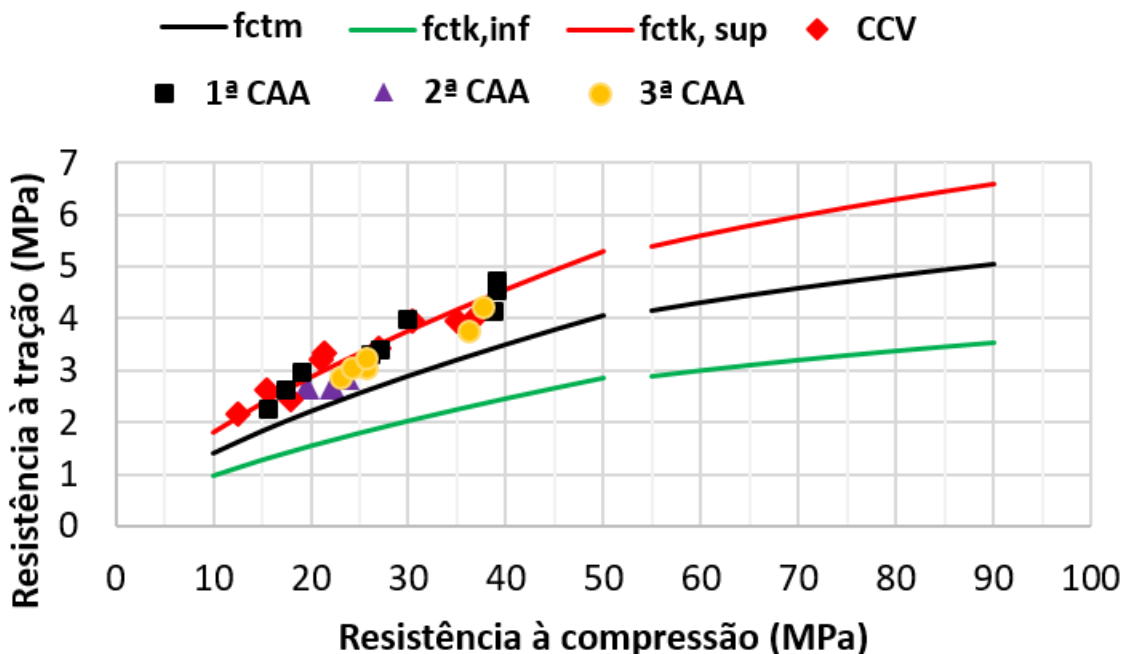
Tabela 13 – Resultado experimental e teórico da resistência à tração média

Concreto	Traço 1:m	Idade	Resultado experimental			Resultado teórico		
			f_{cj} (MPa)	f_{ck} (MPa)	f_{ct} (MPa)	f_{ctm} (MPa)	$f_{ctk,inf}$ (MPa)	$f_{ctk,sup}$ (MPa)
CCV	1:3,5	7 dias	37,1	30,47	3,96	2,93	2,05	3,80
		14 dias	41,6	35,04	3,96	3,21	2,25	4,18
		28 dias	43,6	36,97	4,05	3,33	2,33	4,33
	1:5,0	7 dias	27,7	21,09	3,22	2,29	1,60	2,98
		14 dias	28,0	21,39	3,34	2,31	1,62	3,00
		28 dias	33,6	27,00	3,42	2,70	1,89	3,51
	1:6,5	7 dias	19,1	12,48	2,17	1,61	1,13	2,10
		14 dias	22,0	15,43	2,63	1,86	1,30	2,42
		28 dias	24,5	17,93	2,43	2,05	1,44	2,67
1ª CAA	1:3,5	7 dias	45,3	38,73	4,13	3,43	2,40	4,46
		14 dias	45,7	39,08	4,54	3,45	2,42	4,49
		28 dias	45,8	39,15	4,73	3,46	2,42	4,50
	1:5,0	7 dias	32,7	26,11	3,31	2,64	1,85	3,43
		14 dias	33,7	27,09	3,41	2,71	1,89	3,52
		28 dias	36,6	29,97	4,00	2,89	2,03	3,76
	1:6,5	7 dias	22,2	15,60	2,25	1,87	1,31	2,43
		14 dias	24,1	17,50	2,61	2,02	1,42	2,63
		28 dias	25,7	19,10	2,97	2,14	1,50	2,79
2ª CAA	1:5,0	7 dias	26,1	19,50	2,70	2,17	1,52	2,83
		14 dias	28,8	22,20	2,70	2,37	1,66	3,08
		28 dias	30,3	23,70	2,88	2,48	1,73	3,22
3ª CAA	1:3,5	7 dias	39,2	25,60	3,06	2,61	1,82	3,39
		14 dias	42,8	36,20	3,78	3,28	2,30	4,27
		28 dias	44,3	37,70	4,23	3,37	2,36	4,38
	1:5,0	7 dias	29,7	23,10	2,88	2,43	1,70	3,16
		14 dias	30,8	24,20	3,06	2,51	1,76	3,26
		28 dias	32,2	25,60	3,24	2,61	1,82	3,39

Para uma melhor análise esses resultados são representados em forma de gráfico na Figura 25, onde são apresentados os valores experimentais de resistência à tração média em função da resistência à compressão característica junto com as curvas de estimativas da resistência à tração

média (f_{ctm}), característico inferior ($f_{ctk,inf}$) e característica superior ($f_{ctk,sup}$) conforme a NBR 6118:2014.

Figura 25 – Relação da resistência à tração por compressão diametral com a resistência à compressão simples para o CCV, 1ª CAA, 2ª CAA e o 3ª CAA



Analisando o gráfico nota-se que a tendência de ambos os concretos é apresentar uma resistência à tração média maior que a estimativa de norma, aproximando-se dos valores da curva característica superior. A maioria dos resultados do CCV e do 1ª CAA foram maiores que os apresentados na curva característica superior enquanto que todos os resultados do 2ª CAA e do 3ª CAA ficaram entre a curva característica superior e a curva da resistência à tração média, essa tendência de resultados está associada com a proporção dos agregados utilizados nos traços dosados.

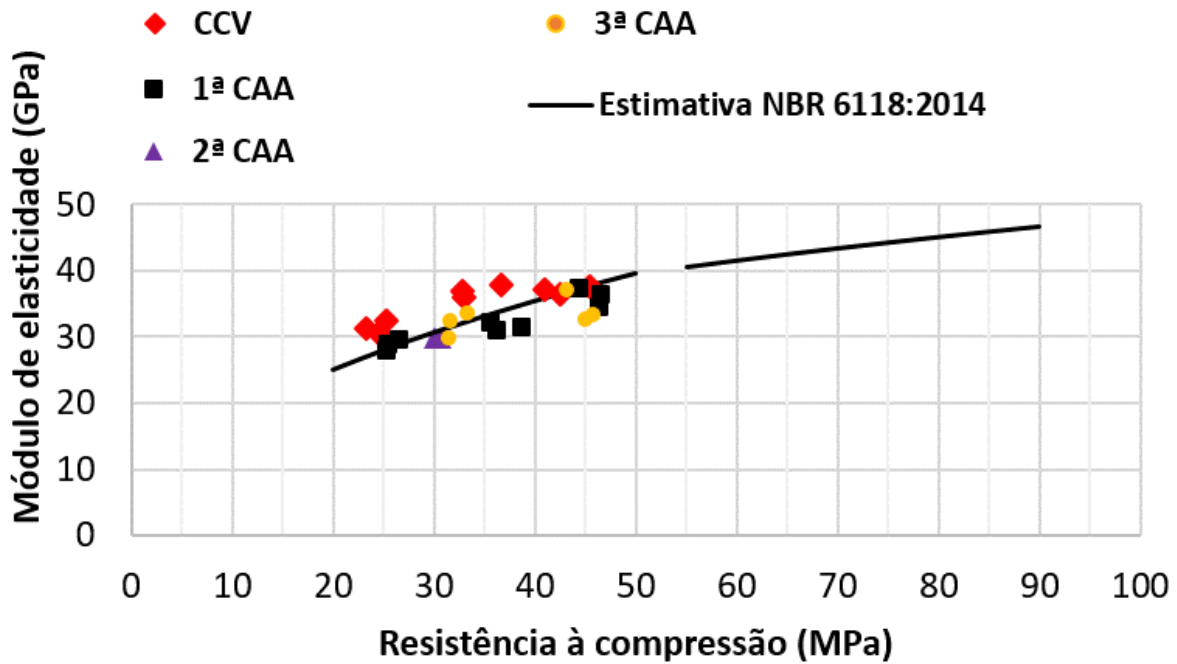
Na Tabela 14 são apresentados os resultados experimentais de resistência à compressão simples (f_{cj}) e do módulo de elasticidade obtidos experimentalmente para cada corpo de prova aos 28 dias de idade. Para comparação são apresentados os valores de módulo de elasticidade inicial estimados de acordo com o item 8.2.8 da NBR 6118:2014.

Tabela 14 – Resultado experimental e teórico do módulo de elasticidade

Concreto	Traço 1:m	Idade	CP	Resultado experimental		Resultado teórico
				f_{cj} (MPa)	E (GPa)	E_{ci} (GPa)
CCV	1:3,5	28 dias	1	41,02	37,21	32,86
			2	42,47	36,56	33,54
			3	45,42	37,65	34,89
	1:5,0	28 dias	1	32,96	35,95	28,76
			2	32,87	36,86	28,70
			3	36,58	37,80	30,67
	1:6,5	28 dias	1	24,51	30,56	23,70
			2	23,33	31,29	22,90
			3	25,30	32,37	24,21
1ª CAA	1:3,5	28 dias	1	43,20	34,59	33,88
			2	46,35	37,45	35,31
			3	44,50	36,36	34,48
	1:5,0	28 dias	1	36,13	30,94	30,43
			2	35,65	32,19	30,18
			3	38,60	31,63	31,68
	1:6,5	28 dias	1	26,55	29,71	25,01
			2	25,26	27,96	24,19
			3	25,40	28,84	24,28
2ª CAA	1:5,0	28 dias	1	30,13	29,91	27,17
			2	30,61	29,82	27,44
3ª CAA	1:3,5	28 dias	1	44,96	32,64	34,69
			2	45,80	33,46	35,07
			3	43,16	37,12	33,86
	1:5,0	28 dias	1	31,38	29,91	27,88
			2	31,65	32,47	28,03
			3	33,32	33,71	28,94

Para um melhor esclarecimento na Figura 26 esses resultados são apresentados em forma de gráfico. São apresentados os resultados individuais do módulo de elasticidade em função da sua resistência à compressão simples aos 28 dias de idade e para comparação são exibidas as curvas de estimativas desses valores conforme a NBR 6118:2014.

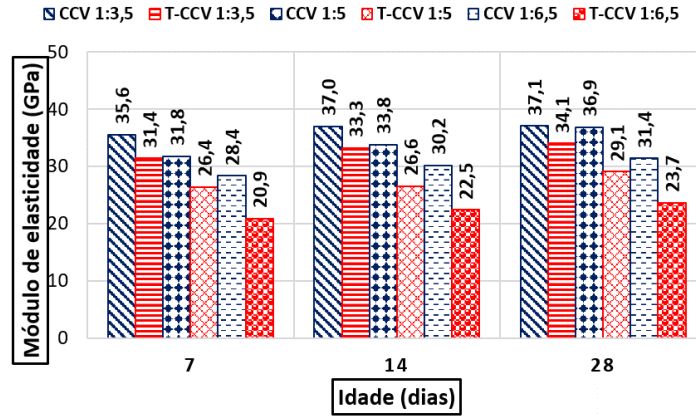
Figura 26 – Relação do módulo de elasticidade com a resistência à compressão simples para o CCV, 1ª CAA, 2ª CAA e o 3ª CAA



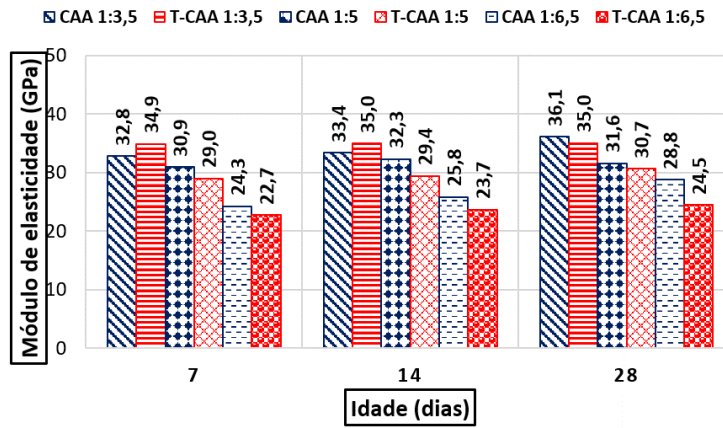
Avaliando o gráfico verifica-se que os valores experimentais tanto do concreto convencional quanto dos concretos autoadensável apresentam uma tendência de comportamento bem próximo ao comportamento teórico. A pequena variação observada entre os resultados dos concretos está relacionada à proporção dos agregados devido aos diferentes tipos de traços produzidos.

Na Figura 27 (A, B, C e D) são apresentados os gráficos do módulo de elasticidade experimental e teórico, de acordo com o proposto pela NBR 6118:2014. Os valores experimentais estão em azul e os teóricos em vermelho.

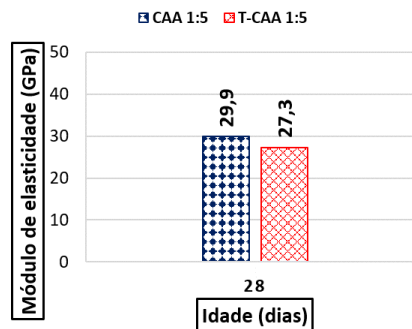
Figura 27 – Resultado do módulo de elasticidade experimental e teórico em função da idade do CCV (A), 1ª CAA (B), 2ª CAA (C) e do 3ª CAA (D)



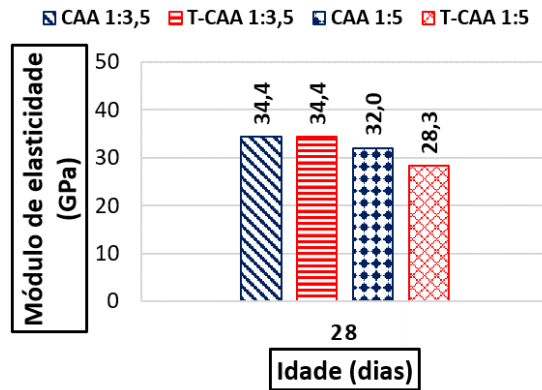
(A)



(B)



(C)



(D)

Fazendo a análise dos gráficos observa-se que para o CCV o valor do módulo de elasticidade teórico tende a ser menor que o experimental. Enquanto que para o 1ª CAA esta tendência de comportamento é observada para todos os traços somente aos 28 dias de idade. Para o 2ª CAA e o 3ª CAA só foi realizado o ensaio do módulo de elasticidade aos 28 dias de idade. Com os resultados disponíveis, nota-se que o módulo de elasticidade teórico foi igual ao módulo de elasticidade experimental para o traço mais rico, entretanto para o traço piloto o valor teórico foi menor que o valor experimental.

5. CONCLUSÃO

Essa pesquisa teve como principal objetivo produzir concreto convencional e concretos autoadensáveis com diferentes materiais disponíveis na região de Brasília-DF. Com os resultados obtidos foi possível realizar a análise das propriedades dos concretos no estado fresco e no estado endurecido, dessa forma pode-se constatar quais as vantagens nas propriedades mecânicas que o CAA tem em relação ao CCV e foi possível analisar qual material obteve um melhor desempenho nas características no estado fresco e endurecido dos CAA produzidos com diferentes tipos de agregados miúdos.

Conclui-se que foi possível dosar concreto autoadensável com os materiais da região de Brasília-DF, apropriado para a maioria das aplicações correntes em obras de acordo com os requisitos de aceitação da NBR 15823-1:2010.

Ao se produzir o 2ª CAA utilizando somente um tipo de areia natural como agregado miúdo, era aguardada uma melhora nas propriedades no estado fresco do concreto em comparação com o 1ª CAA produzido com os agregados miúdos areia britada e areia natural (módulo de finura=1,27), mas ocorreu o imprevisto. O empacotamento precário e a ausência de composição entre os agregados miúdos desfavoreceram a propriedade de resistência à segregação, visto que experimentalmente foi complicado produzir um único traço de CAA sem segregar, as demais tentativas de se produzir esse concreto foram em vão. Com esse contexto, não se recomenda a dosagem de CAA sem ser aplicada uma correta composição entre areias mais finas.

Realizando um estudo comparativo das propriedades no estado fresco dos concretos autoadensáveis produzidos, observa-se que o comportamento do concreto dosado somente com areias naturais como agregado miúdo foi contraditório. De acordo com as bibliografias supracitadas nesse relatório era esperada uma melhora significativa nas propriedades no estado fresco dos CAA fabricados somente com areias naturais em comparação com os CAA dosados com areias britadas, mais especificamente na fluidez do concreto, mas como observado nessa pesquisa isso não ocorreu. Nesse contexto, pode-se concluir que ao se trabalhar com areia britada na produção de concreto autoadensável, a forma do agregado é compensada com a parte de finos, gerados no processo de britagem, que compõem o material.

Ao cumprir-se com o propósito de analisar comparativamente o comportamento mecânico dos concretos CCV e 1ª CAA verificou uma pequena variação nos resultados. O CAA tende a expor uma maior resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral para a mesma relação água material seco, isso se deve aos diferentes estudos de dosagem, pois a composição do esqueleto granular proporciona um melhor empacotamento entre os agregados favorecendo no ganho de resistência. Era esperado um menor valor para o resultado do módulo de elasticidade do CAA, mas como observado a diferença do módulo entre os concretos não foi significativa. A pequena diferença observada se deve ao incremento de materiais pulverulentos, adições minerais, na produção do CAA, já que, os agregados utilizados foram os mesmos em ambos os concretos

Analisando as propriedades mecânicas dos concretos autoadensáveis, pode-se observar uma pequena diferença nos resultados. Apesar da proporção do esqueleto granular de todos os concretos terem sido iguais, os concretos produzidos com areia britada, 1ª CAA, tende a obter uma maior resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral. Esse ganho de resistência se deve a melhor densidade de empacotamento providenciado pelos finos, produzidos no processo de britagem, que compõem a areia britada. O valor do módulo de elasticidade se manteve bem próximo entre os concretos. Nesse contexto, recomenda-se o uso de areia britada para a produção do concreto autoadensável.

Outro objetivo fundamental nesse estudo foi comparar os resultados experimentais com os resultados teóricos proposto pela NBR 6118:2014. No estudo da resistência média à tração direta, foi observado para todos os concretos produzidos que os resultados experimentais, para todas as idades, foram na maioria dos casos superiores às estimativas de norma, aproximando-se dos valores característicos superiores. Na análise do módulo de elasticidade, verificou-se que a estimativa de norma apresenta a tendência de comportamento observado nos ensaios experimentais individuais para a idade de 28 dias. Nesse contexto conclui-se que os concretos produzidos apresentaram comportamentos mecânicos de acordo com as estimativas propostas pelas NBR 6118:2014.

5.1. Sugestão para trabalhos futuros

Realizar um estudo aplicando os concretos convencional e autoadensável em um canteiro de obras. Dessa forma será possível fazer uma análise real das vantagens do uso do CAA em relação ao CCV. Essa pesquisa deverá considerar o tempo de concretagem, a quantidade de mão de obra no lançamento dos concretos, o custo de produção, a fim de determinar qual concreto proporciona um menor custo total no empreendimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2011.
- 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 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2014.
- 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 8522: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.** Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 33: Concreto – Amostragem de concreto fresco.** Rio de Janeiro, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 1998.
- ACI COMMITTEE 237R-07. *Self-Consolidating Concrete.* Part 6, ACI Manual of Concrete Practice, 2007.
- ARAÚJO, J.G. **Influência de adições minerais pozolânicas e de finos de pedra na propriedades mecânicas e na microestrutura do concreto auto-adensável.** Dissertação de mestrado, Goiânia, 2007.
- BARBOSA, M.P. **Desenvolvimento normativo do concreto autoadensável – a NBR 15823 revisada.** III seminário sobre pesquisas e obras em concreto autoadensável. IBRACON 2016, Belo Horizonte, outubro de 2016. Disponível em:<
<http://ibracon.org.br/eventos/58cbc/Palestras/04MonicaBarbosa.pdf>>. Acesso em 15 de nov. 2016.

- BENETTI, J. **Avaliação do Módulo de Elasticidade Dinâmico de Concreto Produzido com Agregado Graúdo Reciclado de Concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil, 2012.
- BOSILJKOV, V.B. *SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler*. *Cemente and concrete Research*, 2003.
- BRAMESHUBER, W.; UEBACHS, S. *Investigations on the formwork pressure using self-compacting concrete*. In: *3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*. Islândia, p.281-287, 2003.
- CAVALCANTI, D. J. H. **Contribuição ao estudo de propriedades do concreto auto adensável visando sua aplicação em elementos estruturais**. 2006. 141f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2006.
- CHANG, P. K. **An approach to optimizing mix design for properties of highperformance concrete**. *Cement and Concrete Research*, v. 34, p. 623-629, 2004.
- DE SCHUTTER, G.; BARTOS, P. J. M.; DOMONE, P. GIBBS, J. **Self Compacting Concrete**, Whittles Publishing, 2008, 288p.
- DOMONE, P.L. *Self-compacting concrete: an analyses of 11 years of cases studies*. In: **Cement & Concrete Composites**, n° 28, p. 197-208, 2006.
- DOMONE, P. L. **A review of the hardened mechanical properties of self compacting concrete**. *Cement and Concrete Composites*, 29, 1-12, 2007.
- EUROPEAN FEDERATION SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS (EFNARC). *Specification and guidelines for self-compacting concrete*. In: EFNARC. Fevereiro, 2002.
- FURNAS, Equipe de; Laboratório de Concreto. **Concretos massa, estrutural, projetado e compactado com rolo – Ensaios e propriedades**. São Paulo: Walton Pacelli de Andrade/PINI, 1997. Cap 17.
- GALÁN, E.F.; BALLESTER, L.G.; ROS, P.S.; PAYÁ, M.V.; BARBOSA, L.A.G; LINTZ, R.C.C. **Comportamiento a edades muy tempranas del hormigón autocompactante para prefabricación**. IV Congresso Ibero-americano sobre Betão Auto-compactável – BAC2015, FEUP, julho de 2015.
- GETTU, R.; RONCERO, J. **Aditivos superfluidificantes para hormigones de latas prestaciones**. In: IV Simposio sobre aditivos para hormigones. Madrid, 24 e 25 de nov. 1998.
- GEYER, A.L.B. **Utilização de concreto auto-adensável em estruturas de edifícios com custos inferiores ao concreto convencional**. In: 12° Concurso Falcão Bauer, 2005.
- GOMES, P.C.C. *Optimization and characterization of high-strength selfcompacting concrete*. 2002. 139 p. Tese – Escola Técnica Superior D’Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, Espanha, 2002.
- GOMES, P.C.C.; BARROS, A.R. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. São Paulo, 2009.
- GRACE. *Seismic testing wall needs no vibration*. 2005.

- HARTMANN, C.T.; HELENE, P.R.L. Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilatos destinados a concreto de cimento Portland – Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/330. São Paulo: EPUSP, 2003.
- HASTENPFLUG, D. **Contribuição ao estudo da uniformidade do concreto auto-adensável de alta resistência em pilares e vigas.** Dissertação de metrado, Santa Catarina, 2007.
- HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto.** São Paulo: Pini. 1992.
- HOLSCHEMACHER, K. *Hardened material properties of self-compacting concrete.* Journal of civil engineering and management, v.X, n.4, 261-266, 2004.
- JSCE-F503: **Method of test for the slump flow of concrete.** 1990.
- KHAYAT, K.H.; DE SCHUTTER, G. (Eds.). **Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 228-MPS on Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete.** RILEM State-of-the-Art Reports, vol. 14, Springer. 2014.
- L. CABRAL, E MONTEIRO, P. HELENE. **Revista ALCONPAT**, Volumen 4, Número 2, Mayo - Agosto 2014, Páginas 144 – 160.
- MEHTA, P.; MONTEIRO, P. **Concreto – Microestrutura, Propriedades e Materiais.** 3ª edição, Ed. Ibracon 2008.
- MENDES, M.V.A.S.; BAUER, E. **Avaliação da capacidade do parâmetro wft (*water film thickness*) contribuir para a obtenção do concreto autoadensável.** IV Congresso Ibero-americano sobre Betão Auto-compactável – BAC2015, FEUP, julho de 2015.
- NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto.** 5ª edição, Ed. Bookman 2016.
- NEVILLE, AM.; BROOKS, J.J. **Tecnologia do Concreto.** 2ª edição, Ed. Bookman 2013.
- OKAMURA, H.; OUCHI, M. *Self –compacting concrete.* In: **Journal of Advanced Concrete Technology**, Vol. 1, n. 1, p. 5-15, 2003.
- REVISTA TECHNE. **Solução fluida.** Revista Técnica, ed 132, ano 16, março de 2008.
- REZENDE, F.G.; CAPUZZO, V.S. **Propriedades mecânicas dos concretos convencional e autoadensável.** 58º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON 2016, Belo Horizonte, outubro de 2016.
- REZENDE, F.G.; CAPUZZO, V.S. **Verificação do Comportamento mecânico dos concreto convencional e autoadensável de alta resistência.** Programa de Iniciação Científica 2014-2015 da Universidade de Brasília (UnB), outubro de 2015.
- SILVA, A. P.; SEGADÃES, A. M.; DEVEZAS, T. C. **Aplicação de métodos estatísticos na otimização da densidade de empacotamento de distribuições de pós de alumina.** Revista Cerâmica. n. 60 p. 345-354. 2004.

SILVA, A. S. M. da. **Dosagem de Concreto Pelos Métodos de Empacotamento Compressível e Aïtcin-Faury Modificado**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

SZECSY, R. *Integration and application of self compacting concrete as a technology into other types of performance concrete*. In: *Fourth International RILEM Symposium on Self-compacting Concrete*. Chicago, EUA, 2005.

TUTIKIAN, B.F. **Método para dosage de concretos de auto-desempenho**. Dissertação de mestrado. UFRGS, 2004.

TUTIKIAN, B.F. **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

TUTIKIAN, B.F; DAL MOLIN, D.C; CREMONINI, R.A.; LAMARCA, R.L.M.; VIECILI, F. A. *A comparison of production costs using conventional concrete and self-compacting concrete in Brazilian precast*. In: *Fourth International RILEM Symposium on Self-compacting Concrete*. Chicago, EUA, 2005a.

TUTIKIAN, B.F; DAL MOLIN, D.C; CREMONINI, R.A. **Viabilização econômica do concreto auto-adensável**. In: 12º Concurso Falcão Bauer, Categoria Novos Materiais, 2005b.

TUTIKIAN, B.F; MANUEL P.J; MASUERO, A.B; DAL MOLIN, D.C; **Produção de estrutura de concreto armado com o concreto auto-adensável**. In: *Comunidade da Construção Porto Alegre*. Ação nº 1, 2007.

TUTIKIAN, B.F; DAL MOLIN, D.C. **Concreto Auto-adensável**. 1 ed. São Paulo: PINI, 2008, pg. 140.

WALRAVEN, J. *Structural aspects of SCC*. In: *Fourth International RILEM Symposium on Self-compacting Concrete*. Chicago, EUA, 2005.

ANEXOS

ANEXO A – DOSAGEM DOS TRAÇOS DO CONCRETO CONVENCIONAL (CCV)

Para a determinação do traço piloto (1:5,0), do concreto convencional utilizando o método de dosagem de Helene e Terzian (1992), primeiramente foi estabelecido um teor de argamassa seca (α) baixo, no caso foi utilizado um teor de 47%. Aos poucos foram acrescentados mais materiais até alcançar um α ideal, no caso foi de 55%, a brita diâmetro máximo 12,5 mm foi mantida fixa variando somente o agregado miúdo e o cimento. A água foi adicionada até o concreto obter um slump de 100±10 mm. A Tabela A.1 mostra a variação dos materiais para a determinação do α ideal.

Tabela A.1 – Variação dos materiais na determinação do teor de argamassa seca ideal

α (%)	m = 5		Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita 0 (kg)	Água (kg)	Relação a/c
	a	p					
47	1,82	3,18	8,176	14,881	26,0	4,088	0,5
49	1,94	3,06	8,497	16,484	26,0	4,249	0,5
51	2,06	2,94	8,844	18,218	26,0	4,422	0,5
53	2,18	2,82	9,220	20,099	26,0	4,610	0,5
55	2,30	2,70	9,630	22,148	26,0	4,815	0,5
						6,215	0,65

As fórmulas utilizadas na dosagem do concreto estão apresentadas abaixo.

-Teor de argamassa (α):

$$\alpha(\%) = \frac{1+a}{1+m} \cdot 100 \quad \text{Eq. (13)}$$

a: areia / m= 5,0 Eq. (14)

-Relação agregado/cimento:

$$m = \frac{a+p}{c} \quad \text{Eq. (15)}$$

p: brita / C: cimento = 1

- Relação água cimento:

$$a/c = \frac{\text{massa de água}}{\text{massa de cimento}} \quad \text{Eq. (16)}$$

A relação água material seco (H) obtida será fixada para a produção do concreto autoadesável.

$$- H = \frac{a/C}{1+m} \cdot m = 10\% \text{ Eq. (17)}$$

Com o traço piloto do concreto determinado foi fabricado um novo concreto, com um volume suficiente para moldar todos os corpos de prova necessários e em seguida foram fabricados os traços 1:3,5 e 1:6,5. Na Tabela A.2 são apresentados os traços dosados e a quantidade de materiais utilizada na produção de cada concreto.

Tabela A.2 – Quantidade de materiais utilizados nos traços do CCV

m	Traço	α (%)	Cimento (kg)	Areia (kg)		Brita 0 (kg)	Água (kg)	H (%)
				a _n - (25%)	a _b (75%)			
5,0	1:2,3:2,7:0,60	55	22,22	12,75	38,33	60,00	13,26	10
3,5	1:1,48:2,02:0,47	55	25,00	9,25	27,75	50,50	11,75	10,44
6,5	1:3,13:3,37:0,78	55	15,00	11,74	35,21	50,60	11,77	10,40

a_n- = Areia natural (módulo de finura=1,27); a_b = areia britada

ANEXO B – DOSAGEM DOS TRAÇOS DO 1ª CONCRETO AUTOADENSÁVEL (1ª CAA)

Para a determinação dos traços do 1ª concreto autoadesável, foi aplicado o esqueleto granular obtido com o ensaio de massa unitária no estado compactado e foi mantida a mesma relação água material seco obtida na dosagem do concreto convencional, alterando somente o teor de aditivo superplastificante até obter um concreto autoadensável de acordo com a NBR 15823:2010. Na Tabela B.1 são apresentados os traços dosados e a quantidade de materiais utilizada na produção de cada concreto.

Tabela B.1 – Quantidade de materiais utilizados nos traços do 1ª CAA

m	Traço	Cimento (kg)	Fíler (kg)	Areia natural (kg)	Areia britada (kg)	Brita 0 (kg)	Água (kg)	Aditivo (g)	H (%)
5,0	1:0,75:0,85:1,7:1,7:0,6	18,50	13,88	15,73	31,45	31,45	11,10	185 (1%)	10
3,5	1:0,525: 0,595:1,19:1,19:0,47	24,00	12,60	14,28	28,56	28,56	11,35	240 (1%)	10,44
6,5	1:0,975:1,105:2,21:2,21:0,78	16,00	15,60	17,68	35,36	35,36	12,48	184 (1,15%)	10,40

ANEXO C – DOSAGEM DO TRAÇO DO 2ª CONCRETO AUTOADENSÁVEL (2ª CAA)

Para a determinação do traço do 2ª concreto autoadesável, foi mantido a mesma proporção dos materiais do esqueleto granular obtidas para o 1ª concreto autoadensável, substituindo os agregados miúdos por uma areia natural com o módulo de finura de 2,36. Foi mantida a mesma relação água material seco obtida na dosagem do concreto convencional alterando somente o teor de aditivo superplastificante até obter um concreto autoadensável de acordo com a NBR 15823:2010. Na Tabela C.1 é apresentado o traço dosado e a quantidade de materiais utilizada na produção de cada concreto.

Tabela C.1 – Quantidade de materiais utilizados no traço do 2ª CAA

m	Traço	Cimento (kg)	Fíler (kg)	Areia natural (kg)	Brita 0 (kg)	Água (kg)	Aditivo (g)	H (%)
5,0	1:0,75:2,55:1,7:0,6	17,00	12,75	43,35	28,90	10,20	114 (0,67%)	10

ANEXO D – DOSAGEM DOS TRAÇOS DO 3ª CONCRETO AUTOADENSÁVEL (3ª CAA)

Para a determinação dos traços do 3ª concreto autoadesável, foi mantido a mesma proporção dos materiais do esqueleto granular obtidas para o 1ª concreto autoadensável, substituindo a areia britada por uma areia natural com o módulo de finura de 2,36. Foi mantida as mesmas relações água material seco alterando somente o teor de aditivo superplastificante até obter um concreto autoadensável de acordo com a NBR 15823:2010. Na Tabela D.1 são apresentados os traços dosados e a quantidade de materiais utilizada na produção de cada concreto.

Tabela D.1 – Quantidade de materiais utilizados nos traços do 3ª CAA

m	Traço	Cimento (kg)	Fíler (kg)	a _{n-} (kg)	a _{n+} (kg)	Brita 0 (kg)	Água (kg)	Aditivo (g)	H (%)
5,0	1:0,75:0,85:1,7:1,7:0,6	14,00	10,50	11,90	23,80	23,80	8,40	93,8 (0,67%)	10
3,5	1:0,525:0,595:1,19:1,19:0,47	19,00	9,975	11,30 5	22,61	22,61	8,93	157,7 (0,83%)	10,44

a_{n-} = Areia natural (módulo de finura=1,27); a_{n+} = Areia natural (módulo de finura=2,36)

ANEXO E – DIAGRAMA DE DOSAGEM

Nas Figuras E.1 e E.2 são apresentados os gráficos dos diagramas de dosagem dos concretos convencional e autoadensável.

Figura E.1 – Diagrama de dosagem do concreto convencional para um teor de argamassa de 55% e abatimento de 100 mm

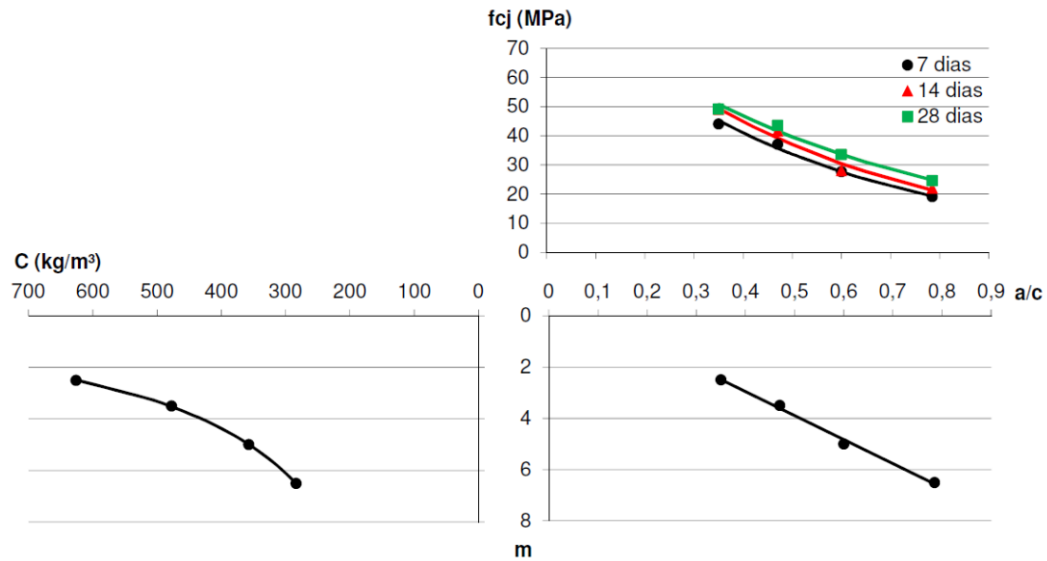
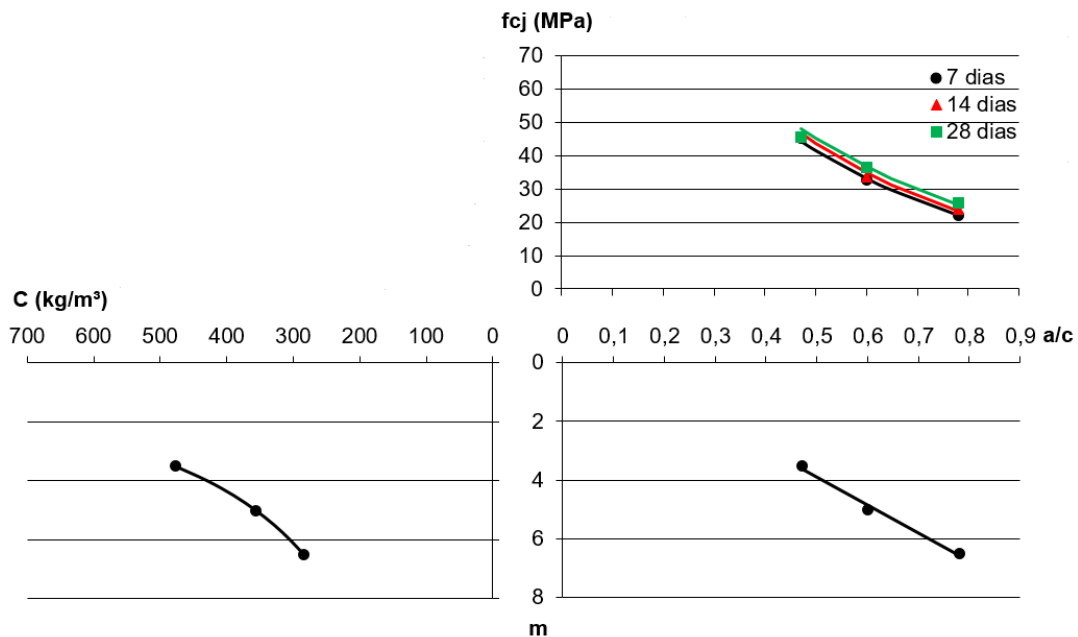


Figura E.2 – Diagrama de dosagem do 1º concreto autoadensável



Não foi possível fazer o diagrama de dosagem para os outros concretos, pois os mesmos não tiveram três traços ou mais produzidos.

ANEXO F – DETERMINAÇÃO DO ESQUELETO GRANULAR ATRAVÉS DO ENSAIO DE MASSA UNITÁRIA NO ESTADO COMPACTADO

A determinação dos percentuais adequados, entre os agregados, graúdo e miúdo, foi obtida encontrando-se as massas unitárias para as diversas combinações de percentuais dos dois agregados, fazendo cada um variar de 0% a 100%. Na combinação onde se encontra a maior massa unitária, nesse ponto, fica determinado tais percentuais de agregados, o menor volume de vazios das diversas combinações, e conseqüentemente, o menor volume de pasta da mistura de concreto. Primeiramente fez-se a composição entre a brita diâmetro máximo 12,5 mm e a areia britada. Com a proporção obtida fez-se a composição desse material obtido com a areia natural (módulo de finura=1,25). Por fim com a proporção obtida para esse material fez-se a composição com o fíler calcário. Os resultados obtidos para cada composição estão demonstrados abaixo

- **1ª composição:** 50% de brita diâmetro máximo 12,5 mm e 50% areia artificial = **material 1**

- **2ª composição:** 80% material 1 e 20% areia natural (módulo de finura=1,25) ou seja 40% de brita diâmetro máximo 12,5 mm, 40% areia artificial e 20% areia natural (módulo de finura=1,25) = **material 2**

- **3ª composição:** 85% material 1 e 15% fíler calcário ou seja 32% de brita diâmetro máximo 12,5 mm, 32% areia artificial, 16% areia natural (módulo de finura=1,25) e 15% de fíler calcário = **material 3**

Se faz necessário frisar que a proporção de materiais obtidas para o 1ª CAA foi fixada para todos os concretos autoadensáveis produzidos, sendo feita somente a substituição dos agregados miúdos, como especificado na metodologia dessa pesquisa.