



Universidade de Brasília

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO ADITIVO
MODIFICADOR DE VISCOSIDADE NAS PROPRIEDADES
DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL**

**VICTOR LUDOVICO DE ALMEIDA
WILSON FLEXEIRAS DE OLIVEIRA EVARISTO**

ORIENTADORA: VALDIRENE MARIA SILVA CAPUZZO

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA
CIVIL**

BRASÍLIA / DF: {12 / 2017}

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

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO ADITIVO
MODIFICADOR DE VISCOSIDADE NAS PROPRIEDADES
DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL**

VICTOR LUDOVICO DE ALMEIDA
WILSON FLEXEIRAS DE OLIVEIRA EVARISTO

**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:

Prof.^a Valdirene Maria Silva Capuzzo, DSc. (ENC-UnB)
(ORIENTADORA)

Prof.^o Claudio Henrique de Almeida Feitosa Pereira, DSc. (ENC-UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

Prof.^a Andréa Prado Abreu Reis Liserre, DSc. (FAU-UnB)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 06 de DEZEMBRO de 2017.

FICHA CATALOGRÁFICA

DE ALMEIDA, VICTOR LUDOVICO
EVARISTO, WILSON FLEXEIRAS DE OLIVEIRA
AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO ADITIVO MODIFICADOR DE
VISCOSIDADE NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL [Distrito
Federal] 2017.x, 85p. 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2017)
Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Concreto autoadensável	2. Estado fresco e endurecido
3. Aditivos Químicos	4. Aditivo Modificador de Viscosidade
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALMEIDA, V. L.; EVARISTO, W. F. de O. (2017) Avaliação da Influência do Aditivo Modificador de Viscosidade nas Propriedades do Concreto Autoadensável, Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 85 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Wilson Flexeiras de Oliveira Evaristo e Victor Ludovico de Almeida.

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Avaliação da influência do aditivo modificador de viscosidade nas propriedades do concreto autoadensável.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2017

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.

Wilson Flexeiras de Oliveira Evaristo

SQN 316 BLOCO H AP 514

70775080 – Brasília/DF – Brasil

Victor Ludovico de Almeida

SQS 214 BLOCO F AP 407

70293060 – Brasília/DF – Brasil

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	IMPORTÂNCIA DO TEMA E JUSTIFICATIVA	12
1.2	OBJETIVO GERAL	13
1.2.1	Objetivos Específicos.....	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	CONCRETO AUTOADENSÁVEL	15
2.1.1	Materiais componentes do CAA	15
2.1.1.1	Cimento Portland	16
2.1.1.2	Água.....	16
2.1.1.3	Agregados	16
2.1.1.4	Adições Minerai s	17
2.1.1.5	Aditivos químicos	17
2.1.1.5.1	Aditivo superplastificante.....	18
2.1.1.5.2	Aditivo modificador de viscosidade (VMA)	22
2.2	MÉTODO DE DOSAGEM.....	24
2.3	PROPRIEDADES DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL.....	26
2.3.1	Propriedades no estado fresco.....	26
2.3.1.1	Habilidade de preenchimento.....	27
2.3.1.2	Habilidade passante.....	27
2.3.1.3	Estabilidade.....	27
2.3.2	Propriedades no estado endurecido.....	27
2.3.2.1	Resistência à compressão.....	28
2.3.2.2	Módulo de elasticidade	28
2.3.2.3	Absorção	29
3	METODOLOGIA	30
3.1	SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS	32

3.1.1	Cimento Portland	32
3.1.2	Agregados	33
3.1.1	Aditivos superplastificante e aditivo modificador de viscosidade (VMA)	36
3.2	DOSAGEM DO CAA	42
3.3	ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CAA.....	45
3.3.1	Ensaio no estado fresco	45
3.3.1.1	Ensaio do Funil-V	45
3.3.1.2	Ensaio de Espalhamento	46
3.3.1.3	Ensaio da Caixa-L.....	49
3.3.2	Ensaio no estado endurecido	51
3.3.2.1	Resistência à Compressão Simples	51
3.3.2.2	Resistência à Tração por compressão diametral	51
3.3.2.3	Módulo de Elasticidade.....	51
3.3.2.4	Absorção de Água por Imersão.....	52
3.4	ENSAIO NA PASTA DE CIMENTO	52
3.4.1	Análise termogravimétrica.....	52
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	54
4.1	ESTADO FRESCO	54
4.2	ESTADO ENDURECIDO	63
4.2.1	Resistência à compressão.....	63
4.2.2	Resistência à tração por compressão diametral	68
4.2.3	Módulo de elasticidade	70
4.2.4	Índice de Absorção.....	71
4.2.5	Comparação com as estimativas propostas pela NBR 6118:2014.....	72
4.3	PASTA DE CIMENTO	73
4.3.1	Análise Termogravimétrica.....	73
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	74

5.1	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	75
6	REFERÊNCIAS	76
7	ANEXOS – ESTADO ENDURECIDO	84

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Classes de aditivos superplastificantes.....	18
Tabela 2.2 - Grupos de VMAs conforme composição química.....	22
Tabela 2.3 - Categorias de agregados conforme diâmetro máximo nominal.....	25
Tabela 2.4 - Conteúdo de finos sugerido de acordo as estimativas de resultado do Ensaio de Espalhamento.	26
Tabela 2.5 - Traço inicial do CAA.....	26
Tabela 3.1 - Traços de CAA realizados no projeto.....	30
Tabela 3.2 - Caracterização do cimento.....	32
Tabela 3.3 - Caracterização dos agregados miúdos e gráudo.....	33
Tabela 3.4 – Principais características dos aditivos químicos.....	37
Tabela 3.5 - Parâmetros do ensaio de potencial zeta.....	39
Tabela 3.6 - Potencial zeta dos aditivos químicos.....	39
Tabela 3.7 – Traço utilizado na dosagem do CAA.....	43
Tabela 3.8 – Parâmetros de dosagem do CAA.....	44
Tabela 3.9 - Classes de CAA de acordo com o Espalhamento.	47
Tabela 3.10 - Classes de viscosidade plástica aparente.....	48
Tabela 3.11 - Classes de IEV.....	49
Tabela 3.12 - Classes da habilidade passante (Caixa-L).....	50
Tabela 3.13 - Intervalos de temperatura característica dos produtos de hidratação.....	53
Tabela 4.1 - Resultados dos ensaios no estado fresco.....	54
Tabela 4.2 - Quantidade de corpos de prova utilizados nos ensaios.....	63
Tabela 4.3 - Resultados de resistência à compressão.....	64
Tabela 4.4 - Módulo de elasticidade dos traços do projeto.....	70
Tabela 4.5 - Resultados do ensaio de absorção por imersão.....	71
Tabela 4.6 – Comparação com os resultados teóricos da NBR 6118:2014.....	73
Tabela 7.1 – Resultados de Resistência à compressão simples.....	84
Tabela 7.2 – Resultados de Resistência à tração por compressão diametral.....	84
Tabela 7.3 – Resultados do Módulo de Elasticidade.....	85
Tabela 7.4 – Resultados do Índice de Absorção por Imersão.....	85

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Estrutura molecular dos policarboxilatos éster.....	20
--	----

Figura 2.2 - Interação entre as partículas de cimento e o polímero.....	21
Figura 3.1 - Programa Experimental	31
Figura 3.2 - Curva granulométrica da Areia 1	34
Figura 3.3 - Curva granulométrica da Areia 2	34
Figura 3.4 - Curva granulométrica da composição das areias.....	35
Figura 3.5 - Curva granulométrica da brita de diâmetro máximo de 12,5 mm.	36
Figura 3.6 – Analisador de potencial zeta, Laboratório de Análises de Águas da Universidade de Brasília.....	39
Figura 3.7 - Contagem total de partículas para os valores de potencial zeta – SP ₁	40
Figura 3.8 - Contagem total de partículas para cada valor de potencial zeta – SP ₂	41
Figura 3.9 - Contagem total de partículas para cada valor de potencial zeta - VMA	41
Figura 3.10 - Contagem total de partículas para cada valor de potencial zeta – SP _{VMA}	41
Figura 3.11 - Funil-V	Erro! Indicador não definido.
Figura 3.12 - Aparato para realização do ensaio de espalhamento.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 3.13 - Critérios de avaliação qualitativa da estabilidade visual	48
Figura 3.14 - Caixa-L	Erro! Indicador não definido.
Figura 4.1 – Índice de estabilidade visual - Traço T1 = SP1-REF.....	57
Figura 4.2 - Índice de estabilidade visual - Traço T2 = SP1-0,5VMA	57
Figura 4.3 - Índice de estabilidade visual - Traço T3 = SP1-1,5VMA	58
Figura 4.4 - Índice de estabilidade visual - Traço T4 = SP2-0,5VMA	58
Figura 4.5 - Índice de estabilidade visual - Traço T5 = SP2-1,5VMA	59
Figura 4.6 - Índice de estabilidade visual - Traço T6 = SP _{VMA}	59
Figura 4.7 - Resultados do ensaio de espalhamento.....	60
Figura 4.8 - Resultados do ensaio T500.....	61
Figura 4.9 - Resultados do ensaio de funil-v.....	62
Figura 4.10 - Comparação da resistência à compressão dos traços T1, T2 e T3	64
Figura 4.11 - Comparação da resistência à compressão dos traços T1, T3 e T5	65
Figura 4.12 - Comparação da resistência à compressão dos traços T1 e T6.....	66
Figura 4.13 – Desempenho dos traços do projeto em relação à compressão	67
Figura 4.14 - Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	68
Figura 4.15 -Desempenho dos traços do projeto em relação à tração	69
Figura 4.16 – Desempenho dos traços em relação ao módulo de elasticidade	70

Lista de Símbolos

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
CAA	concreto autoadensável ou referência de concreto autoadensável
CH	hidróxido de cálcio
CSH	silicato hidratado de cálcio
EFNARC	<i>The European Federation of Specialist Construction Chemical and Concrete Systems</i>

RESUMO

A autoadensabilidade do concreto é garantida pelo alcance de alta fluidez, da habilidade de passar por obstáculos sem sofrer bloqueio e da resistência à segregação. No entanto, tal fluidez pode causar efeitos de segregação do agregado e de exsudação da água, os quais podem ser controlados com a incorporação de aditivos modificadores de viscosidade. A presente pesquisa avaliou de forma quantitativa a influência de aditivos químicos, com foco no aditivo modificador de viscosidade. Com a utilização de dois tipos de aditivos superplastificantes, sendo um deles usado no traço de referência, foi incorporado o aditivo modificador de viscosidade, nos teores de 0,5% e 1,5% do peso do cimento. Ainda, foi confeccionado outro traço com a utilização de um aditivo experimental que atua como superplastificante e modificador de viscosidade. De forma a atingir esse escopo, no estado fresco, foram realizados os ensaios de espalhamento, caixa-L e funil-V. Para caracterizar o atingimento da autoadensabilidade na caixa-L, foi fixado o valor de 0,85 para o parâmetro HP. Já no estado endurecido, foi executado o ensaio de resistência à compressão simples nas idades de 7, 14 e 28 dias. Além deste, foram realizados os ensaios de tração por compressão diametral, de módulo de elasticidade e de absorção por imersão na idade de 28 dias. Os resultados desta pesquisa mostraram que o aditivo modificador de viscosidade (VMA), atuando juntamente com os aditivos superplastificante, produziu traços com propriedades no estado fresco variáveis. Nas propriedades mecânicas, o superplastificante de referência em conjunto com o incremento de VMA gerou, em relação ao traço referência, diminuição da resistência à compressão e da resistência à tração.

Palavras chave: Concreto autoadensável, aditivos químicos, aditivo modificador de viscosidade, estado fresco, estado endurecido.

1 INTRODUÇÃO

A procura por materiais que tornem a execução de obras na construção civil mais econômicas, sustentáveis e resultando em estruturas com mais alto desempenho tem motivado diversos avanços na tecnologia do concreto. Exemplo disso é o concreto autoadensável (CAA), o qual tornou-se, nas duas últimas décadas, um dos principais progressos nesse campo (GOMES; BARROS, 2009).

O início dos estudos a respeito do CAA ocorreu no Japão, quando a questão da durabilidade das estruturas se tornou um problema a ser resolvido. Estruturas duráveis de concreto necessitam de compactação adequada do material em seu estado fresco, o que torna necessária a presença de funcionários especializados na obra para tal objetivo (NEVILLE, 1997). A redução do número desses funcionários na indústria do país e a baixa trabalhabilidade dos materiais existentes, o que também prejudicava o processo de adensamento, motivou a concepção do CAA em estudos coordenados pelo professor Hajime Okamura, na década de 1980 (BILLBERG, 1999).

A partir dos estudos iniciais e do uso do primeiro protótipo obtido em 1988 por Ozawa, várias pesquisas e publicações foram realizadas no Japão, inclusive com aplicações de CAA *in loco*. Sendo crescente o interesse em todo o mundo por estruturas mais duráveis e de maior desempenho, não demorou para que estudos a respeito do CAA surgissem na Europa e, posteriormente, na América do Sul, especificamente no Brasil, onde, atualmente, as pesquisas e trabalhos publicados em congressos e seminários tem crescido a cada dia (GOMES; BARROS, 2009).

Para que seja considerado um concreto autoadensável, o material deve possuir elevada fluidez, viscosidade e coesão entre os seus componentes, a fim de que se possa garantir as principais propriedades de autoadensabilidade: a habilidade de preenchimento das formas sobre o efeito apenas de seu peso próprio; a habilidade de passar entre obstáculos, tais como armaduras, sem sofrer bloqueio; a manutenção da estabilidade até o momento posterior ao lançamento, sem que haja segregação de seus componentes. Além disso, o material deve também atender aos mesmos requisitos de resistência e durabilidade dos concretos convencional e de alto desempenho (GOMES; BARROS, 2009).

Para tanto, torna-se necessário um estudo da proporção dos materiais constituintes do CAA. Essa tarefa torna-se complexa tendo em vista a grande variabilidade dos materiais constituintes e a necessidade de um maior controle tecnológico da dosagem para garantir ao atendimento das propriedades de autoadensabilidade.

A obtenção do concreto autoadensável se dá via: a utilização de um percentual de finos maior do que o usual; a obtenção de viscosidade apropriada por intermédio de um aditivo; o uso de uma relação água/cimento próxima de 0,4; a utilização de aditivo superplastificante; a adoção de agregados com textura e formato apropriados; por fim, o uso de percentual menor de agregado graúdo (geralmente corresponde a percentual de 50% o volume absoluto de sólidos) (NEVILLE, 1997).

Os métodos de dosagem baseados nessas premissas são, em geral, empíricos e se diferem das dosagens utilizadas em concretos convencionais por possuírem quantidades elevadas de aditivos químicos e minerais e por empregarem ensaios não muito usuais (GOMES, 2009; EFNARC, 2005).

1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA E JUSTIFICATIVA

O presente trabalho está inserido na linha de pesquisa da Prof. Dr. Valdirene Maria Silva Capuzzo da Universidade de Brasília acerca de concretos autoadensáveis, o que justifica a escolha dos materiais adotados nos ensaios e suas dosagens correspondentes no traço do concreto produzido.

A Prof. Dr. Valdirene Maria Silva Capuzzo tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Materiais de Construção Civil, atuando principalmente nos seguintes temas: concreto convencional, concretos especiais, durabilidade de concreto, reaproveitamento de resíduos sólidos e avaliação de novos materiais para aplicação em concreto.

Para que sejam atendidas as propriedades que tornam o concreto autoadensável, é necessária maior preocupação no processo de dosagem e definição de seus materiais componentes. A exigência de elevada fluidez do material em seu estado fresco, por exemplo, motiva a introdução de adições de finos na composição, tais como o fíler calcário (GOMES; BARROS, 2009).

No entanto, a adição de tais materiais finos pode ser indesejável, uma vez que dimensões menores dos componentes resultam em uma área superficial maior, aumentando o consumo de água da mistura. Nessas situações, o uso de finos pode ser substituído pela utilização de aditivos modificadores de viscosidade (VMA), aditivos químicos que, somados à composição do CAA, melhoram suas propriedades reológicas.

Desta forma, justifica-se a pesquisa pelas vantagens que essa categoria de aditivo traz para o concreto autoadensável, motivando o estudo da influência em suas propriedades. Segundo Sakata (1996), a adição de agente de viscosidade no concreto estabiliza a fluidez, fazendo o material fluir facilmente em pequenos espaços e possibilitando, assim, o atingimento da propriedade de autoadensibilidade. Além disso, o VMA é vantajoso em produções de larga escala, uma vez que reduz a sensibilidade da mistura às variações nas proporções de dosagem (DOMONE e CHAI, 1996). Por fim, cabe ressaltar que aditivos modificadores de viscosidade também são utilizados como reforços na estabilidade do concreto, juntamente com aditivos superplastificantes (KHAYAT e GUIZANI, 1997).

1.2 OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa avaliou a influência da utilização do aditivo modificador de viscosidade nas propriedades do concreto autoadensável. Ademais, foi avaliada a influência de outros dois tipos de aditivo superplastificante, sendo que um destes também atua como modificador de viscosidade.

1.2.1 Objetivos Específicos

A fim de cumprir com o proposto no objetivo geral deste projeto, foram executados seis traços de concreto utilizando quatro aditivos químicos diferentes: dois aditivos superplastificantes, um aditivo modificador de viscosidade e um aditivo experimental que atua como superplastificante e modificador de viscosidade. O traço de referência foi dosado somente com um aditivo superplastificante de referência, o qual é comumente usado nas pesquisas sobre CAA na Universidade de Brasília. Os teores dos aditivos superplastificantes deste projeto foram definidos de forma a obter-se o valor de $0,85 \pm 0,05$ para o parâmetro HP do ensaio de Caixa L. Essa premissa foi adotada para adequar-se à linha de pesquisa Prof. Dr. Valdirene Maria Silva Capuzzo acerca de concretos autoadensáveis. Os teores de VMA utilizados foram escolhidos de acordo com os teores recomendados pelo fabricante. Os objetivos específicos estão abaixo relacionados.

Para avaliar as características no estado fresco do concreto autoadensável foram realizados os seguintes ensaios: ensaio de espalhamento (*slump flow test*); ensaio da caixa L (*L-Box test*); ensaio do funil V (*V-Funnel test*).

A avaliação das propriedades do CAA no estado endurecido foi feita por intermédio da realização dos ensaios de resistência à compressão simples, de tração por compressão diametral, de módulo de elasticidade e de absorção de água por imersão.

Ademais, para avaliar o comportamento da hidratação do cimento, mais especificamente a presença dos produtos da reação de hidratação do cimento Portland como o hidróxido de cálcio (CH) e o silicato de cálcio hidratado (CSH), realizou-se o ensaio de termogravimetria.

A comparação das características, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, possibilitou a análise da influência da utilização do aditivo modificador de viscosidade nas principais propriedades do CAA.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONCRETO AUTOADENSÁVEL

Assim como outros concretos especiais, o concreto autoadensável é um material referenciado como uma evolução tecnológica dos concretos convencionais, fruto de pesquisa a respeito da proporção dos materiais constituintes e do desenvolvimento de aditivos superplastificantes com ação de dispersão, responsáveis pela alta fluidez do CAA, e de aditivos modificadores de viscosidade com ação coesiva, responsáveis pelo controle da viscosidade, em conjunto com um percentual adequado de materiais finos. Essa tecnologia permite a confecção de um concreto que pode ser compactado em todos os cantos de uma fôrma, sem precisar utilizar-se de equipamentos de vibração, característica desejável na concretagem de estruturas com elevada taxa de armadura e formas complexas, onde o acesso dos vibradores seria de difícil execução (GOMES; BARROS, 2009; NEVILLE, 1997).

Desta forma, caracteriza-se o material pelas já citadas propriedades de autoadensamento, satisfeitas em seu estado fresco: a habilidade de preenchimento e de passagem entre obstáculos sem que ocorram os processos de segregação e exsudação. Tais propriedades são influenciadas por diversos mecanismos que devem estar presentes no material. Para que seja atendida a propriedade de preenchimento, o concreto deve possuir alta fluidez e coesão da mistura, a fim de que possua fluxo suficiente para ocupar todos os espaços somente pelo efeito de seu peso próprio. A viscosidade da pasta e as características dos agregados influem na propriedade de passagem por obstáculos, tais como armaduras e diminuições de seções (GOMES; BARROS, 2009).

2.1.1 Materiais componentes do CAA

O concreto autoadensável possui composição idêntica ao concreto convencional, salvo algumas alterações relacionadas às propriedades no estado fresco e às propriedades plásticas ou, ainda, com a incorporação de aditivos e adições como parte de seus materiais componentes (GOMES, BARROS; 2009).

2.1.1.1 Cimento Portland

As especificações normativas não restringem a escolha da tipologia do cimento Portland a ser utilizado na concepção da dosagem de um concreto autoadensável (GOMES; BARROS, 2009; EFNARC, 2005). A EFNARC (2005) afirma que a escolha do tipo de cimento a ser utilizado depende mais da finalidade de sua aplicação e do material disponível para utilização do produtor do concreto do que das especificações normativas do CAA.

Segundo Gomes e Barros (2009), a quantidade de cimento do CAA está em torno de 200 a 450 kg/m³, dependendo da utilização de adições reativas ou inertes. Ademais, cuidados adicionais devem ser adotados para dosagens superiores a 500kg/m³ devido à possibilidade de ocorrência de problemas de retração. Para as dosagens inferiores a 300 kg/m³, há a necessidade de incorporar outro material cimentício à composição do CAA.

2.1.1.2 Água

A água utilizada para a produção de concreto autoadensável segue as mesmas recomendações da água utilizada na confecção de concretos convencionais, tendo sua quantidade definida a partir das propriedades requeridas e relacionada à quantidade de material fino presente, podendo apresentar valores diferenciados, de acordo com o método de dosagem adotado. Cabe ressaltar que, no CAA, o uso de aditivos superplastificantes influencia no teor de água da mistura (GOMES; BARROS, 2009; EFNARC, 2005).

2.1.1.3 Agregados

As mesmas normas para os agregados são aplicáveis ao concreto autoadensável e ao concreto convencional (GOMES; BARROS, 2009; ACI, 2007). O tamanho nominal máximo do agregado graúdo deve ser escolhido com intuito de obter as propriedades aceitáveis para o concreto no estado fresco. A forma das partículas do agregado influi na capacidade de preenchimento do concreto. Optar por partículas de tamanhos e formas distintas é, geralmente, benéfico para as características da mistura (ACI, 2007).

De acordo com a EFNARC (2005), o uso de agregados previamente lavados garante a obtenção de um material mais consistente. Além do mais, a procedência dos materiais a serem utilizados para a composição do concreto deve ser levada em consideração, pois há a possibilidade de mudanças consideráveis nas propriedades do concreto devido à utilização de matérias de proveniências díspares.

2.1.1.4 Adições Minerais

As adições minerais são materiais inorgânicos finamente moídos que são incorporados ao CAA com a finalidade de se obter características específicas ou melhorar certas propriedades (EFNARC, 2005). Ao contrário dos aditivos químicos e do cimento, que possuem custo elevado, o emprego de adições minerais contribui para tornar o material mais econômico e sustentável, propiciando redução do uso do clínquer. Além disso, a incorporação dos finos no concreto também propicia a redução do calor de hidratação, ajuda a evitar a presença de fissuras internas no concreto e melhora a microestrutura do material, preenchendo os poros de menor escala e aumentando a viscosidade, o que reduz a fricção entre os agregados e, conseqüentemente, aumenta a resistência à segregação e à exsudação (GOMES; BARROS, 2009).

Esses materiais podem ser inertes, quando agem fisicamente no concreto, melhorando a propriedade de compacidade; ou quimicamente ativos, reagindo com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) durante a reação de hidratação do cimento (TUTIKIAN E DAL MOLIN, 2008).

Dentre as principais adições minerais utilizadas para obtenção do concreto autoadensável, pode-se citar o fíler calcário, a cinza volante, a pozolana natural, a sílica ativa, a cinza de casca de arroz e o metacaulim.

2.1.1.5 Aditivos químicos

Aditivos químicos são produtos adicionados, em pequena quantidade, a concretos e argamassas, a fim de garantir melhorias das propriedades da mistura no estado fresco e no estado endurecido (LISBOA, 2004). Tais materiais são essenciais na composição do concreto autoadensável, possibilitando o alcance das propriedades necessárias, não contempladas em concretos convencionais.

Os aditivos geralmente usados nesse tipo especial de concreto são os aditivos superplastificantes, que visam a garantir a propriedade de alta fluidez, e os aditivos modificadores de viscosidade, que possuem ação coesiva e são principal foco de estudo deste projeto.

2.1.1.5.1 Aditivo superplastificante

A norma ABNT NBR 11768:2011 define aditivo superplastificante como aditivo que, sem modificar a consistência do concreto no estado fresco, permite reduzir seu conteúdo de água; ou como aquele que, sem alterar a quantidade de água, modifica a consistência do concreto, aumentando o abatimento e a fluidez. Essa norma determina diferentes classes de aditivos superplastificante, conforme a Tabela 2.1 que segue.

Tabela 2.1 - Classes de aditivos superplastificantes

Classificação dos aditivos superplastificantes
SP - I N superplastificante do tipo I (mínimo 12% de redução de água)
SP – I R superplastificante I e retardador do tempo de pega;
SP – I A superplastificante I e acelerador do tempo de pega.
SP - II N superplastificante tipo II (mínimo 20% de redução de água)
SP – II R superplastificante II e retardador do tempo de pega;
SP – II A superplastificante II e acelerador do tempo de pega.

Fonte: ABNT NBR 11768:2011.

Para o CAA, procura-se utilizar esse tipo de aditivo com a segunda definição da norma, visando a obter elevados níveis de fluidez, baseando-se no poder do aditivo de dispersar as partículas de cimento e impedir a consequente floculação destas (GOMES; BARROS, 2009).

Os aditivos superplastificantes são polímeros orgânicos solúveis em água, que possuem moléculas longas e de massa molecular elevada. Esses aditivos são obtidos sinteticamente por intermédio de processo de polimerização complexo. Os aditivos superplastificantes de primeira geração foram concebidos à base de condensados sulfonados de naftaleno-formaldeído e/ou condensados sulfonados de melanina-formaldeído, dispersantes poliméricos baseados na repetição de uma única unidade, o que limita as variações de sua estrutura molecular. A nova geração de aditivos superplastificantes é à base de policarboxilatos com moléculas de poliéteres. Esses aditivos baseiam-se em duas ou mais unidades estruturais, dessa forma, há maior variabilidade para estruturas moleculares (YAMADA *et al*, 2000; VICKERS JR. *et al*, 2005).

Na ausência de dispersantes, as partículas de cimento tendem a aglomerar ao entrar em contato com a água, devido a diversos tipos de interação, quais sejam: forças de atração entre as partículas (forças de van der Waals), forças eletrostáticas e interação entre as moléculas de água e dos hidratos. A aglomeração das partículas implica na retenção de parte da água de mistura e, por conseguinte, gera uma rede de canais entre essas. Esta rede de vazios tende a reter água que, conseqüentemente, fica indisponível para hidratar a superfície das partículas de cimento e para fluidificar a mistura. Portanto, com a utilização de dispersantes, pode-se evitar a sedimentação de partículas e a conseqüente segregação de fases (AİTCIN *et al*, 1994).

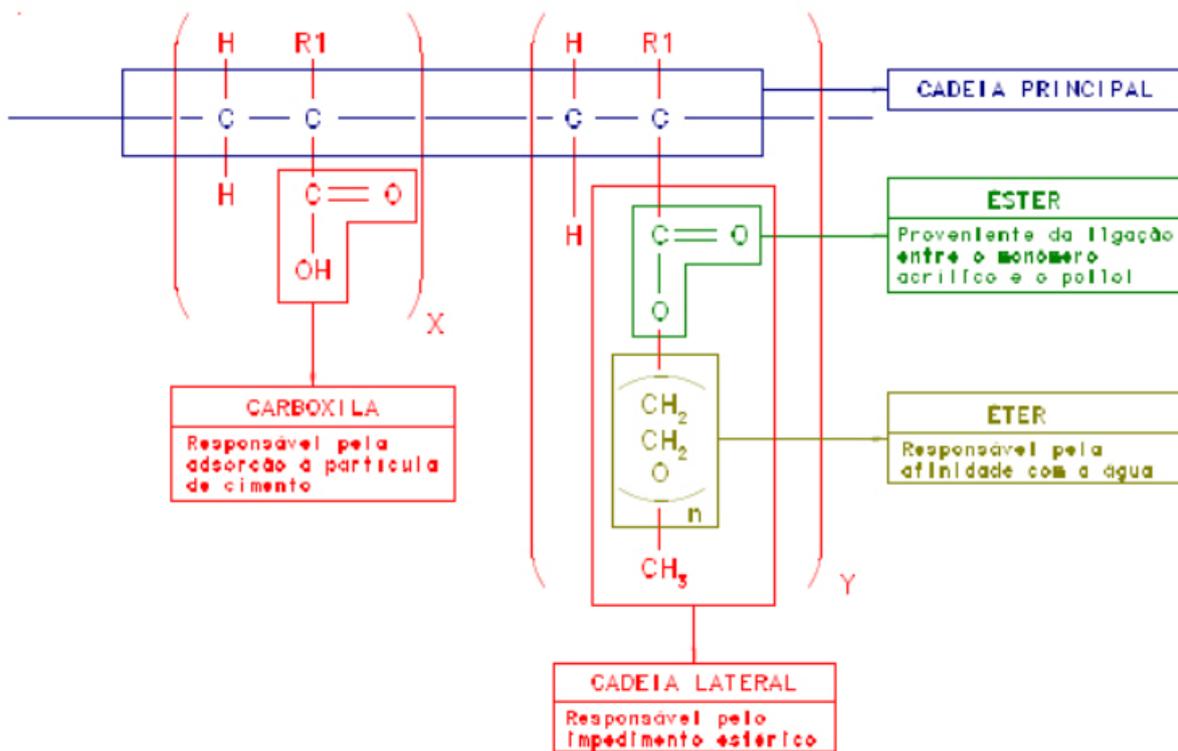
A dispersão, resultado da ação dos aditivos na mistura, faz com que a área superficial das partículas de cimento esteja mais disponível para que ocorra o contato com a água de mistura. Com isso, há recrudescimento da taxa de hidratação e, conseqüentemente, aumento da resistência inicial da matriz de cimento (YOUSUF *et al*, 1995; HOVER, 1998).

Estudos realizados por Yamada (2000) sobre a estrutura química dessa categoria de aditivos indicam que, para a mesma dosagem do aditivo, o maior tamanho da cadeia do polímero pode ser relacionado à maior fluidez e ao menor tempo de pega da mistura. Com relação à dosagem, existem teores máximos de aditivo superplastificante para se obter uma mistura fluida, acima dos quais efeitos indesejáveis como exsudação e segregação podem ocorrer.

Neste projeto, foram utilizados três aditivos superplastificantes à base de policarboxilatos (SP₁, SP₂ e SP_{VMA}). Vale ressaltar que o aditivo SP_{VMA} também atua como modificador de viscosidade. Os dispersantes à base de policarboxilatos são polímeros de estrutura combinada, composta por uma cadeia principal, que se adsorve às partículas do aglomerante e por cadeias laterais de comprimentos diversos, estas são neutras e agem de forma a estabilizar o sistema por impedimento estérico (FLATT *et al.*, 2009).

A cadeia principal é composta pela polimerização do monômero ácido acrílico ou metacrílico e possui carga negativa devido à presença de grupos carboxílicos. Parte do grupo funcional da cadeia principal é esterificada por poliálcoois, que se constituem nas cadeias laterais de óxido de polietileno (ROJAS; CINCOTTO, 2013). Na Figura 2.1, é apresentado um modelo da estrutura molecular dos policarboxilatos éster.

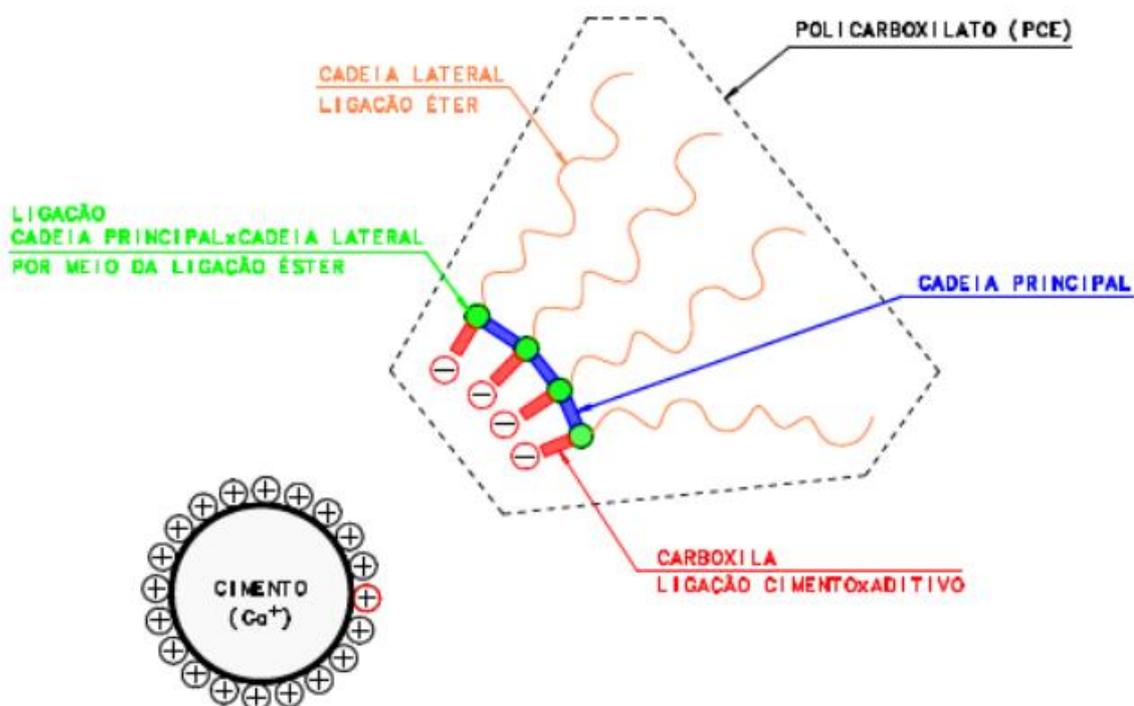
Figura 2.1 - Estrutura molecular dos policarboxilatos éster



Fonte: (ROJAS; CINCOTTO, 2013).

A molécula do policarboxilato-éster (PCE), por intermédio dos grupos carboxílicos presentes em sua estrutura, adsorve-se à superfície das partículas de cimento (ou dos produtos da hidratação deste). Essa interação é de origem eletrostática. Devido ao fato de as cadeias laterais apresentarem afinidade com a solução gerada nas idades iniciais do processo de hidratação, essas cadeias agem de forma a dispersar, devido à presença dos grupos éter, as partículas de cimento por repulsão estérica (ALONSO *et al.*, 2007; GRIESSER, 2002; HUI *et al.*, 2007; PLANK; SACHSENHAUSER, 2009). Na Figura 2.2, é apresentado o esquema do mecanismo de dispersão das partículas de cimento.

Figura 2.2 - Interação entre as partículas de cimento e o polímero



Fonte: (ROJAS; CINCOTTO, 2013).

O desempenho dos aditivos e a capacidade destes adsorverem-se às partículas de cimento dos aditivos é determinada pelos seguintes parâmetros: a interação eletrostática da macromolécula com o cimento e a densidade de carga aniônica desta, ambas proporcionais à quantidade de grupos carboxílicos da cadeia principal; e o comprimento das cadeias laterais, que determina a espessura da camada de polímero que se forma em volta dos grãos e o tipo de interação entre as partículas adsorvidas pelas cadeias dos polímeros, que, por sua vez, resultam na repulsão estérica entre as partículas de cimento (PLANK *et al.*, 2008; PLANK; SACHSENHAUSER, 2009; WINNEFELD *et al.*, 2007a).

Estudos demonstram que os aditivos a base de poliacrilatos agem de forma a retardar a hidratação do cimento, uma vez que esses induzem a formação de uma camada que envolve os grãos, esta acaba por impedir o contato das partículas com a água e, por conseguinte, a dissolução destas (UCHIKAWA; SAWAKI; HANEHARA, 1997). O grau com o qual aditivos compostos por poliacrilatos retardam a pega e o enrijecimento dos produtos gerados na hidratação depende da estrutura molecular do composto químico, sendo que aqueles que possuem maior densidade de carga aniônica tendem a produzir maior retardo gerado no processo de hidratação do aglomerante (WINNEFELD *et al.*, 2007b; ZINGG *et al.*, 2009).

2.1.1.5.2 Aditivo modificador de viscosidade (VMA)

Apesar da característica de alta trabalhabilidade, o concreto autoadensável deve manter-se estável durante os processos de transporte e lançamento, devendo apresentar certa resistência à segregação. Para tanto, é necessário controlar a coesão e a viscosidade da mistura (MARANGON, 2006).

A fim de atingir esse objetivo, muitas vezes são adicionados materiais finos à composição do material. Entretanto, isso gera um concreto com área superficial das partículas maior, ocasionando em maior consumo de água, além de causar desuniformidade na mistura, consequência da variação granulométrica. Dessa forma, pode-se substituir os finos por aditivos modificadores de viscosidade (VMA) (TUTIKIAN E DAL MOLIN, 2008).

Segundo Rixom e Mailvaganam (2009), os VMA são produtos formados por polímeros de cadeias longas, sendo divididos, de acordo com sua composição química, em três grupos, conforme apresentado na Tabela 2.2:

Tabela 2.2 - Grupos de VMAs conforme composição química

Grupos de aditivos modificadores de viscosidade conforme composição química
Sintéticos solúveis em água e polímeros orgânicos naturais (alcool polivinílico e poliacrilato)
Emulsões acrílicas
Polissacarídeos naturais solúveis em água, tais como: Xanthan gum, Guar gum, Welan gum; copolímeros de estireno com grupos carboxílicos e polieletrólitos sintéticos.

Fonte: RIXOM E MAILVAGANAM (2009).

Quanto aos mecanismos de ação, os modificadores de viscosidade podem atuar de duas formas: agindo sobre as partículas de finos, como é o caso dos VMAs à base de celulose e acrílico; ou atuando sobre a água livre da mistura, o que ocorre nos produtos à base de glicol e biopolímeros (AITCIN, 2000).

Quando a ação ocorre sobre as partículas de finos, o aumento da viscosidade gera redução da fluidez da pasta, uma vez que os finos serão adsorvidos pelo aditivo modificador de viscosidade, diminuindo o efeito dos agentes superplastificantes (YURUGI, 1995). Isso não acontece quando o processo ocorre atuando sobre a água livre do concreto, tornando esse tipo de VMA preferível para obtenção de um concreto com fluidez e viscosidade adequadas. Quando atua na água, o VMA promove viscosidade moderada por meio da formação de uma rede que detém a água e sustenta os agregados, fornecendo coesão ao mesmo tempo que evita os processos indesejáveis de segregação e exsudação (EFNARC, 2005).

Dessa forma, a utilização desse aditivo auxilia na obtenção das propriedades necessárias para que o concreto seja considerado autoadensável, gerando nele um comportamento pseudoplástico, ou seja, ocorre redução da viscosidade em função do aumento da taxa de cisalhamento aplicada. Como trata-se de um material fluido, com uma alta taxa de cisalhamento, a viscosidade diminui, facilitando o processo de lançamento. Sendo assim, após aplicação do concreto e redução das taxas de cisalhamento, a viscosidade tende a aumentar e garante a capacidade de retenção de água e de manutenção da sustentabilidade das partículas (MELO, 2005).

Além disso, o uso do VMA está associado a outras vantagens, entre as quais cabe citar: a maior flexibilidade na escolha de agregados e adições, uma vez que se reduz a desuniformidade granulométrica; a redução da influência dos outros materiais componentes nas propriedades de estabilidade e deformabilidade do estado fresco; a maior flexibilidade na seleção do modo de lançamento; a redução de vazios (MARANGON, 2006).

Pode-se ainda citar algumas desvantagens relacionadas à utilização dos agentes modificadores de viscosidade. Tutikian e Dal Molin (2008) afirmam que o desenvolvimento da resistência à compressão com o tempo pode ser prejudicado, o que caracteriza desvantagem em relação à adição de materiais finos. Segundo Rixom e Mailvaganam (1999), pode ocorrer também certa incorporação de ar no concreto, devido à capacidade do aditivo de reduzir a tensão superficial da água da mistura, além de uma eventual incompatibilidade com certos tipos de aditivos.

2.2 MÉTODO DE DOSAGEM

Existem vários métodos de dosagem para o concreto autoadensável, os quais têm por base princípios que buscam garantir a fluidez e estabilidade das misturas confeccionadas, com ausência de segregação (GOMES; BARROS, 2009). O método de dosagem utilizado neste projeto é o proposto pelo Instituto Americano de Concreto (ACI). Desta forma, apenas esse método será abordado.

De suma importância, é a obtenção de combinação dos constituintes do concreto a fim de prover a este uma pasta com deformabilidade para atender os requisitos de sua aplicação, enquanto mantém-se viscosidade para garantir a capacidade de passagem e a resistência à segregação (ACI, 2007).

A dosagem da mistura segue as seguintes etapas: seleção dos agregados que conferem a capacidade de passagem desejada; relação água cimento e relação argamassa/pasta que atribui a requerida capacidade de preenchimento. Essas etapas em conjunto com a adoção das adições e aditivos necessários, fornecerá o traço com as propriedades no estado fresco desejadas (ACI, 2007).

A seguir, apresenta-se as etapas para a dosagem do concreto autoadensável:

- Determinação dos requisitos para o ensaio de preenchimento;
- Seleção do agregado graúdo e sua proporção na mistura;
- Estimativa da quantidade de cimento Portland e de água;
- Cálculo do volume da pasta e da argamassa;
- Obtenção do traço.

A capacidade de passagem (ou espalhamento) do agregado graúdo pelas aberturas das armaduras de concreto depende do diâmetro nominal máximo das partículas do agregado e do volume de agregado na composição da mistura. O intuito é usar o maior volume de agregado e maior diâmetro nominal possíveis e, simultaneamente, garantir estabilidade, capacidades de passagem e de preenchimento do concreto no estado fresco (ACI, 2007).

Os fatores que influem no tamanho dos constituintes e na quantidade de agregado são: o espaçamento entre as barras de aço, a textura do agregado (forma arredondada ou angular) e a granulometria do agregado.

O Instituto Americano do Concreto define duas categorias de tamanho nominal máximo de agregados para CAA, as quais são apresentadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Categorias de agregados conforme diâmetro máximo nominal

Categorias de agregados para concretos autoadensáveis	
Categoria I	superior a 12,5 mm
Categoria II	Inferior a 12,5 mm

Fonte: ACI 237R-07.

A definição do conteúdo de agregado graúdo para a Categoria I é precedida pela determinação de sua densidade. Define-se que 50% do volume de concreto deve ser de agregado graúdo (OKAMURA e OUCHI, 1999). Inicialmente, em termos de volumes absolutos, adota-se uma porcentagem de 28% a 32% (0,21 m³ a 0,26 m³) do volume absoluto do metro cúbico da mistura.

A Categoria II é utilizada para casos específicos, os quais são destinados a estruturas em que há grande densidade de armaduras ou em situações que limitam as condições de execução do concreto. Adota-se a proporção inicial de 50% de areia e 50% de agregado graúdo (10 mm) de volume para definição do traço inicial. Após estabelecer as propriedades plásticas do traço inicial, pode-se fazer ajustes na relação areia/agregado.

O conteúdo de finos da mistura engloba o cimento, adições minerais e materiais que passam na peneira de n° 100 (0,150 mm). Para o CAA, a resistência à compressão pode não ser o principal fator na determinação da quantidade de cimento. O ACI define a quantidade de finos de 385 kg/m³ a 475 kg/m³. Para atingir maior capacidade de passagem e prevenir segregação, poderá ser necessário o incremento de água ou de finos.

O conteúdo de pasta refere-se a material cimentício ou outros finos, água, aditivos químicos e ar. Já o conteúdo de argamassa refere ao volume de pasta mais o volume de agregado fino que passa na peneira n° 8 (2,36 mm).

O resumo dos intervalos de dosagem dos materiais constituintes do CAA é apresentado na Tabela 2.4 e na Tabela 2.5 (ACI, 2007).

Tabela 2.4 - Conteúdo de finos sugerido de acordo as estimativas de resultado do Ensaio de Espalhamento.

	<i>“slump flow”</i> inferior a 550 mm	<i>“slump flow”</i> de 550 mm a 600	<i>“slump flow”</i> superior a 650 mm
Conteúdo de finos em kg/m³	355 a 385	385 a 445	458+

Fonte: ACI 237R-07.

Tabela 2.5 - Traço inicial do CAA.

Traço Inicial	
Conteúdo de pasta	34% a 40% (em relação ao volume total da mistura).
Conteúdo de argamassa	68% a 72% (em relação ao volume total da mistura).
Relação água/material cimentício	0,32 a 0,45
Volume absoluto de agregado graúdo	28% a 32% (para agregados de diâmetro superior a 12,5 mm).

Fonte: ACI 237R-07.

O percentual de pasta e argamassa tende a ser superior ao estabelecido para concreto convencionais, uma vez que é a fluidez da pasta e a capacidade de transporte da argamassa que conferem ao CAA as propriedades de passagem, preenchimento e estabilidade (ACI, 2007).

2.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL

2.3.1 Propriedades no estado fresco

A trabalhabilidade descreve a facilidade com a qual se pode realizar a mistura, o lançamento, a consolidação e o acabamento do concreto. A trabalhabilidade é descrita pelas habilidades passante e de preenchimento, ainda, pela estabilidade do material. A caracterização da trabalhabilidade é efetuada via ensaio específicos (EFNARC, 2005; ACI, 2007).

2.3.1.1 Habilidade de preenchimento

O preenchimento (escoamento não confinado) é a capacidade de o CAA escoar e preencher todos os espaços das formas, sob efeito do peso próprio (ACI, 2007). Esta propriedade é de suma importância para a seleção da técnica de lançamento e determinação do espaçamento das barras de aço das armaduras (NEVILLE, 2011).

2.3.1.2 Habilidade passante

A habilidade passante (escoamento confinado) refere-se a facilidade com a qual o concreto pode passar pelos obstáculos e espaços estreitos das formas sem que haja bloqueio (NEVILLE, 2011; GOMES; BARROS, 2009). O bloqueio está relacionado à condição que é decorrente da segregação local dos agregados na adjacência dos obstáculos, o que obsta o escoamento do concreto (ACI, 2007).

2.3.1.3 Estabilidade

A estabilidade alude à manutenção da homogeneidade da distribuição dos diversos constituintes durante o escoamento e lançamento. Há dois tipos de estabilidade, sendo elas a dinâmica e a estática. A estabilidade dinâmica é a resistência do concreto à separação de seus constituintes durante o lançamento nas formas. Já a estabilidade estática é a resistência do concreto à segregação, à perda de água pela superfície (exsudação), enquanto o concreto está no estado plástico (ACI, 2007).

2.3.2 Propriedades no estado endurecido

Tendo em vista que os mesmos materiais constituintes são utilizados no CAA e no concreto convencional, as propriedades mecânicas serão similares. A metodologia e procedimentos de análise empregados para o concreto convencional é usada para o autoadensável (GOMES; BARROS, 2009; ACI, 2007).

2.3.2.1 Resistência à compressão

O concreto autoadensável deve ser bastante fluido, porém precisa manter a coesão para resistir à segregação. Para garantir que isso ocorra, é necessário a adoção de relações água/cimento mais baixas em relação ao concreto convencional. Por conseguinte, obtém-se resistências à compressão superiores, sendo esta resistência na idade de 28 dias é, geralmente, maior do que o requerido para a estrutura de concreto (ACI, 2007).

Mesmo com relações a/c similares, um CAA modelado adequadamente pode apresentar maiores resistências à compressão em relação ao convencional. O recrudescimento do risco de segregação atuando junto com a falta de vibração pode promover uma microestrutura mais uniforme e uma menor porosidade na interface entre a pasta de cimento e as armaduras (ZHU et al. 2001).

Alguns estudos citam a influência da incorporação de aditivos modificadores de viscosidade no concreto autoadensável. Fu e Chung (1996) verificaram uma pequena diminuição da resistência à compressão, utilizando aditivos modificadores de viscosidade à base de celulose. Os trabalhos de Panesar e Shindman (2010) também constataram uma ligeira redução da resistência nos concretos com VMA.

2.3.2.2 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade do concreto está relacionado à resistência à compressão, ao tipo de agregado e seu conteúdo, e ao peso específico do concreto. Ajustes nas proporções da mistura, em especial a relação areia/agregados, vão influir no módulo de elasticidade do CAA (ACI, 2007).

Alguns estudos mostram que o módulo de elasticidade do CAA pode ser de 10% a 15% menor do que o do concreto convencional de resistência à compressão similar (BENNENK, 2002). Outros estudos mostram o oposto, ou seja, que o módulo de elasticidade do CAA coincide com o do convencional (PERSSON, 1999). O trabalho de Rezende (2016), pertencente à linha de pesquisas sobre concreto autoadensável da Prof. Dr. Valdirene Maria Silva Capuzzo, registrou pequena diminuição no valor do módulo do concreto autoadensável em relação a um concreto convencional de referência.

2.3.2.3 Absorção

Quando comparado com concretos convencionais, os concretos autoadensáveis apresentam maior potencial de durabilidade, mesmo quando a mistura tem maiores quantidades de água. Isso se deve ao fato de esse tipo de concreto especial geralmente possuir um maior conteúdo de finos, apurando a microestrutura do material (KANELLOPOULOS et al. 2012). Assim sendo, a absorção de água do CAA é tipicamente menor do que a de concretos convencionais (PERRATON et al. 1994).

Quanto a concretos autoadensáveis que substituam o grande conteúdo de finos pelo uso de aditivos modificadores de viscosidade, os trabalhos de Shadkam et al. (2017) avaliaram parâmetros de absorção de água para diferentes misturas de CAA, verificando que misturas que utilizavam VMA possuíam porosidade maior que misturas contendo adições minerais finas, para um mesmo teor de água.

3 METODOLOGIA

Nesta seção serão detalhadas as partes da metodologia da pesquisa, apresentando as principais características dos materiais empregados, assim como os procedimentos adotados em cada ensaio.

Para o programa experimental, foram produzidas seis variáveis de concreto autoadensável. Os teores de aditivos químicos utilizados para cada traço são apresentados na Tabela 3.1. Os teores de VMA foram fixados em 0,5 e 1,5% do peso de cimento, já o parâmetro obtido no ensaio de Caixa-L, em $0,85 \pm 0,05$. A partir do resultado do referido ensaio, foram ajustados os teores de SP.

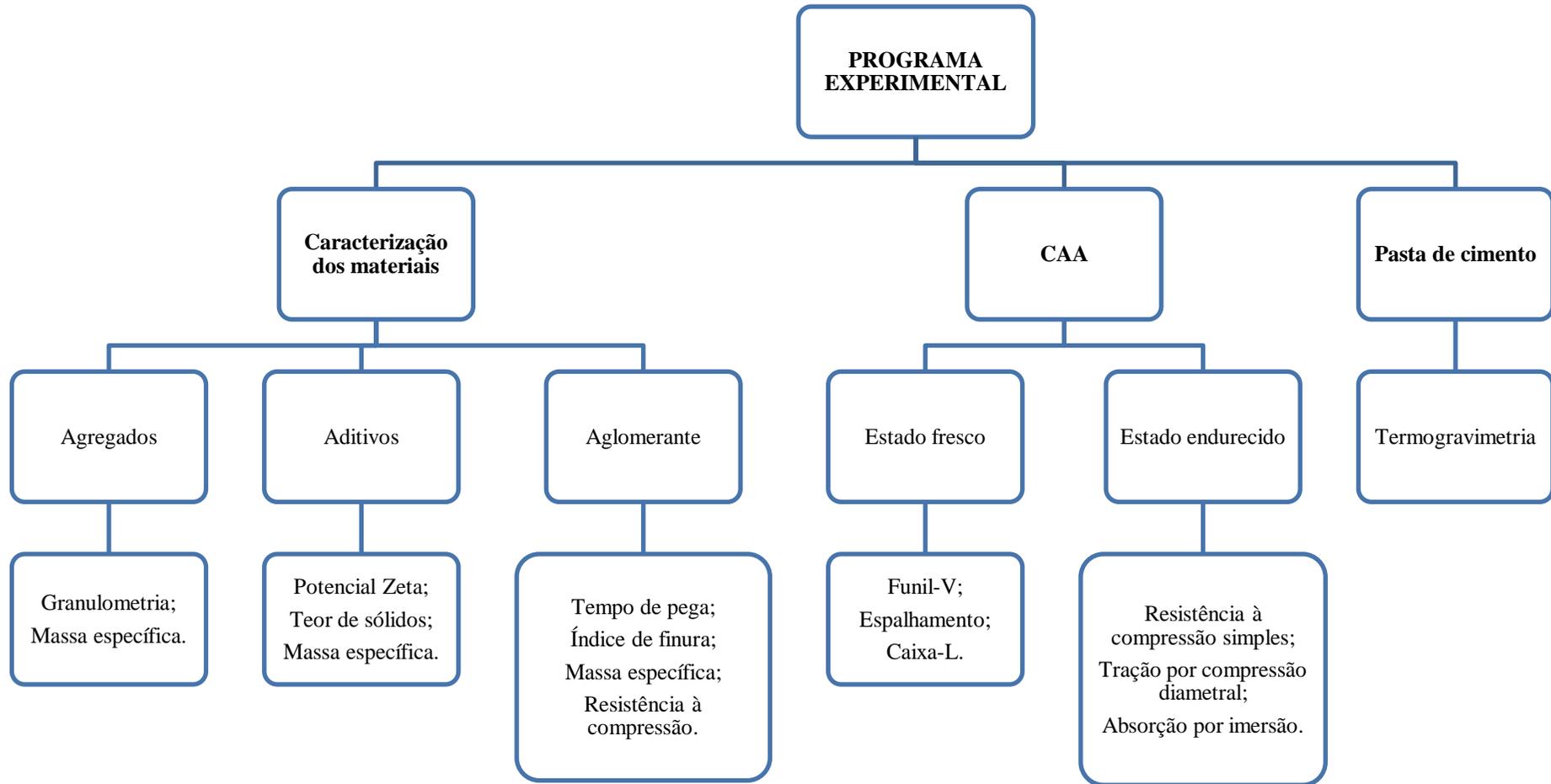
Tabela 3.1 - Traços de CAA realizados no projeto

Traço	Composição dos aditivos (% do peso do cimento)
T1 = SP1-REF	0,99 % SP ₁
T2 = SP1-0,5VMA	0,96 % SP ₁ + 0,5% VMA
T3 = SP1-1,5VMA	0,66 % SP ₁ + 1,5% VMA
T4 = SP2-0,5VMA	0,94 % SP ₂ + 0,5% VMA
T5 = SP2-1,5VMA	0,85 % SP ₂ + 1,5% VMA
T6 = SPVMA	0,94 % SP _{VMA}

Inicialmente, foram realizados ensaios de caracterização dos materiais constituintes do CAA. Depois da definição das dosagens dos traços de CAA, foram efetuados ensaios para avaliação das propriedades no estado fresco e no estado endurecido. A partir dos resultados obtidos, procedeu-se à análise da influência do aditivo modificador de viscosidade nas propriedades dos concretos produzidos.

A estrutura desta seção do trabalho segue o organograma apresentado na página a seguir. Este mostra a sequência do trabalho realizado.

Figura 3.1 - Programa Experimental



3.1 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS

Os materiais empregados foram provenientes da região de Brasília-DF, conforme disponibilidade. A seguir, serão descritas as características dos materiais utilizados nos ensaios para avaliação das propriedades.

3.1.1 Cimento Portland

Para selecionar o cimento a ser usado na pesquisa, definiu-se que seria necessário um produto com baixos teores de adições minerais. O ideal seria utilizar o Cimento Portland Comum CP–I, uma vez que este possui maior conteúdo em clínquer, porém, devido à indisponibilidade desse cimento na região, optou-se pelo Cimento Portland de alta resistência inicial CP–V ARI, o qual possui baixo teor de adição.

Na Tabela 3.2, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização, assim como os valores limites exigidos na norma. Cabe ressaltar que os limites foram respeitados.

Tabela 3.2 - Caracterização do cimento

Propriedade		Resultado	Limites – ABNT NBR 5733:1991	Norma
Massa específica (g/cm ³)		3,06	-	ABNT NBR NM 23:2001
Finura (Blaine – m ² /kg)		4459	> 3000	ABNT NBR NM 76:1998
Pasta de consistência normal	Quantidade de água (g)	159,25	-	ABNT NBR NM 65:2003
	Consistência (mm)	5,5	-	
Tempo de pega	Início de pega (min)	130	> 60	ABNT NBR NM 65:2003
	Fim de pega (min)	210	< 600	
Resistência à Compressão	1 dia (MPa)	15,9	> 14	ABNT NBR 7215:1997
	3 dias (MPa)	28,2	> 24	
	7 dias (MPa)	37,7	> 34	

3.1.2 Agregados

Foram utilizados dois tipos de agregado miúdo de origem natural, sendo a composição entre a areia média e areia fina. O agregado graúdo utilizado foi a brita com diâmetro máximo de 12,5 mm.

Os resultados de caracterização dos agregados miúdos e do agregado graúdo são apresentados na Tabela 3.3, assim como as normas técnicas estabelecidas para cada ensaio. Cabe ressaltar os valores de massa específica, os quais foram utilizados nos cálculos de dosagem dos traços dos concretos.

Tabela 3.3 - Caracterização dos agregados miúdos e graúdo

Propriedade	Agregado miúdo		Agregado graúdo	Norma
	Areia 1	Areia 2		
Massa específica (g/cm ³)	2,65	2,65	2,75	ABNT NBR 9776:1987
Módulo de Finura	1,09	2,49	6,0	ABNT NBR NM 248:2003
Dimensão Máxima (mm)	1,2	4,8	12,5	

Na figuras Figura 3.2, Figura 3.3 e Figura 3.4 são apresentados os gráficos referentes às distribuições granulométricas dos agregados miúdos, assim como as curvas relativas aos limites estabelecidos pela ABNT NBR 7211:2005 para as zonas ótimas e utilizáveis para os agregados miúdos. Verifica-se que os valores obtidos para ambas as areias e para sua combinação não excedem os limites para a zona utilizável.

Figura 3.2 - Curva granulométrica da Areia 1

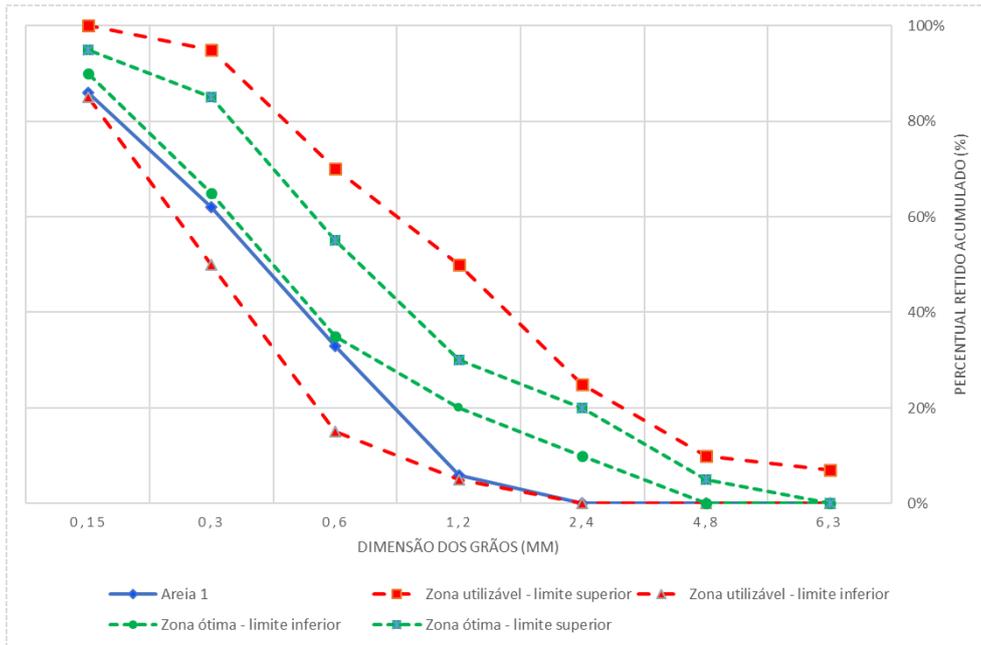


Figura 3.3 - Curva granulométrica da Areia 2

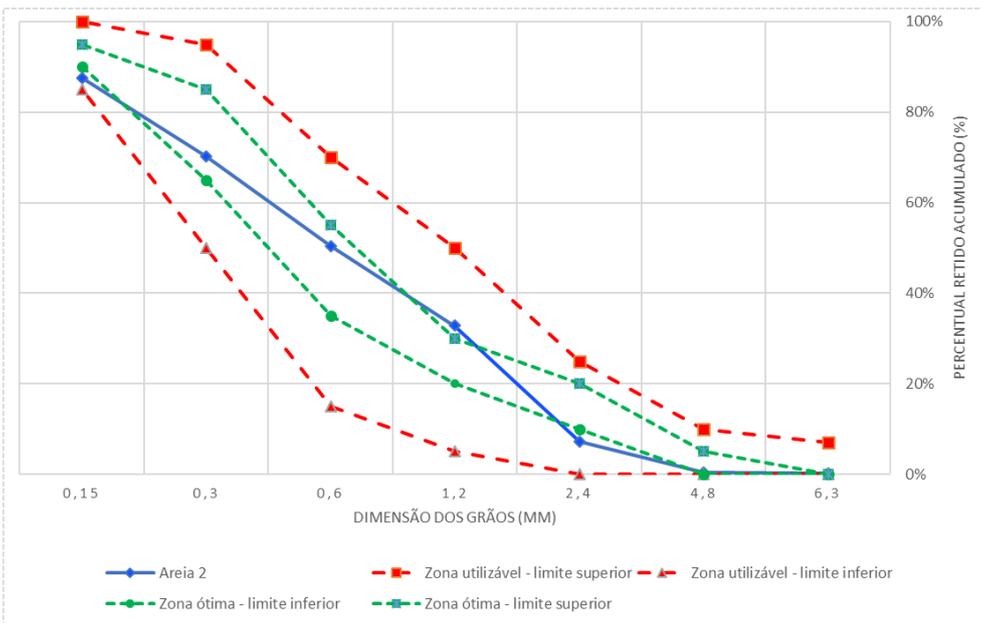
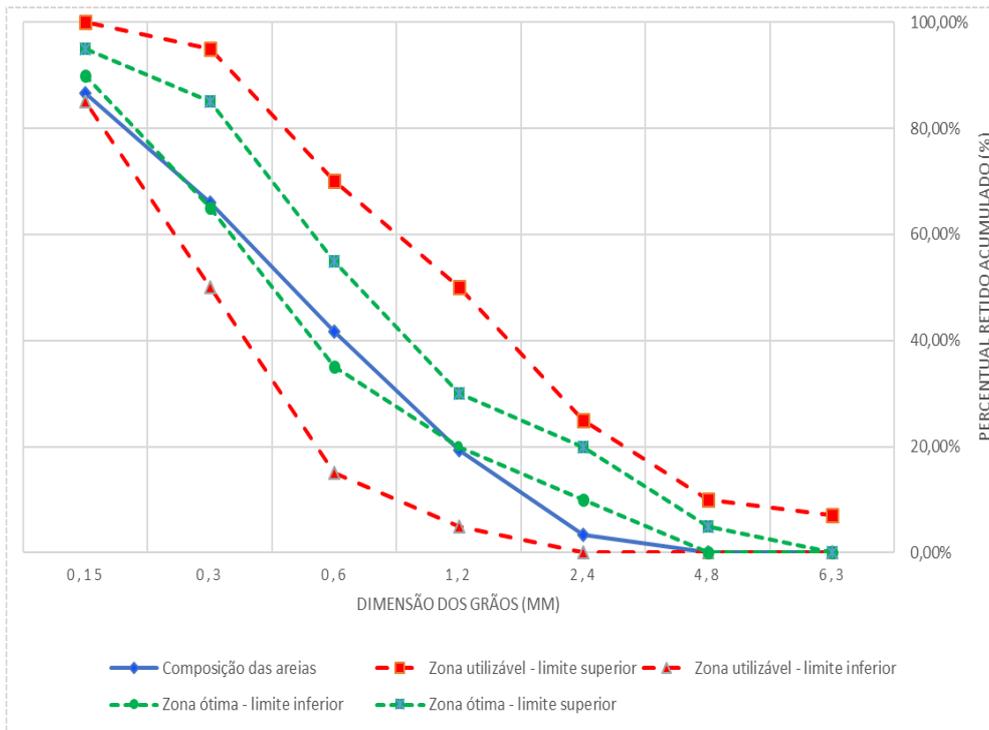
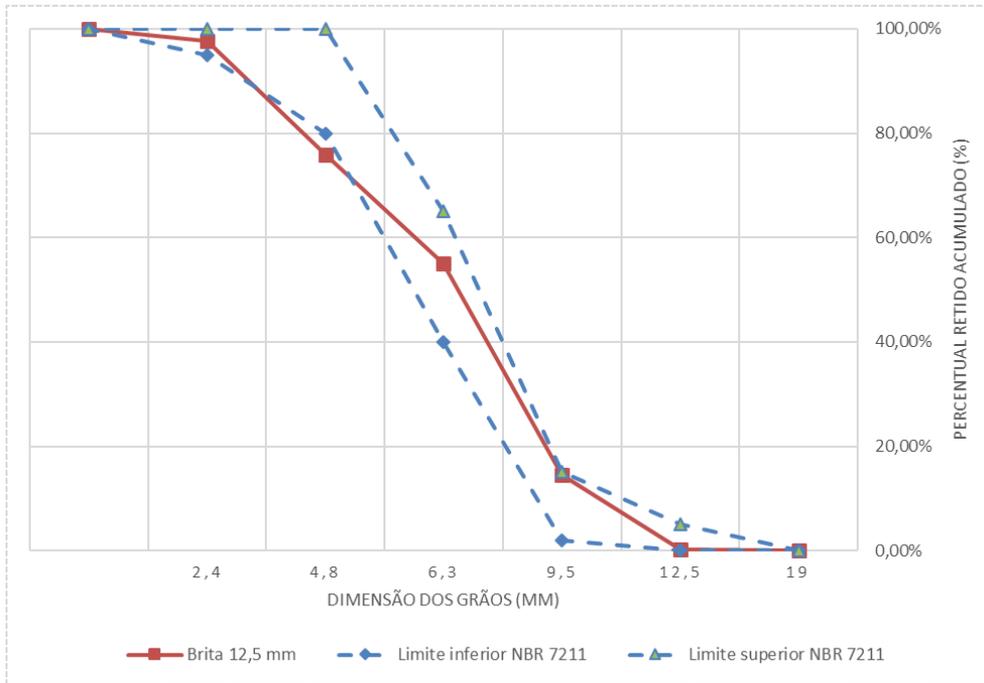


Figura 3.4 - Curva granulométrica da composição das areias



Na Figura 3.5 a seguir, verifica-se a curva granulométrica da brita utilizada de dimensão máxima igual a 12,5 mm. A ABNT NBR 7211:2005 recomenda valores limites para agregados graúdos com essa dimensão dos grãos. Tais valores também são ilustrados na figura abaixo. A norma permite uma variação de no máximo cinco unidades percentuais nos limites. Desta forma, o material utilizado está de acordo com os limites estabelecidos pela norma.

Figura 3.5 - Curva granulométrica da brita de diâmetro máximo de 12,5 mm.



3.1.1 Aditivos superplastificante e aditivo modificador de viscosidade (VMA)

Para este projeto, foi utilizado um aditivo superplastificante de referência (SP₁), que é de terceira geração e que atende aos requisitos das normas ABNT NBR 11768 (tipo P e SP) e ASTM C494 (tipo A e F), fornecido pela empresa produtora BASF Brasil. Este aditivo foi definido como sendo o de referência devido ao fato de ter sido utilizado em diversas pesquisas da Universidade de Brasília. Segundo a BASF, esse aditivo é baseado em uma cadeia de éter policarboxílico modificado que atua como dispersante do material cimentício, propiciando superplastificação e alta redução água, tornando o concreto com maior trabalhabilidade sem alteração do tempo de pega.

O outro aditivo superplastificante (SP₂) usado neste projeto é do tipo SP II e assim como o anterior é a base de policarboxilatos. O aditivo foi fornecido pela empresa Grace Construction Products – GCPAT e, segundo esta, atua de forma a garantir a manutenção da consistência e da resistência à segregação do concreto. O aditivo é indicado para concretos fluidos ou autoadensáveis.

O aditivo modificador de viscosidade (VMA) também foi fornecido pela GCPAT. Trata-se de um aditivo composto de poliéteres solúveis em água de altos pesos moleculares. Segundo o fabricante, esse aditivo aumenta a coesão da mistura, garantindo a manutenção da trabalhabilidade do concreto. Ainda, este aditivo é recomendado para concretos a serem bombeados a longas distâncias e grandes alturas, assim como, para bombeamento à pressão reduzida. Além disso, possui a característica de lubricidade e conseqüente redução do atrito.

Além dos aditivos supracitados, foi utilizado um aditivo experimental (SP_{VMA}), a base de policarboxilatos, que atua como superplastificante e modificador de viscosidade e foi disponibilizado pela GCPAT. Tendo em vista que esse aditivo não é comercial, não foi possível a obtenção de sua ficha técnica.

As principais características dos aditivos químicos utilizados são apresentadas na Tabela 3.4. Os dados referentes ao pH, à dosagem recomendada e ao aspecto/cor foram obtidos das fichas técnicas dos aditivos e os demais por intermédio dos ensaios de caracterização para aditivos para argamassas e concreto.

Tabela 3.4 – Principais características dos aditivos químicos

Caraterísticas dos aditivos					
Aditivo	Dosagem recomendada (% do teor de cimento)	Aspecto/Cor	pH	Massa específica (g/cm ³)	Teor de sólidos (%)
SP ₁	0,2 a 1,0	Líquido/branco turvo	5,0 – 7,0	1,087	30,00
SP ₂	0,5 a 1,0	Líquido/alaranjado	5,0 – 7,0	0,988	25,38
VMA	0,5 a 2,0	Líquido/incolor	5,0 – 7,0	0,870	9,79
SP _{VMA}	-	Líquido/alaranjado	-	0,965	25,22

O teor de sólidos e a massa específica foram determinados conforme os procedimentos descritos na norma ABNT NBR 10908:2009. Para o teor de sólidos, colocou-se aproximadamente 1 grama de cada aditivo em discos de alumínio, registrando-se a massa e levando para a estufa, onde os aditivos permaneceram por 25 minutos. Após a secagem na estufa, registrou-se o novo valor de massa do aditivo. A diferença percentual entre as duas massas registradas é o teor de sólidos. Já para a massa específica, procedeu-se com a medição da massa de um recipiente com volume conhecido contendo o aditivo a ser caracterizado.

A fim de avaliar a estabilidade coloidal do aditivo modificador de viscosidade e do superplastificante, foi realizado o ensaio de determinação do Potencial Zeta. Este trata-se de uma medida da magnitude da repulsão ou da atração eletrostática ou das cargas entre partículas, sendo um dos parâmetros fundamentais que influem na estabilidade do material. A partir desse parâmetro, pode-se analisar a dispersão, a agregação ou a floculação do aditivo (MALVERN, 2004).

No Laboratório de Análises de Águas da Universidade de Brasília, o ensaio foi realizado por intermédio do equipamento apresentado na Figura 3.6. Esse aparelho determina a carga ou potencial zeta das partículas e das moléculas com a medição das velocidades enquanto essas movem-se devido à eletroforese. As partículas e moléculas com potencial zeta migram para os eletrodos do equipamento na presença de campo magnético. A agilidade com a qual essas partículas e moléculas movem-se é proporcional à intensidade do campo magnético e ao potencial zeta. Conhecido o campo magnético, com as medições das velocidades das partículas e das moléculas, fazendo-se uso de laser Doppler, são aplicadas teorias consagradas para o cálculo do potencial zeta (MALVERN, 2012).

Foi utilizado, neste projeto, o equipamento da empresa Malvern. O modelo do Laboratório de Análises de Águas é o *Zetasizer Nano ZS90*, mostrado na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Analisador de potencial zeta, Laboratório de Análises de Águas da Universidade de Brasília.



A

Tabela 3.5 apresenta os parâmetros utilizados no equipamento para a realização do ensaio. Ressalta-se que o número de análises de potencial zeta realizadas é definida automaticamente pelo equipamento.

Tabela 3.5 - Parâmetros do ensaio de potencial zeta

Parâmetros de ensaio	
Temperatura (°C)	25
Solvente (do composto analisado)	Água
Célula de imersão	<i>Folded capillary cell</i>

Na Tabela 3.6, são apresentados os resultados obtidos por intermédio do programa do analisador de potencial zeta.

Tabela 3.6 - Potencial zeta dos aditivos químicos

Aditivo	Potencial zeta (mV)
SP ₁	- 9,840
SP ₂	- 0,396

VMA	- 13,60
SP _{VMA}	- 12,80

O equipamento que determina o potencial zeta global das amostras de aditivos gera um gráfico, o qual determina a contagem total de partículas para cada valor de potencial zeta, o que permite a avaliação da uniformidade do potencial zeta das partículas presentes na amostra.

O equipamento indicou, para os resultados dos aditivos SP₁ e SP_{VMA}, que o primeiro precisaria de concentração de partículas para obtenção de uma análise mais representativa e o segundo de maior número de análises para melhor avaliar o potencial zeta. Os gráficos para ambos aditivos estão dispostos nas figuras Figura 3.7 e Figura 3.10. Para os resultados dos demais aditivos, o analisador de potencial zeta, obteve dados mais representativos. As figuras Figura 3.8 e Figura 3.9 apresentam os gráficos relativos aos aditivos SP₂ e VMA. Vale ressaltar que o eixo das ordenadas - contagem total de partículas (*Total counts*) - não está na mesma escala e proporção nos gráficos, isso se deve ao fato destes serem gerados automaticamente pelo equipamento.

Figura 3.7 - Contagem total de partículas para os valores de potencial zeta – SP₁

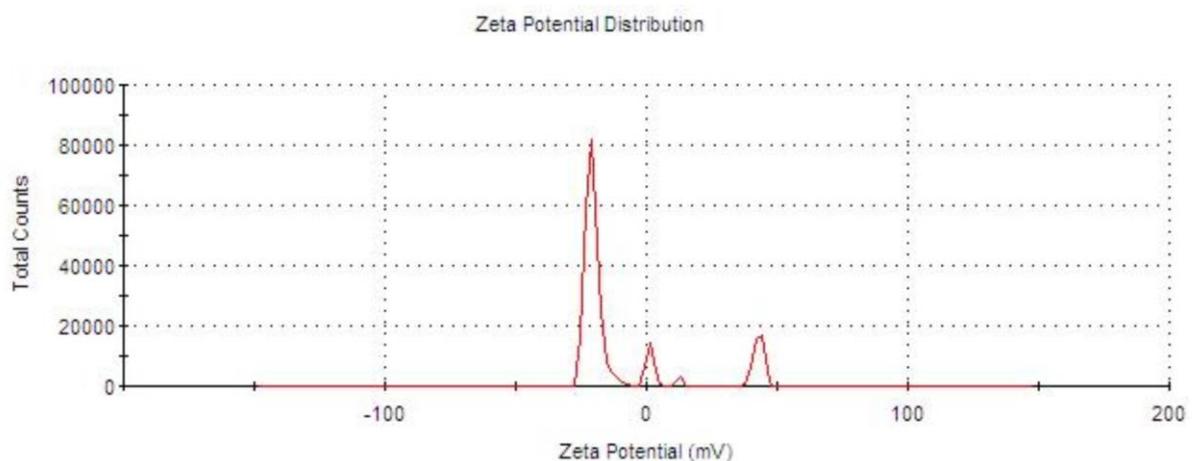


Figura 3.8 - Contagem total de partículas para cada valor de potencial zeta – SP₂

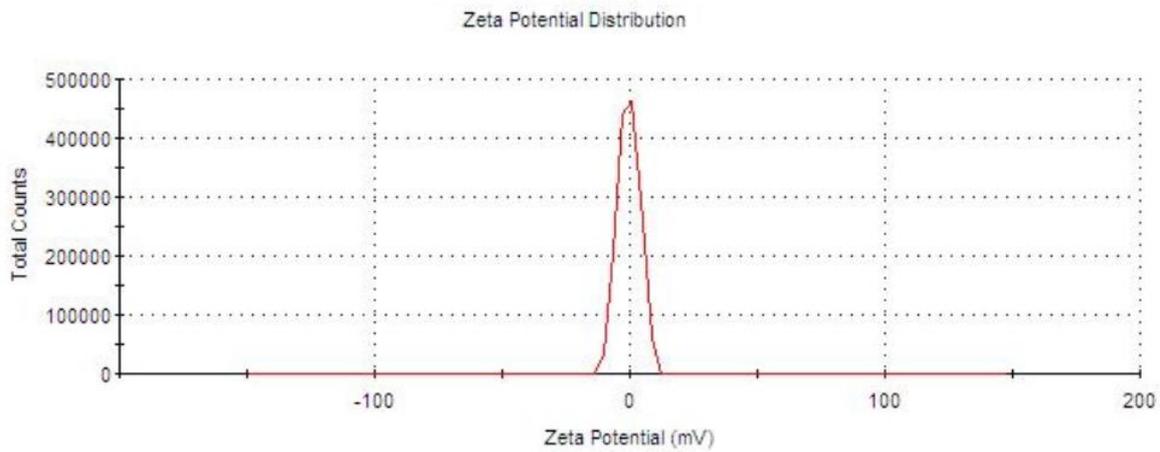


Figura 3.9 - Contagem total de partículas para cada valor de potencial zeta - VMA

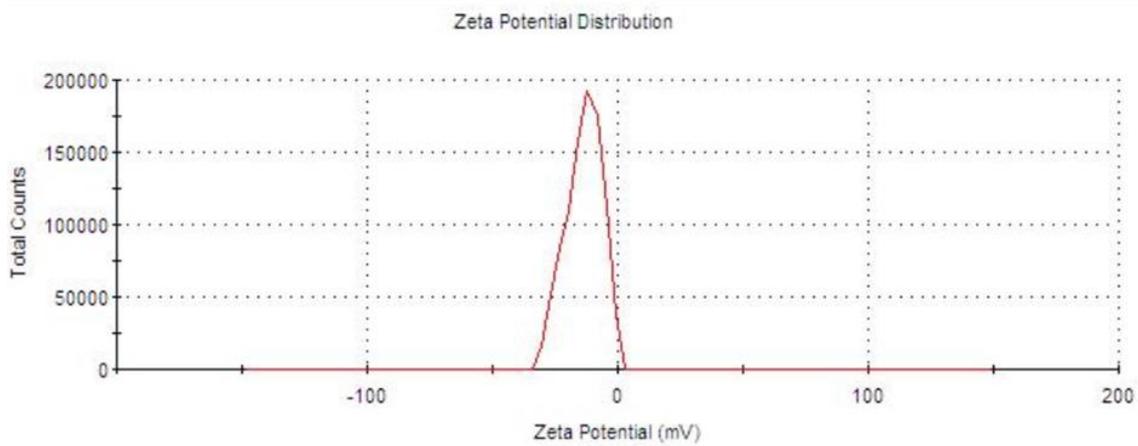
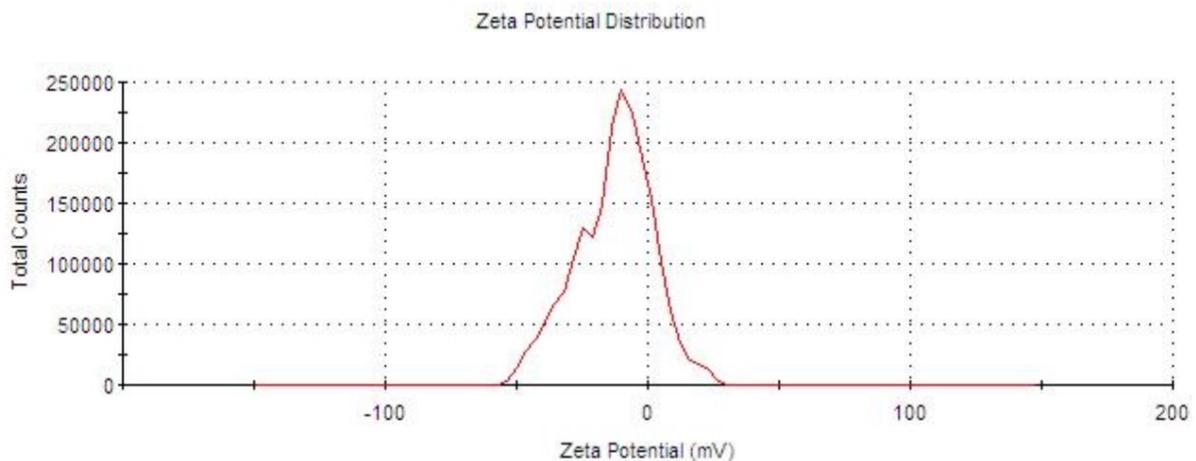


Figura 3.10 - Contagem total de partículas para cada valor de potencial zeta – SP_{VMA}



Os resultados obtidos no ensaio, dispostas na Tabela 3.6, demonstram que, com exceção do aditivo SP₂, cujo potencial zeta oscila entre valores próximos de zero, com pequeno desvio negativo, os demais aditivos apresentam cargas negativas. Os aditivos à base de

policarboxilatos, SP₁, SP₂ e SP_{VMA}, conforme explanado no parágrafo 2.1.1.5.1, atuam na dispersão das partículas de cimento por repulsão estérico, fazendo-se uso de cadeias moleculares de diversos comprimentos que se projetam na superfície das partículas de cimento, e por repulsão eletrostática (ALONSO *et al.*, 2007; GRIESSER, 2002; HUI *et al.*, 2007; PLANK; SACHSENHAUSER, 2009). Tendo em vista que o SP₂ possui carga eletrostática aproximadamente nula, pode-se inferir pelo resultado do ensaio que este atua sobre a dispersão das partículas de cimento por repulsão estérica. Já os aditivos SP₂ e SP_{VMA} podem atuar, baseando-se no resultado do ensaio, na dispersão das partículas de cimento predominantemente por repulsão eletrostática. Todavia, é requerida uma análise mais completa das reações entre o cimento e os referidos aditivos para determinar o modo de atuação deste agente químico.

Dos resultados para os outros aditivos, pode-se inferir que estes atuam, predominantemente, por repulsão eletrostática

3.2 DOSAGEM DO CAA

Para confecção dos traços avaliados nos experimentos, realizou-se a dosagem pelo método proposto pelo Instituto Americano de Concreto (ACI), obedecendo os valores indicados para os parâmetros de consumo de cimento, volume de pasta, volume de argamassa e de agregado graúdo.

Com o conhecimento das faixas de valores utilizáveis para tais parâmetros, justifica-se os valores usados nesse projeto tendo base nas recomendações referentes à linha de pesquisa da Prof. Dr. Valdirene Maria Silva Capuzzo da Universidade de Brasília acerca de concretos autoadensáveis. Tais valores são expostos na Tabela 3.7 e na

Tabela 3.8, que indicam o traço utilizado para confecção do traço referência. Os demais traços foram obtidos com modificação apenas do aditivo químico superplastificante utilizado e pela incorporação de aditivo modificador de viscosidade em diferentes teores a esse mesmo traço referido.

Tabela 3.7 – Traço utilizado na dosagem do CAA

Material	Traço em massa	Consumo/m³ de concreto (kg)
Cimento Portland CP-V	1,00	394,19
Areia Fina	1,42	556,79
Areia Média	0,88	347,99
Brita	2,12	835,19
Água	0,52	204,66

Tabela 3.8 – Parâmetros de dosagem do CAA

Parâmetro	Valor utilizado	Limite inferior ACI	Limite superior ACI
Consumo de cimento (kg/m³)	394,19	385,00	475,00
Volume de pasta (%)	38,74	34	40
Volume de argamassa (%)	71,17	68	72
Relação a/c	0,52	0,32	0,45
Volume de agregado graúdo (%)	28,83	28	32
Teor de ar (%)	2,00	-	-

Observa-se que a relação a/c é maior que o limite superior indicado pelo ACI. Justifica-se esse fato pois não seria possível aumentar muito o teor de superplastificante para o atingimento das propriedades de autoadensamento, de forma que não ultrapassássemos os limites de uso do aditivo indicados pelo fornecedor. Fora isso, verifica-se que os outros parâmetros estão de acordo com os intervalos propostos.

O volume total a ser confeccionado para cada traço foi calculado com base no número de corpos de prova a serem moldados necessários para realização dos ensaios no estado endurecido. Essa quantidade é explicitada na seção referente à análise dos resultados desses ensaios.

Quanto à ordem de colocação dos materiais na mistura, inicialmente procedeu-se com mistura prévia da brita e do cimento e uma parcela de água. Em seguida, adicionou-se a composição de areias e o restante de água. Por fim, de forma a se obter as propriedades de autoadensabilidade indicadas pelas referências normativas e o parâmetro requerido para o ensaio da Caixa-L, incorporou-se os aditivos relativos a cada traço.

3.3 ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CAA

Com a finalidade de se obter resultados quantitativos para posterior análise das propriedades dos concretos produzidos, foi realizada uma série de ensaios sobre os concretos. Cada ensaio é descrito mais detalhadamente nesta seção.

A norma ABNT NBR 15823 (2010) determina que, para o concreto ser classificado como autoadensável, é necessário que este enquadre-se, no mínimo, na classificação prescrita para os ensaios de espalhamento (*slump flow*), T500 ou funil V, anel J ou caixa L. Tendo em vista este fato, foram realizados os ensaios de espalhamento (*slump flow*), T500, funil-V e caixa-L.

Para o estado endurecido, procede-se à caracterização dos corpos de prova por meio dos ensaios de resistência à compressão simples, de resistência à tração por compressão diametral, do módulo de elasticidade e de absorção de água por imersão.

Por fim, foi realizado ensaio de análise termogravimétrica (TG) em pasta de cimento aos 28 dias de idade. Foi confeccionada uma pasta de cimento correspondente a cada traço, com os mesmos teores de superplastificante e de VMA utilizados.

3.3.1 Ensaios no estado fresco

3.3.1.1 Ensaio do Funil-V

O ensaio do Funil-V foi desenvolvido pela Universidade de Tóquio com intuito de simular a capacidade de passagem do CAA através do estreitamento de uma seção, sob ação de seu peso próprio. Ademais, é possível verificar a segregação do concreto por inspeção visual, quando há observação do impedimento do escoamento do concreto pelo orifício saída do funil (Gomes; Barros, 2009). Segundo a NBR 15823-5, este método adequa-se para concretos cujos agregados graúdos possuem dimensão máxima de 20 mm.

Para realização do ensaio, é necessário que o funil-V esteja posicionada em superfície plana. Após o preenchimento do cone com concreto, faz-se a abertura da comporta e, simultaneamente, aciona-se o cronômetro, este é parado assim que a passagem inferior está completamente visível. O tempo para a ocorrência do escoamento do concreto pelo funil é denominado de T30seg (EFNARC, 2005; ABNT NBR 15823-5, 2010; EN 12350-9, 2010).

Segundo a ABNT NBR 15823 - 5 (2010), o CAA é classificado de acordo com o resultado do ensaio de funil-V em duas classes de viscosidade aparente, sendo elas apresentadas na Tabela 3.10. Esta classificação é a mesma adotada pela norma europeia EN 12350-9 (2010) e pela EFNARC (2005). Todavia, essa classificação não é utilizada pela norma americana ASTM, tendo em vista que este ensaio não é utilizado para avaliar a fluidez do CAA.

Segundo as normas supracitadas, as quais adotam esta classificação para o CAA, os concretos de classe VF1 são indicados para estruturas com taxa de armadura alta. Já os concretos da classe VF2 adequam-se para a maioria das aplicações correntes (ABNT NBR 15823, 2010; EN 12350-9, 2010, EFNARC, 2005). Exemplos de aplicação das referidas classes constam na Tabela 3.10.

3.3.1.2 Ensaio de Espalhamento

O ensaio de espalhamento consiste na verificação da habilidade de preenchimento e da fluidez do concreto (GOMES, 2009). Os parâmetros determinados pelo método são o espalhamento (mm) e o tempo de escoamento (T500).

Para realizar este ensaio, posiciona-se o cone de Abrams no centro da placa metálica. Procedese ao preenchimento do cone com uma amostra de concreto e, a posteriori, levanta-se esse perpendicularmente à placa. De forma simultânea, aciona-se o cronômetro assim que for iniciado o levantamento do cone. O tempo de escoamento necessário para que o concreto atinja a marca circular com diâmetro de 500 mm é o parâmetro T500 do ensaio. Logo após o término do escoamento do concreto, medem-se, com uma régua ou trena, dois diâmetros perpendiculares (d1 e d2) e calcula-se a média aritmética destes, esta é denominada espalhamento (GOMES; BARROS, 2009; ABNT NBR 15823-2, 2010).

Os valores de espalhamento são classificados em três categorias, sendo elas apresentadas na tabela que segue. Essa classificação é a adotada pelas normas brasileira (ABNT NBR 15823-2, 2010), europeia (EN 12350-8, 2010) e americana (ASTM C1611, 2009). A Tabela 3.9 apresenta as classes em função do espalhamento, assim como as aplicações destas.

Tabela 3.9 - Classes de CAA de acordo com o Espalhamento.

Classe	Espalhamento (mm)	Aplicação	Exemplo
SF1	550 a 650	Estruturas não armadas 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	Lajes Estacas e certas fundações profundas
SF2	660 a 750	Adequada para a maioria das aplicações correntes	Paredes, vigas, pilares e outras
SF3	760 a 850	Estruturas com alta densidade de armadura e/ou de forma arquitetônica complexa, com o uso de concreto de agregado graúdo de pequenas dimensões (menor que 12,5 mm)	Pilares-parede Paredes-diafragma Pilares

Fonte: ABNT NBR 15823-1 (2010).

Conforme exemplificado na Tabela 3.9, de acordo com a classificação do CAA, indica-se uma aplicação, sendo que a classe SF1 é indicada para estruturas com baixa taxa de armadura e para situações de bombeamento. Já os concretos pertencentes à classe SF2 adequam-se para a maior parte das aplicações em obra. Por fim, a classe SF3 é indicada para utilização em estruturas com elevada densidade de armadura e requerem fôrmas de geometria complexas (ASTM C1611, 2009; EN 12350-8, 2010; ABNT NBR 15823-2, 2010).

O CAA também é classificado de acordo com o parâmetro T500 e o tempo de fluxo do ensaio de funil-V. Esses parâmetros referem-se à viscosidade aparente do concreto. As categorias de viscosidade aparente e suas aplicações são apresentadas na tabela a seguir. Essa classificação é adotada pelas normas brasileira (NBR 15823-1), europeia (EN 12350-8, 2010) e americana (ASTM C1611, 2009).

Tabela 3.10 - Classes de viscosidade plástica aparente.

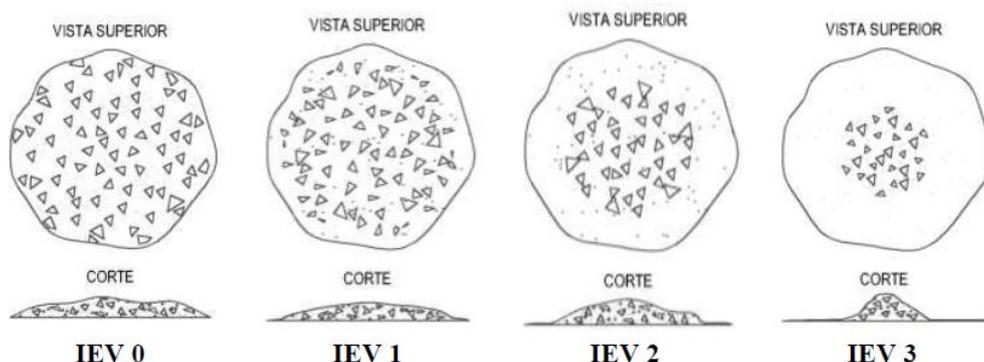
Classe	T500 (s)	Funil-V (s)	Aplicação	Exemplo
VS1/VF1	≤ 2	≤ 8	Adequado para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, mas exige controle da exsudação e da segregação Concretagens realizadas a partir do ponto mais alto com deslocamento livre	Paredes-diafragma, pilares-parede, indústria de pré-moldados e concreto aparente
VS2/VF2	>2	9 a 25	Adequado para a maioria das aplicações correntes. Apresenta efeito tixotrópico que acarreta menor pressão sobre as formas 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, lajes e outras

Fonte: ABNT NBR 15823-2 (2010).

Ademais, tendo em vista que o ensaio de espalhamento pode ser utilizado para avaliar a estabilidade do concreto, foi inserido o índice de estabilidade visual (IEV) no projeto de revisão da ABNT NBR 15823- 1 (2010). Segundo Tutikian *et al.* (2016), esse parâmetro visa a avaliar visualmente a capacidade de fluidez e a possibilidade de segregação do CAA, conforme aparência do concreto imediatamente após o ensaio de espalhamento.

Na Figura 3.11, são apresentados os critérios para avaliação qualitativa da estabilidade visual. Na Tabela 3.11, estão dispostas as classes de IEV.

Figura 3.11 - Critérios de avaliação qualitativa da estabilidade visual



Fonte: Barbosa (2016).

Tabela 3.11 - Classes de IEV

Classe	IEV
IEV 0 (Altamente estável)	Sem evidencia de segregação ou de exsudação
IEV 1 (Estável)	Sem evidência de segregação e leve exsudação
IEV 2 (Instável)	Presença de auréola de argamassa ($\leq 10\text{mm}$) e/ou empilhamento de agregados no centro do concreto
IEV 3 (Altamente instável)	Segregação evidenciada pela concentração de agregados no centro do concreto ou pela dispersão de argamassa nas extremidades.

Fonte: Barbosa (2016).

3.3.1.3 Ensaio da Caixa-L

O ensaio de Caixa L tem por intuito a avaliação da capacidade de passagem do CAA. O ensaio consiste em verificar se o concreto sob a força de seu peso próprio possui a capacidade de ultrapassar obstáculos, tais quais as armaduras, sem que haja bloqueio (GOMES; BARROS, 2009).

Para realizar o ensaio, é necessário, inicialmente, que a Caixa-L seja posicionada de forma estável e horizontalmente nivelada. Depois, faz-se o umedecimento do interior da caixa, sendo removido o excesso de água. A posteriori, faz-se o preenchimento do trecho vertical é com concreto. Levanta-se a comporta e deixa-se que o concreto flua do trecho vertical para o horizontal da Caixa-L. Assim que termina o escoamento do concreto, mede-se a altura do concreto no final do trecho horizontal (H2) e a altura do concreto remanescente no trecho vertical (H1) da Caixa-L. Com esses valores de altura, obtém-se um parâmetro de habilidade de preenchimento (HP). Essa razão entre as alturas deve ser superior a 0,8 (GOMES; BARROS, 2009; EFNARC, 2005; ABNT NBR 15823-4, 2010; EN 12350-10, 2010).

Conforme o resultado do ensaio, a ABNT NBR 15823-1 (2010) classifica o CAA quanto à habilidade passante em duas classes, sendo estas apresentadas na Tabela 3.12, assim como as aplicações para as quais essas são recomendadas.

Tabela 3.12 - Classes da habilidade passante (Caixa-L)

Classe	Caixa-L (H2/H1)	Aplicação	Exemplo
PL 1	≥ 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
PL2	≥ 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, indústria de pré-moldados

Fonte: ABNT NBR 15823-1:2010.

Neste projeto, optou-se pela realização do ensaio com 3 barras de aço, já que a classe PL 2 adequa-se a maioria das aplicações correntes.

3.3.2 Ensaios no estado endurecido

3.3.2.1 Resistência à Compressão Simples

Visando determinar a resistência à compressão dos corpos de prova, procede-se com o ensaio indicado na norma ABNT NBR 5739 (2007). Os corpos de prova foram retificados e posicionados no equipamento, que realiza a aplicação de carregamento contínuo até que ocorra a ruptura.

Esse ensaio foi realizado para corpos de prova nas idades de 7, 14 e 28 dias, com o objetivo de se avaliar a variação de resistência com o tempo.

3.3.2.2 Resistência à Tração por compressão diametral

Para cálculo da resistência à tração, procede-se com ensaio de tração por compressão diametral, experimento regulamentado pela norma ABNT NBR 7222 (1994).

Na realização do experimento, foram selecionados 2 corpos de prova para cada traço, os quais foram posicionados deitados no equipamento, que passou a aplicar carga até que ocorresse a ruptura. Esse procedimento foi realizado para os corpos de prova aos 28 dias de idade.

3.3.2.3 Módulo de Elasticidade

Em conjunto com a avaliação da resistência da compressão para os corpos de prova de 28 dias de idade, foi realizado ensaio de módulo elástico de elasticidade à compressão, recomendado pela ABNT NBR 8522 (2008).

Após aferir as medidas de cada corpo de prova com auxílio de paquímetro digital, procedeu-se com a ruptura à compressão para uma das amostras, de forma a colocar esse valor nos dados de entrada do programa utilizado no laboratório. Tal programa foi utilizado para calcular os dados obtidos pelos carregamentos e descarregamentos realizados por prensa associada a um extensômetro eletrônico, responsável pela medição das deformações.

3.3.2.4 Absorção de Água por Imersão

Os corpos de prova foram secos em estufa e em seguida submetidos à imersão em água para obtenção dos parâmetros de massa específica, absorção de água e índice de vazios.

O ensaio foi realizado conforme a ABNT NBR 9778 (1987) e consistiu na determinação da massa seca em estufa e das massas do corpo de prova após imersão em água de um terço de sua altura, de dois terços de sua altura e da massa após imersão total. Com esses valores e o auxílio das equações recomendadas pela norma, foi possível calcular os referidos parâmetros.

3.4 ENSAIO NA PASTA DE CIMENTO

3.4.1 Análise termogravimétrica

Análise Termogravimétrica (TG) é uma técnica que consiste em medir perdas de massa em função da variação da temperatura. Como diferentes compostos químicos sofrem transformações em diferentes temperaturas características, conhecendo-se aproximadamente a composição química do material é possível quantificar a presença de fases pela perda de massa a dada temperatura. O método utiliza como equipamento uma termobalança e produz gráficos como registro dos resultados. (GILITO E IONASHIRO, 1980).

Nas curvas TG obtidas, a perda de massa é expressa no eixo vertical em percentagem, sendo caracterizada no eixo horizontal por duas temperaturas, a temperatura inicial de decomposição, na qual a variação de massa acumulada atinge o valor mínimo que a termobalança é capaz de detectar, e a temperatura final de decomposição, na qual a variação de massa acumulada atinge seu valor máximo de degradação, correspondendo ao término da reação (GIOLITO E IONASHIRO, 1980).

Segundo Mattos et al. (2009), outro dado importante obtido através da curva TG é a curva termogravimétrica derivada (DTG), que expressa a variação de massa em relação ao tempo. Na curva DTG são obtidos picos cujas áreas são proporcionais à variação de massa da amostra, apresentando informações mais facilmente visualizadas (como eventos sobrepostos) do que em uma curva TG.

Neste ensaio, procurou-se avaliar o processo de hidratação do cimento Portland, obtendo-se a quantidade de água quimicamente combinada referente aos produtos da reação de hidratação do cimento Portland CH (hidróxido de cálcio) e CSH (silicato hidratado de cálcio). Através da técnica utilizada, pode-se observar que os produtos hidratados presentes na matriz perdem a água quimicamente combinada em picos característicos, os quais são referidos na literatura (TAYLOR, 1997) pelos intervalos da tabela a seguir:

Tabela 3.13 - Intervalos de temperatura característica dos produtos de hidratação

Produtos de hidratação	Temperatura característica (°C)
CH	425 a 550
CSH, etringita e aluminato de cálcio hidratado	100 a 300

Fonte: TAYLOR, 1997.

Estudos desenvolvidos por Dweck et al. (2000) e Ramachandran e Bedoin (2001), utilizando análise termogravimétrica em pastas de cimento, mostraram que, na ausência de água livre, a desidratação do CSH inicia-se a partir de 50°C. Dessa forma, se a amostra for seca até no máximo 35°C, pode-se determinar o teor de água quimicamente combinada de todos os hidratos no intervalo de temperatura entre 50°C e a temperatura final de decomposição do hidróxido de cálcio, uma vez que, acima da temperatura final de perda de água relativa ao hidróxido de cálcio, não há acréscimo de perda de massa referente a produtos hidratados.

As técnicas de análise térmica e termogravimétrica também podem ser utilizadas em materiais à base de cimento contendo aditivos minerais, pois os sais hidratados formados pelo cimento Portland e os formados pela reação pozolânica possuem composição química muito próxima (MARSH E DAY, 1988; MASSAZZA, 1998).

Este ensaio foi realizado em pasta de cimento aos 28 dias de idade, visando a avaliar o conteúdo nesta pasta dos principais produtos que conferem resistência ao concreto.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção, estão dispostos os resultados dos ensaios previstos na metodologia. Ademais, procedeu-se à análise desses dados para avaliar a influência de diferentes aditivos químicos nas propriedades do concreto autoadensável no estado fresco e no estado endurecido. Ademais, a partir dos dados da análise termogravimétrica, foi avaliada a influência dos aditivos na hidratação do cimento.

4.1 ESTADO FRESCO

Neste item, são apresentados os resultados dos ensaios realizados nos diferentes traços do CAA no estado fresco. Na Tabela 4.1, estão dispostos os resultados dos ensaios que avaliam autoadensabilidade dos concretos, sendo esses: espalhamento (*slump flow*), T500, funil V e caixa L, assim como estão classificados os resultados desses ensaios conforme a ABNT NBR 15823 - (2010). Conforme a referida norma, para que o concreto seja classificado como autoadensável é necessário que este enquadre-se, no mínimo, na classificação prescrita para os ensaios de espalhamento (*slump flow*), T500 ou funil V, anel J ou caixa L.

Ademais, foi feita a verificação da estabilidade visual conforme o projeto 18:300.03-001/2 de revisão da ABNT NBR 15823-2 (2010), apresentado por Barbosa (2016). O índice de estabilidade visual também foi utilizado como requisito para aceitação do concreto.

Tabela 4.1 - Resultados dos ensaios no estado fresco

Concreto	Propriedade / Classificação										Aceitação
	Espalhamento (<i>slump flow</i>)		Índice de estabilidade visual	Viscosidade aparente					Habilidade passante		
	Slump flow (mm)	Classe		T500	Funil V		Caixa L				
			t (s)		Classe	T30seg (s)	T5min (s)	Classe	HP (H1/H2)	Classe	
T1 = SP1-REF	785	SF3	IEV 1	2,4	VS2	10,4	20,7	VF2	0,9	PL2	Sim
T2 = SP1-0,5VMA	795	SF3	IEV 1	1,8	VS1	14,2	18,2	VF1	0,9	PL2	Sim
T3 = SP1-1,5VMA	698	SF2	IEV 1	2,5	VS2	3,3	4,0	VF1	0,82	PL2	Sim

Concreto	Propriedade / Classificação										Aceitação
	Espalhamento (<i>slump flow</i>)		Índice de estabilidade visual	Viscosidade aparente					Habilidade passante		
	Slump flow (mm)	Classe		Classe	T500		Funil V			Caixa L	
			t (s)		Classe	T30seg (s)	T5min (s)	Classe	HP (H1/H2)	Classe	
T4 = SP2-0,5VMA	803	SF3	IEV 3	2,1	VS2	60,5	105,8	-	0,85	PL2	Não
T5 = SP2-1,5VMA	698	SF2	IEV 0	3,0	VS2	18,4	25,8	VF2	0,85	PL2	Sim
T6 = SPVMA	660	SF2	IEV 0	2,0	VS1	26,0	29,0	-	0,85	PL2	Sim

Verifica-se na Tabela 4.1 que, dentre os tipos de concretos produzidos neste projeto, somente o traço T4, não atendeu aos requisitos de autoadensabilidade, estabelecidos na ABNT NBR 15823-1 (2010).

Dentre os concretos produzidos, 3 (três) concretos enquadram-se na classe SF2, podendo ser utilizados na maioria das aplicações gerais. Ainda, 2 (dois) dos concretos foram classificados como SF3. Segundo a norma ABNT NBR 15823-1 (2010), com a utilização de concretos da classe SF3, obtém-se uma melhor qualidade de acabamento da superfície, todavia o controle de resistência à segregação deve ser mais rigoroso. Somente o concreto T4 não foi enquadrado como concreto autoadensável, uma vez que não passou nos parâmetros de estabilidade visual, conforme a Figura 4.4.

Os resultados e classificações relativos à viscosidade aparente dos concretos, dispostos na Tabela 4.1, demonstram que apenas o concreto T2 enquadrou-se simultaneamente nas classes VS1 e VF1 e, por conseguinte, é recomendado para estruturas com elevadas taxas de armadura.

As figuras Figura 4.1, Na Figura 4.1, na imagem da parte superior esquerda, pode-se verificar a presença de leve exsudação. Porém, conforme pode ser visto nas demais imagens da figura não há concentração de agregados no centro. Dessa forma, o traço T1 foi classificado como estável (IEV1). A mesma situação é mostrada na figura Figura 4.2.

Figura 4.2, Figura 4.3, Figura 4.4, Figura 4.5 e Figura 4.6, que seguem, apresentam os concretos produzidos após a realização do ensaio de espalhamento. Para os traços T1, T2 e T3, há a

presença de leve exsudação, porém não há evidências de segregação. Dessa forma, os traços enquadram-se na classe de índice de estabilidade visual IEV1. O traço T4 segregou, com isso, foi classificado como IEV3. Os traços T5 e T6 não apresentaram evidências de segregação ou de exsudação e são classificados como IEV0.

Figura 4.1 – Traço T1 = SP1-REF



Na Figura 4.1, na imagem da parte superior esquerda, pode-se verificar a presença de leve exsudação. Porém, conforme pode ser visto nas demais imagens da figura não há concentração de agregados no centro. Dessa forma, o traço T1 foi classificado como estável (IEV1). A mesma situação é mostrada na figura Figura 4.2.

Figura 4.2 - Traço T2 = SP1-0,5VMA

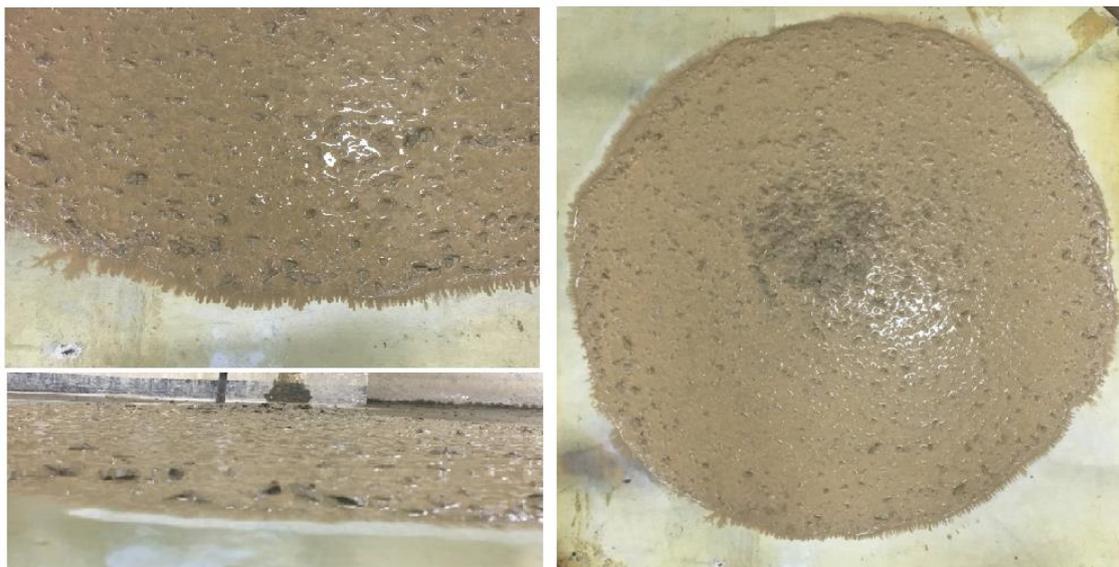
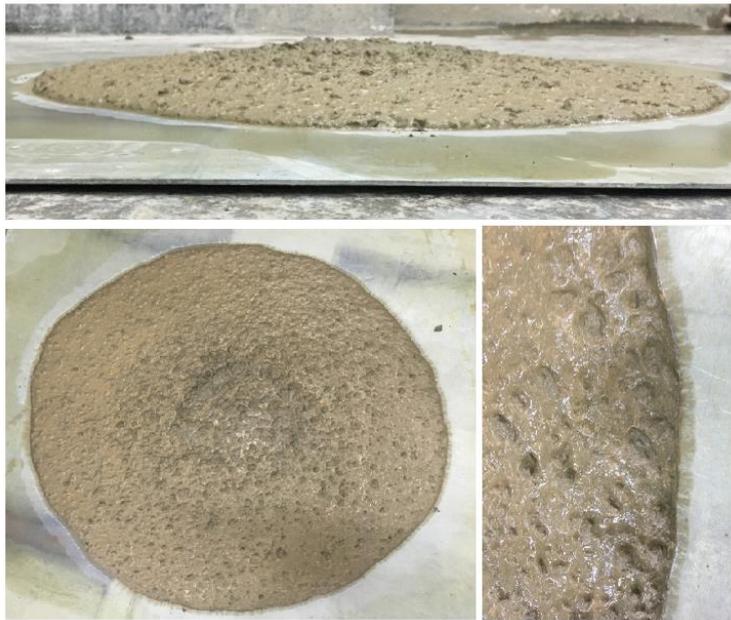


Figura 4.3 - Traço T3 = SP1-1,5VMA



Assim como nos traços T1 e T2, o traço T3 enquadrou-se na classe IEV1. Na imagem na parte inferior direita, pode averiguar a presença de leve exsudação, mas não há presença de segregação.

A Figura 4.4 apresenta o traço T4, nela pode-se observar os processos de exsudação e de segregação, já que há concentração de agregados no centro do concreto e dispersão de argamassa nas extremidades. O traço T4 foi classificado com altamente instável (IEV3).

Figura 4.4 - Traço T4 = SP2-0,5VMA

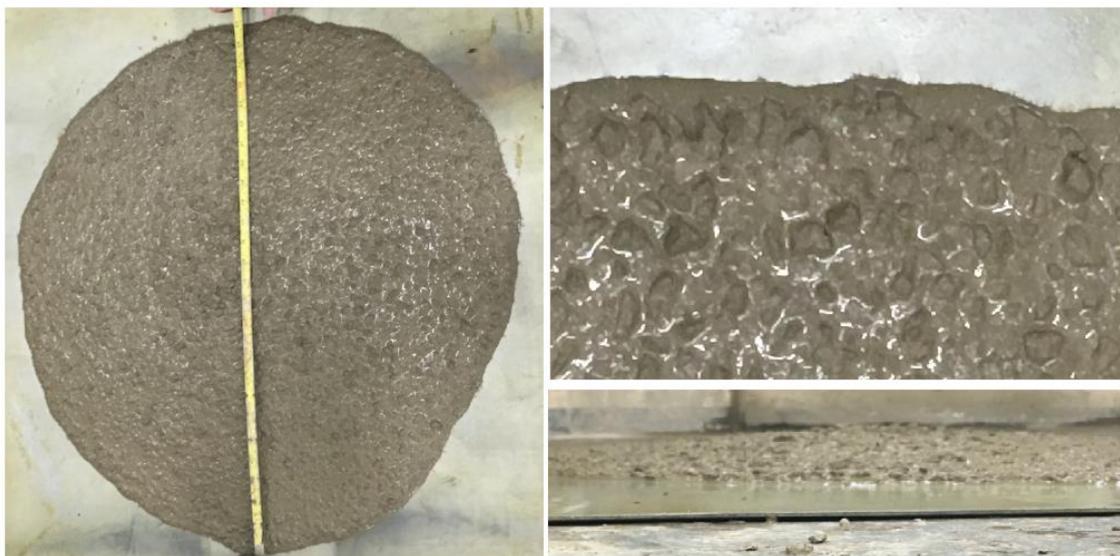


Figura 4.5 - Traço T5 = SP2-1,5VMA



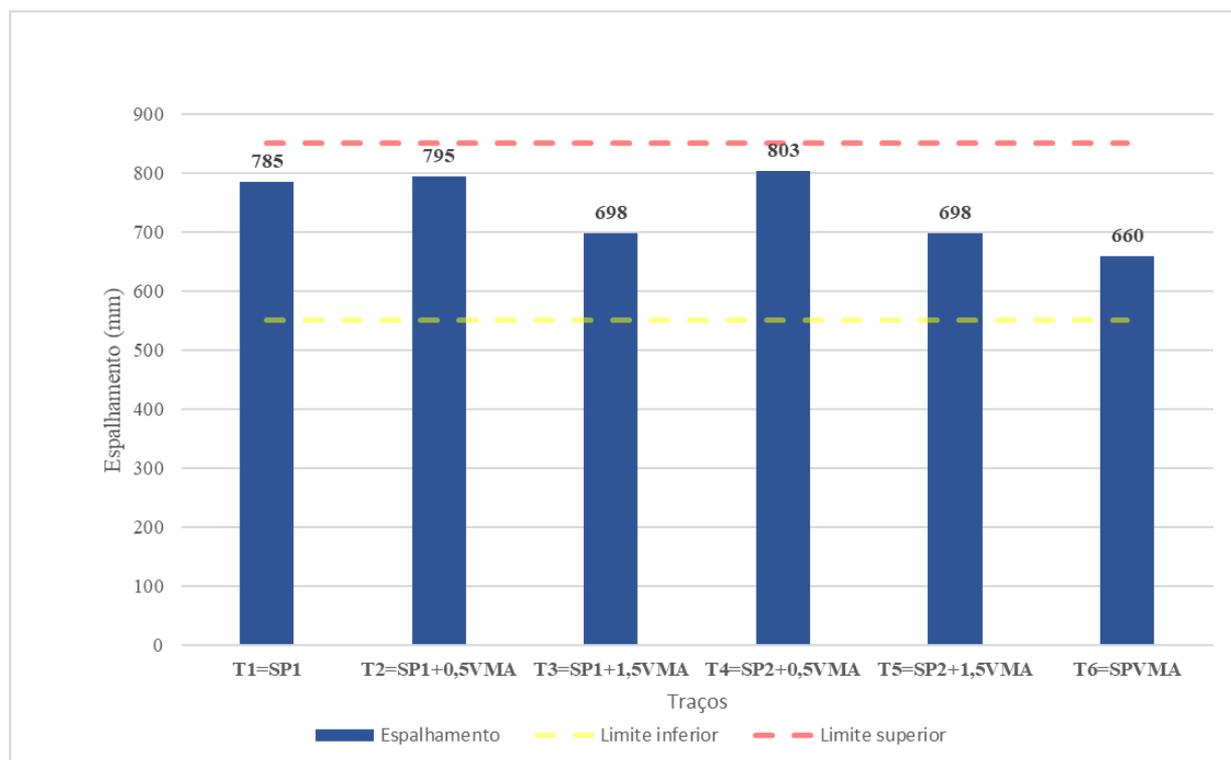
Nas imagens das partes superiores direitas das figuras Figura 4.5 e Figura 4.6, pode-se verificar que não houve exsudação. Ainda, nas demais imagens, pode-se observar que não houve concentração de agregados no centro e dispersão de argamassa nas extremidades. Com isso, os traços T5 e T6, foram classificados como altamente estáveis (IEV0).

Figura 4.6 - Traço T6 = SP_{VMA}



A Figura 4.7 apresenta os resultados do ensaio de espalhamento para todos os traços do projeto.

Figura 4.7 - Resultados do ensaio de espalhamento



O CAA pode ser classificado quanto sua fluidez de acordo com o diâmetro de espalhamento, conforme estabelecido na ABNT NBR 15823-1 (2010). Este diâmetro pode variar de 550 a 850 mm. Dessa forma, todos os tipos de concreto produzidos possuem espalhamento em conformidade com os parâmetros estabelecidos pela referida norma.

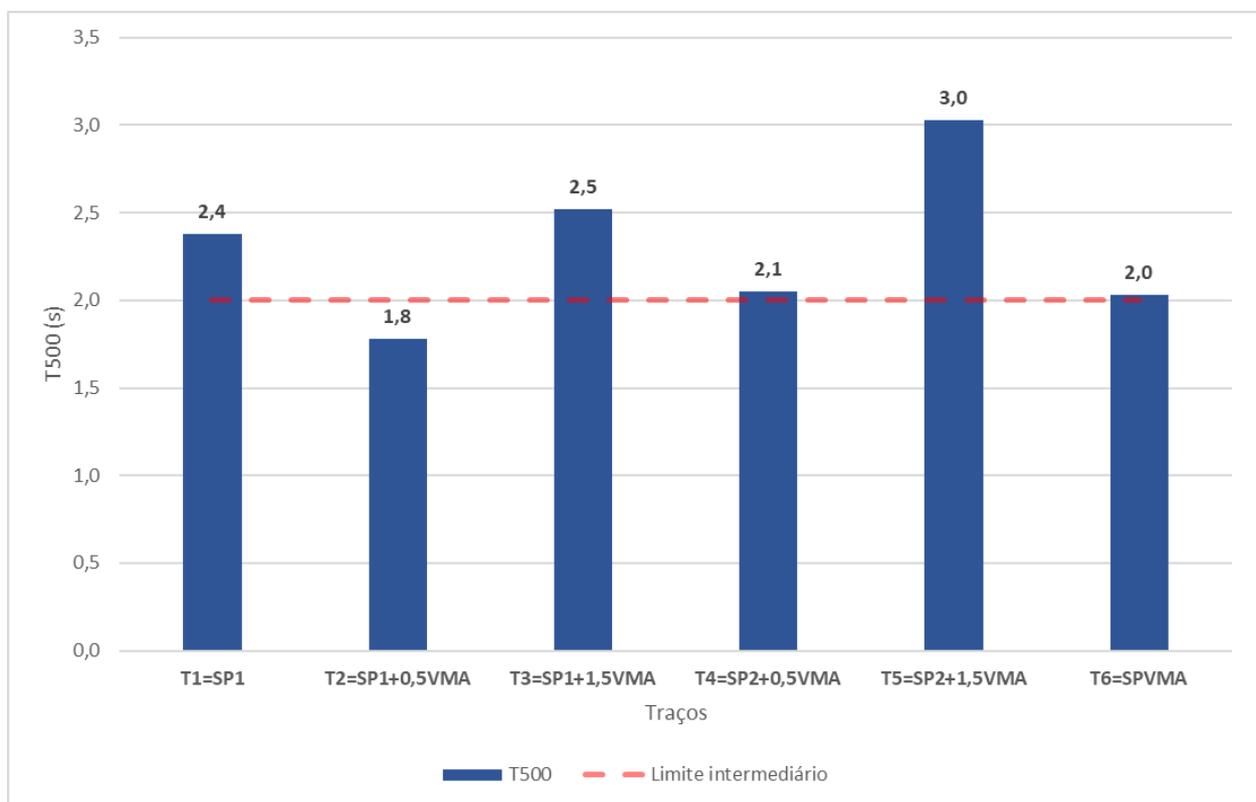
A utilização do teor de 0,5% de VMA juntamente com 0,96% do aditivo SP₁ (traço T2) pouco alterou o espalhamento do concreto em comparação com o traço referência (T1). Ainda, a porcentagem de superplastificante utilizada para o traço T1 foi de 0,99%, com isso, houve uma diferença de apenas 0,03%, o que poderia justificar a pequena alteração obtida no ensaio. É o superplastificante que garante a fluidez do concreto autoadensável (GOMES; BARROS, 2009). Ademais, para o traço T4, a dosagem de 0,5% de VMA não foi suficiente, já que ocorreu a segregação e a exsudação do concreto, conforme mostrado na Figura 4.4. Vale ressaltar que este é o teor mínimo recomendado pelo fabricante. Também, é relevante salientar que o teor de SP₂ para o traço T4 foi de 0,94%, próximo ao limite superior recomendado pelo fornecedor, que é de 1,0%, sendo este teor outra possível causa para a segregação e a exsudação do concreto.

Conforme o gráfico da Figura 4.7, o aumento da dosagem de aditivo modificador de viscosidade nos concretos para 1,5% (traços T3 e T5), gerou espalhamentos inferiores aos dos traços com teor de 0,5% de VMA (T2 e T4). Isto pode ser explicado pelo que segue: o parâmetro de controle para a confecção dos traços foi o ensaio de caixa-L, após a aceitação do concreto com o parâmetro desse ensaio, foram realizados os demais, dessa forma, a dosagem de superplastificante foi regulada até que isso ocorresse e, por conseguinte, houve variação dos teores de superplastificante, responsável por conferir ao CAA sua fluidez.

O traço T6 com o aditivo SP_{VMA} obteve resultado do ensaio de espalhamento inferior ao do traço referência T1 e aos demais. Tendo em vista que não foi possível a obtenção de sua ficha técnica junto ao fabricante, contendo os intervalos de dosagem recomendados, não podem ser feitas as mesmas conclusões realizadas para os outros traços em relação ao resultado do ensaio.

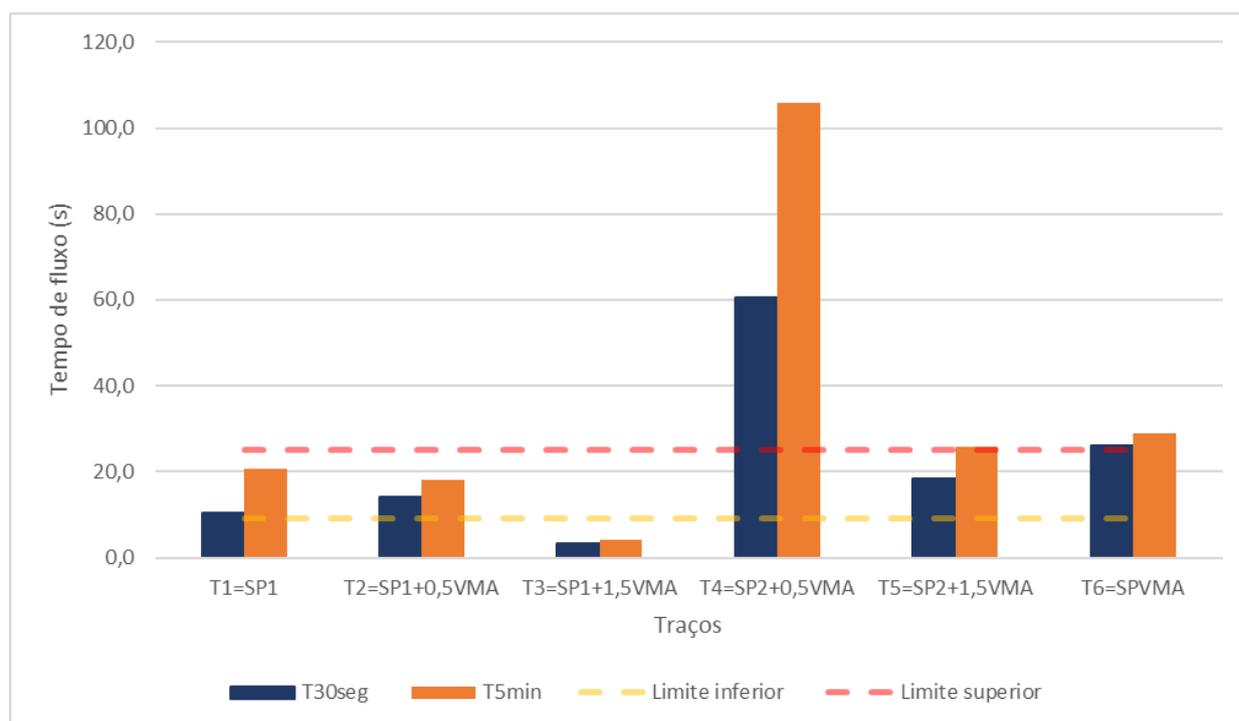
Na Figura 4.8, estão dispostos os resultados do ensaio T500.

Figura 4.8 - Resultados do ensaio T500



Para os traços T2 e T3, com a diminuição do teor de superplastificante SP₁, houve aumento do tempo de escoamento (T500). Sendo que é o teor de SP₁ que influi na fluidez, o resultado é esperado. O estudo de Vieira (2017) também obteve resultados semelhantes no ensaio, quando houve variação do teor de aditivo superplastificante. O mesmo comportamento pode ser observado para os traços T4 e T5. Pode-se inferir deste resultado que o VMA atua sobre a água livre da mistura e, com isso, não gera redução da fluidez (AITCIN, 2000). Ainda, conforme o fornecedor, o aditivo mantém as propriedades de trabalhabilidade da mistura, ou seja, não deve alterar sua fluidez. Relativamente ao traço referência T1 e ao traço T6, tal comparação não foi realizada, tendo em vista que estes possuem composições diferentes dos demais.

Figura 4.9 - Resultados do ensaio de funil-v



A classificação do CAA quanto à viscosidade se dá por intermédio dos ensaios t500 e funil V, sendo que estes referem-se, respectivamente, a situações de fluxo livre e de fluxo confinado. Segundo o fabricante do aditivo modificador de viscosidade, este possui característica de lubrificidade e conseqüente redução de atrito. Este fato pode justificar a diminuição do tempo de fluxo confinado no equipamento com o aumento do teor do aditivo VMA (de 0,5% para 1,5%) para traços T2 e T3, e, T4 e T5. Analogamente aos resultados de T500, os traços T1 e T6 não foram comparados aos demais.

4.2 ESTADO ENDURECIDO

Nesta seção, são analisados os dados obtidos a partir dos ensaios realizados nos corpos de prova de cada traço de CAA confeccionado: resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e índice de absorção. Para realização desses ensaios, foram moldados corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 100 mm x 200 mm cada. Após 24 da moldagem, realizada sem adensamento, os corpos de prova foram identificados e transferidos para uma câmara úmida, para que o processo de cura fosse efetuado. A tabela explicita a quantidade de corpos de prova que foram utilizados em cada ensaio.

Tabela 4.2 - Quantidade de corpos de prova utilizados nos ensaios

Ensaio	Norma	Quantidade de CPs
Resistência à compressão	ABNT NBR 5739: 2007	3 corpos de prova por traço, para cada idade
Resistência à tração por compressão diametral	ABNT NBR 7222: 1994	3 corpos de prova por traço
Módulo de elasticidade	ABNT NBR 8522: 2008	3 corpos de prova por traço
Absorção de água por imersão	ABNT NBR 9778: 1987	3 corpos de prova por traço

Os resultados relativos a todos os corpos de prova utilizados nos ensaios para o estado endurecido são referidos com maior detalhe em anexo. Além disso, cabe ressaltar que tais ensaios não foram realizados para o traço T4, uma vez que ocorreu segregação e os corpos de prova não foram moldados.

4.2.1 Resistência à compressão

Nas datas determinadas para execução do ensaio (7, 14 e 28 dias de idade), rompeu-se os corpos de prova para determinação da resistência à compressão, a qual foi calculada expressão a seguir.

$$f_c = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot D^2} \quad \text{Eq. 4.1}$$

f_c = resistência à compressão (MPa);

F = carga de ruptura obtida no ensaio;

D = diâmetro do corpo de prova.

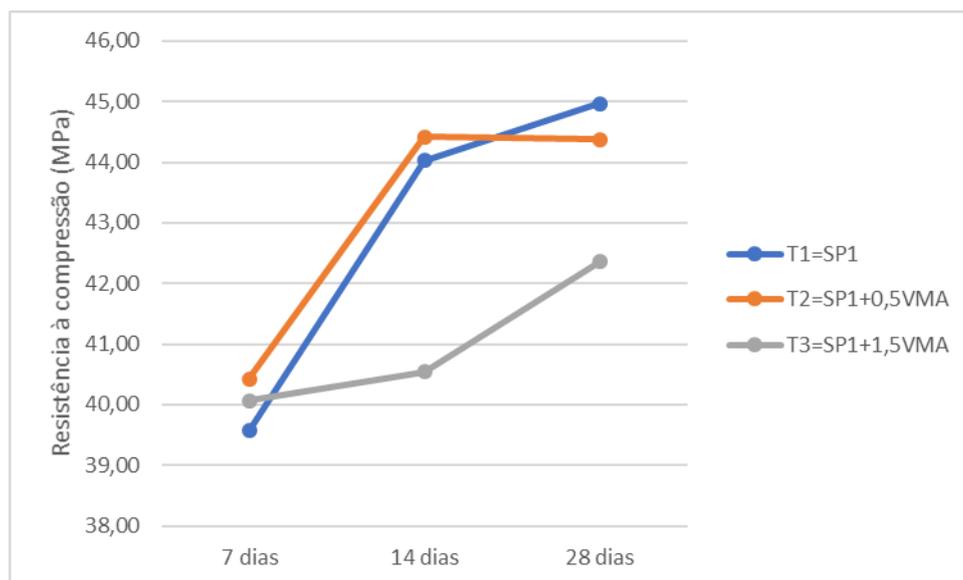
O resultado representativo de cada traço foi obtido pela média dos resultados dos corpos de prova. Tais dados são expostos na Tabela 4.3 e nos gráficos apresentados a seguir.

Tabela 4.3 - Resultados de resistência à compressão

Traços	Resistência à compressão (MPa)		
	7 dias	14 dias	28 dias
T1 = SP1-REF	39,57	44,02	44,97
T2 = SP1-0,5VMA	40,42	44,41	44,37
T3 = SP1-1,5VMA	40,07	40,54	42,35
T5 = SP2-1,5VMA	44,08	44,75	49,95
T6 = SPVMA	21,71	21,84	21,95

A Figura 4.10 apresenta a evolução da resistência à compressão para o traço T1 de referência e para os traços nos quais foi adicionado o VMA e foi utilizado o superplastificante SP₁.

Figura 4.10 - Comparação da resistência à compressão dos traços T1, T2 e T3

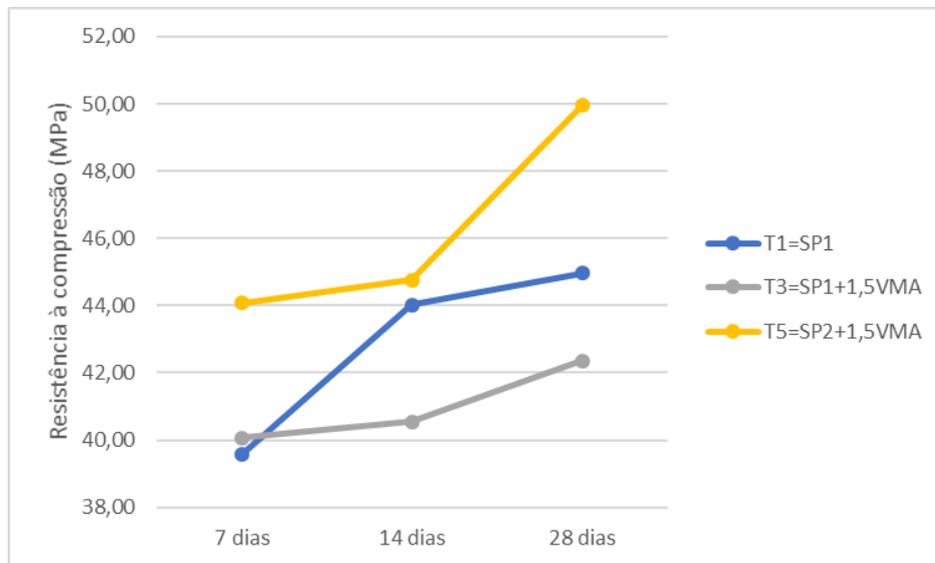


Os três traços referidos apresentaram aumento da resistência conforme o aumento de idade. Pode-se verificar que o incremento de 0,5 % de VMA não influenciou muito nos valores de resistência, uma vez que a diferença entre os valores de resistência para 28 dias dos traços T1

e T2 foi de apenas 1 %. Já o traço T3, com maior teor de VMA, apresentou diminuição de resistência em relação ao traço T1 de referência de 7,9 % para 14 dias e de 5,9 % para 28 dias.

O gráfico apresentado na Figura 4.11 mostra a comparação entre o traço T1 de referência e os dois traços que utilizaram um maior teor de VMA (1,5 %).

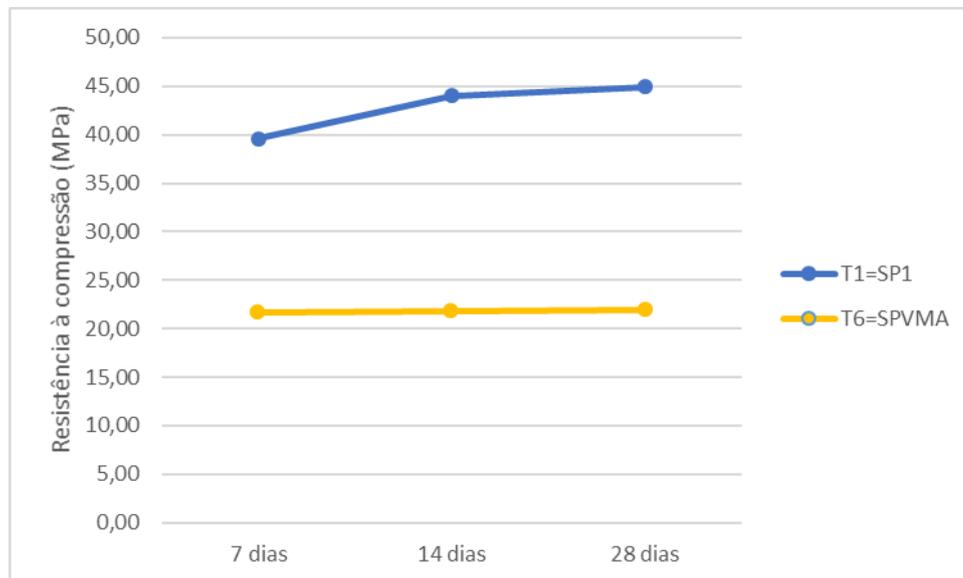
Figura 4.11 - Comparação da resistência à compressão dos traços T1, T3 e T5



Como citado anteriormente, o traço T3 apresentou pequena redução da resistência à compressão simples. Por outro lado, o traço T5, no qual foi utilizado outro superplastificante (SP₂), apresentou valores de resistência maiores. Na idade de 7 dias, o traço T5 obteve aumento de 11,3 % em relação ao traço referência. Para a idade de 14 dias, valor se manteve muito próximo aos valores verificados para os traços comparados, talvez em função da baixa qualidade dos corpos de prova utilizados nessa idade. Na idade de 28 dias, volta-se a verificar o incremento de resistência em relação ao traço T1 de referência, onde o valor é 11,1 % maior para o traço T5. Pode-se observar que o traço T5, assim como os outros traços verificados, também apresentou evolução da resistência à compressão com o avanço da idade, mesmo que em pequenos valores entre as idades de 7 e 14 dias.

A Figura 4.12 mostra a comparação entre o traço T1 de referência e o traço T6, no qual se utilizou o aditivo experimental que atua tanto como superplastificante como modificador de viscosidade.

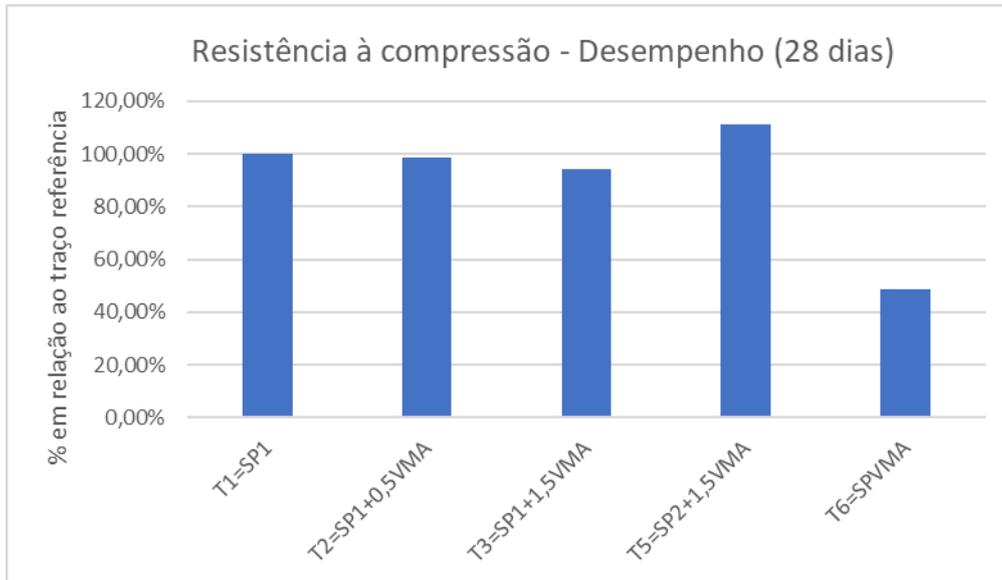
Figura 4.12 - Comparação da resistência à compressão dos traços T1 e T6



Observa-se uma grande redução dos valores de resistência, com uma diminuição de 51,2 % em relação ao traço referência para a idade de 28 dias. Os valores de resistência à compressão para o traço T3 se mantiveram praticamente constantes entre as idades de 7 e 14 dias e as idades de 14 e 28 dias, com um pequeno aumento de, respectivamente, 0,53 % e 0,50% nos referidos intervalos de tempo.

Por fim, obteve-se também o gráfico de desempenho dos traços em relação à resistência à compressão do traço referência, mostrado na Figura 4.13.

Figura 4.13 – Desempenho dos traços do projeto em relação à compressão



Pode-se visualizar melhor as informações obtidas no ensaio. O incremento do aditivo modificador de viscosidade no traço T1 de referência ocasionou pequena redução nos valores de resistência à compressão. O traço T5, contendo o outro aditivo superplastificante (SP₂), apresentou aumento da resistência com relação à referência e ao outro traço no qual se utilizou o mesmo teor de VMA (traço T3). Já para o traço T6, no qual se utilizou o SP_{VMA}, pode-se verificar a menor resistência à compressão simples dentre os traços confeccionados, chegando a metade do valor encontrado para o traço referência aos 28 dias de idade.

4.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

Na idade de 28 dias, verificou-se a resistência à tração para cada um dos traços confeccionados. A resistência à tração, em MPa, foi calculada conforme a seguinte expressão, indicada pela norma:

$$f_{t,D} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot L} \quad \text{Eq. 4.2}$$

Onde:

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

F = carga de ruptura obtida no ensaio

d = diâmetro do corpo de prova

L = altura do corpo de prova

Figura 4.14 - Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Traços	Resistência à tração - 28 dias (MPa)
T1 = SP1-REF	5,21
T2 = SP1-0,5VMA	4,94
T3 = SP1-1,5VMA	4,88
T5 = SP2-1,5VMA	4,55
T6 = SPVMA	3,14

Os resultados foram, então, comparados com a resistência do traço referência, como se pode observar nos gráficos apresentados na figura que segue. Os valores representam a média dos resultados obtidos com os corpos de prova de cada traço.

Figura 4.15 -Desempenho dos traços do projeto em relação à tração



Observa-se que a tendência verificada para os resultados de compressão foi mantida. O incremento do aditivo modificador de viscosidade no traço T2 causou uma diminuição de 6% na resistência à tração, o que foi ligeiramente intensificado pelo aumento do teor de VMA nos traços T3 e T5. Assim como para a compressão, o traço T6, contendo o aditivo SP_{VMA}, teve redução significativa da resistência, obtendo um desempenho de 60% em relação ao traço referência.

4.2.3 Módulo de elasticidade

Para os corpos de prova com 28 dias de idade, foi realizado ensaio para obtenção do módulo de elasticidade relativo a cada traço confeccionado. Os valores foram obtidos a partir do programa computacional utilizado no laboratório, o qual interpretou os dados fornecidos pelo extensômetro eletrônico associado à prensa na qual foi realizado o ensaio.

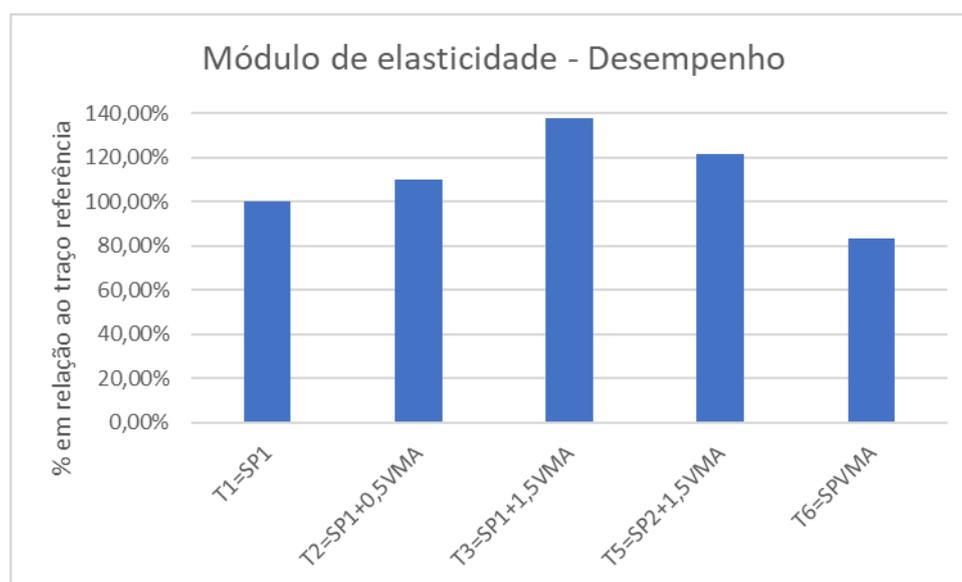
Os valores de módulo para cada traço, definidos pela média entre os resultados dos corpos de prova rompidos, são apresentados na Tabela 4.4 e na Figura 4.16, a qual contém um gráfico comparativo de desempenho em relação ao traço referência.

Tabela 4.4 - Módulo de elasticidade dos traços do projeto

Traços	Módulo de elasticidade*
T1 = SP1-REF	32,57
T2 = SP1-0,5VMA	35,85
T3 = SP1-1,5VMA	44,78
T5 = SP2-1,5VMA	39,51
T6 = SPVMA	27,18

*Os ensaios de módulo de elasticidade para os traços T1, T2 e T6 foram realizados aos 28 dias. Já para os traços T3 e T5, o ensaio foi realizado aos 35 dias.

Figura 4.16 – Desempenho dos traços em relação ao módulo de elasticidade



Observa-se na Tabela 4.4 e na Figura 4.16 que, com o incremento de VMA, obteve-se valores maiores para o módulo de elasticidade. O traço T2 com incremento de 0,5% de VMA em relação ao traço referência T1 teve um aumento de 10,1 % no módulo. Para os traços T3 e T5, cabe ressaltar que, devido a problemas com o equipamento do ensaio, só foi possível obter os valores para os corpos de prova com 35 dias de idade. Desta forma, verifica-se que o traço T5 com teor de 1,5 % de VMA teve um aumento de 37,5 % em relação ao valor do traço referência com 28 dias. Já o traço T5, obtido com o mesmo teor de 1,5 % de VMA e com o superplastificante SP₂, também obteve um acréscimo no valor do módulo, em relação ao valor do traço referência com 28 dias.

O traço T6 contendo o aditivo SP_{VMA} manteve a tendência dos ensaios de compressão e de tração, com uma diminuição de 17,5% em relação ao traço referência T1.

4.2.4 Índice de Absorção

A partir da obtenção da massa do corpo de prova seco em estufa (m_s), da massa do corpo de prova saturado (m_{sat}) e da massa do corpo de prova imerso em água (m_i), foi possível se obter os seguintes parâmetros, com base nas equações fornecidas pela norma.

$$\text{Índice de absorção} = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \cdot 100\% \quad \text{Eq. 4.3}$$

$$\text{Índice de vazios} = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \cdot 100\% \quad \text{Eq. 4.4}$$

$$\text{Massa específica} = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \cdot 100\% \quad \text{Eq. 4.5}$$

Os resultados relativos aos índices citados são apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Resultados do ensaio de absorção por imersão

Traços	Índice de Absorção (%)	Índice de Vazios (%)	Massa Específica (g/cm ³)
T1 = SP1-REF	5,03	11,75	2,65
T2 = SP1-0,5VMA	5,31	12,26	2,63
T3 = SP1-1,5VMA	5,87	13,33	2,61
T5 = SP2-1,5VMA	4,46	10,39	2,60
T6 = SPVMA	6,83	14,08	2,40

Quanto à massa específica, para todos os teores e tipos de adições, verifica-se pequenos intervalos de variação, entre 2,40 e 2,65 g/cm³. O menor valor de massa específica foi observado no traço T6, devido ao maior conteúdo de vazios verificado.

Os valores de absorção de água e de índice de vazios obtidos são inversamente proporcionais aos valores de massa específica para o traço T1 de referência e os traços com adição de VMA (traços T2 e T3). Comparando-se com os resultados de resistência à compressão, pode-se correlacionar o aumento do índice de vazios à redução da resistência, conforme se aumentou o teor de VMA.

Já para o traço T5, verificou-se diminuição da massa específica em conjunto com redução da absorção e do índice de vazios, ao contrário do que se obteve para os demais traços. Isso se deve ao fato de ter sido utilizada a média dos dados de dois corpos de prova. O menor valor de índice de vazios encontrado foi para o traço T5, traço para o qual também se verificou a maior resistência à compressão.

4.2.5 Comparação com as estimativas propostas pela NBR 6118:2014

A norma NBR 6118:2014 apresenta equações que possibilitam a estimativa da resistência à tração e do módulo de elasticidade a partir da resistência característica à compressão, as quais são apresentadas abaixo:

- Resistência característica à compressão: $f_{ck} = f_c - 1,65 \cdot S_d$
Onde $S_d = 4,0$ MPa, condição na qual o cimento e o agregado são medidos em massa
- Resistência à tração: $f_{ctk} = (0,3 \cdot f_{ck})^{2/3}$
- Módulo de elasticidade: $E = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}$
Onde α_E é igual a 0,9 para agregado graúdo calcário.

Dessa forma, os resultados experimentais relativos aos corpos de prova com 28 dias de idade são comparados na tabela a seguir com os resultados teóricos calculados pelas equações. Cabe ressaltar que a norma não distingue os valores teóricos para concretos convencionais ou para concretos autoadensáveis ou quaisquer outros tipos de concretos especiais.

Tabela 4.6 – Comparação com os resultados teóricos da NBR 6118:2014

Traço	Resultados experimentais			Resultados teóricos		
	Resistência à compressão simples (MPa)	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência característica à compressão (MPa)	Resistência característica à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
T1=SP1	44,97	5,21	32,57	38,37	5,10	31,22
T2=SP1+0,5VMA	44,37	4,95	35,85	37,77	5,04	30,97
T3=SP1+1,5VMA	42,35	4,88	44,78	35,75	4,86	30,13
T5=SP2+1,5VMA	49,95	4,55	39,51	43,35	5,53	33,18
T6=SPVMA	21,95	3,14	27,18	15,35	2,77	19,75

Pode-se verificar que o traço referência atinge, para as propriedades mecânicas, valores maiores do que os valores teóricos calculados. Com o incremento de VMA nos traços T2, T3 e T5, os valores se mantiveram acima dos teóricos, com exceção da resistência à tração para o traço T2, os quais ficaram, respectivamente, % e % abaixo do valor calculado. O traço T6, obtido com a utilização do aditivo SPVMA, atingiu valores maiores do que os valores obtidos pelas equações.

4.3 PASTA DE CIMENTO

4.3.1 Análise Termogravimétrica

Tendo em vista imprevistos ocorridos com o equipamento de análise termogravimétrica, não foi possível incluir os resultados do ensaio nessa pesquisa.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa analisou a influência da incorporação de aditivos químicos ao concreto autoadensável, o qual foi dosado de forma a se enquadrar na linha de pesquisa da Prof. Dr. Valdirene Maria Silva Capuzzo da Universidade de Brasília acerca de concretos autoadensáveis. Dessa forma, são apresentadas a seguir as principais conclusões obtidas:

- Com exceção do traço T4, todos os traços estiveram em conformidade com os requisitos necessários para que o concreto fosse classificado como autoadensável, comprovando a eficiência da dosagem adotada na linha de pesquisa.
- Tendo em vista que o parâmetro HP do ensaio da caixa-L foi utilizado como padrão para todos os traços, pode-se inferir que foi o teor de superplastificante (SP₁ e SP₂) o principal responsável na alteração das propriedades no estado fresco dos traços deste projeto, o que condiz com os resultados de pesquisas anteriores (VIEIRA, 2017).
- Com relação às propriedades mecânicas, nos traços T2 e T3, a utilização do aditivo VMA gerou redução, respectivamente, de 1% e de 5,9% na resistência à compressão para a idade de 28 dias em relação ao traço referência.
- Verificou-se também que o aditivo superplastificante SP₂, presente no traço T5 em conjunto com 1,5 % de VMA, obteve resultados superiores aos do traço de referência T1 nas seguintes propriedades: resistência à compressão e módulo de elasticidade.
- Para aditivo que atua como superplastificante e modificador de viscosidade, SP_{VMA}, presente no traço T3, observou-se variação nos resultados obtidos nos ensaios do estado endurecido em relação ao traço referência T1, chegando a apresentar redução de metade do valor da resistência à compressão.

5.1 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Com a realização da pesquisa e os estudos necessários a respeito do tema abordado, foi possível elaborar algumas sugestões:

- Verificar a eficiência de outros tipos de ensaios que avaliem a característica de autoadensabilidade do concreto.
- Analisar o mecanismo de atuação dos aditivos químicos na mistura no estado fresco.
- Estudos a respeito da viabilidade econômica dos aditivos químicos utilizados, na produção do concreto autoadensável.
- Avaliação da influência dos aditivos superplastificantes e modificadores de viscosidade no tempo de pega do cimento.

6 REFERÊNCIAS

ALONSO, M. M. *et al.* Influência de la Estructura de Aditivos Basados en Policarboxilato Sobre el Comportamiento Reológico de Pastas de Cemento. *Materiales de Construcción*, v. 57, n. 286, p. 65-81, abr./jun. 2007.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 237R-07: Self-Consolidating Concrete, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10908: Aditivos para argamassa e concreto – Ensaio de Caracterização. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11579: Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 μm (nº 200). Rio de Janeiro, 1991.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-2: Concreto Autoadensável: 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: Determinação da habilidade passante – Método da caixa L. Rio de Janeiro, 2010.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9976: Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 26: Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 27: Agregados - Redução de amostras de campo para ensaio de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 46: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 65: Cimento portland – Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

ASTM INTERNATIONAL. C 1610: *Static Segregation of Self- Consolidating Concrete Using Column Technique*. EUA, 2010.

ASTM INTERNATIONAL. C 1611: Slump flow of Self-Consolidating Concrete. EUA, 2010.

BARBOSA, M. P. Desenvolvimento normativo do concreto autoadensável - a NBR 15823 revisada. Belo Horizonte, MG, 2016. 48 slides, color. III Seminário sobre pesquisas e obras em concreto autoadensável – 58°CBC. Disponível em: <<http://ibracon.org.br/eventos/58cbc/Palestras/04MonicaBarbosa.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2017.

BENNENK, W. (2002) “SCC in Daily Precast Concrete Practice”, *Betonwerk and Fertigteiltechnik*, V. 34, Issue 4.

DOMONE, P. L.; CHAI, H. W. (1996) Design Testing of Self-Compacting Concrete. In: International Rilem Conference on Production Methods and Workability of Concrete, P.J.M. Bartos, D.L. Marris e D.J. Ceand (editores), E & FN Spon, 223-252.

DWECK, J.; BUCHLER, P. M.; COELHO, A. C. V.; CARTLEDGE, F. K. Hydration of a Portland Gonçalves, J. P.; Toledo Filho, R. D.; Fairbairn, 94 E. M. R. cement blended with calcium carbonate. *Thermochimica Acta*, n. 346, p. 105-113, 2000.

EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICAL AND CONCRETE SYSTEMS - EFNARC. Specification and Guidelines for Self-Compacting

Concrete. Specification, Production and Use. Londres: EFNARC, mai. 2005. 63p. Disponível em: <<http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf>>. Acesso em: maio de 2017.

FLATT, R. J. *et al.* (2009) “*Conformation of Adsorbed Comb Copolymer Dispersants.*” *Langmuir*, v. 25, p. 845-855.

GIOLITO, I.; IONASHIRO, M. A. Nomenclatura, padrões e apresentação dos resultados em análise térmica. *Cerâmica*, v. 26, n. 121, p. 17-24, 1980.

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R.. Métodos de Dosagem de Concreto Autoadensável. 1ª edição, pág 165, editora PINI, 2009.

GRIESSER, A. Cement: superplasticizer interactions at ambient temperatures. Zurich, 2002. 147 f. Tese (Doutorado) - Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2002.

HUI, W. *et al.* Research on Synthesis and Action Mechanism of Polycarboxylate Superplasticizer. *Frontiers of Chemistry in China*, v. 2, p. 322-325, 2007.

K. C. HOVER, Concrete mixture proportioning with waterreducing admixtures to enhance durability: a quantitative model, *Cem. Concr. Comp.* 20, 2-3 (1998) 113-119.

K. YAMADA, T. TAKAHASHI, S. HANEHARA, M. MATSUHISA, Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer, *Cem. Concr. Res.* 30, 2 (2000) 197-207.

KANELLOPOULOS A.; PETROU M.F.; IOANNOU I. Durability performance of selfcompacting concrete. *Constr Build Mater*, 2012; 37:320–5.

KHAYAT, K. H.; GUIZANI, Z. (1997) Use of Viscosity-Modifying Admixture to Enhance Stability of Fluid Concrete, *ACI Materials Journal*, v. 94, n.4, p. 332-340.

LISBÔA, E. M. Obtenção do Concreto Auto-Adensável Utilizando Resíduo do Beneficiamento do Mármore e Granito e Estudo de Propriedades Mecânicas. 2004. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pósgraduação em Engenharia Civil., Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2004. Disponível em: <http://www.ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgec/dissertacoes_arquivos/Dissertacoes/EdvaldoMonteiroLisboa.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2017.

M. YOUSUF, A. MOLLAH, P. PALTA, T. R. HESS, R. K. VEMPATI, D. L. COCKE, Chemical and physical effects of sodium lignosulfonate superplasticizer in the hydration of Portland cement and solidification/stabilization consequences, *Cem. Concr. Res.* 25, 3 (1995) 671-682.

MAGENHEIM, B.; BENITA; S.; S.T.P. *Pharma Sci.* 1991, 1, 221

MALVERN. Zetasizer Nano Series User Manual. User Manuals, England, 2004. Disponível em:<http://www.biophysics.bioc.cam.ac.uk/files/Zetasizer_Nano_user_manual_Man0317-1.1.pdf>. Acesso em: 29/05/2017.

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

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

MARSH, B. K.; DAY, R. L. Pozzolanic and cementitious reactions of fly ash and blended cement pastes. *Cement and Concrete Research*, v. 18, p. 301-310, 1988.

MASSAZZA, F. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. 4th ed. London: Arnold, 1998.

MATOS J. R.; MERCURI, L.; BARROS, G. Análise térmica aplicada a fármacos e medicamentos. In: STORPIRTIS, S. et al. *Biofarmacotécnica*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2009. cap. 4, p. 32 – 65.

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

MENDES, M. V. A. S. (2016). Estudo dos parâmetros de autoadensabilidade e de reologia de argamassas e de concretos autoadensáveis. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD – 9A/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 232 p.

NEVILLE, A. M. (1997) *Propriedades do concreto*. São Paulo: Pini.

NEVILLE, A. M. (2011) *Properties of Concrete*, 5th edition, Pearson Education Limited, Harlow, England, 2011, ISBN 978-0-273-75580-7

NORMA EUROPEIA. EN 12350-8: Ensaio de espalhamento. Bruxelas, 2010.

NORMA EUROPEIA. EN 12350-9: Ensaio de escoamento no funil V. Bruxelas, 2010.

OKAMURA H., OUCHI M. (1999) “Self-compacting concrete - Development, present and future”, *Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, pp. 3-14.

OKAMURA H., OZAWA K. (1994) “Self Compactible High Performance Concrete in Japan”, *ACI Internacional Workshop on High Performance Concrete*, SP-159, P. Zia, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., pp. 31-44.

OUCHI M. (2001) “ Current Condition of Self-compacting concrete in Japan ”, *Proceedings of the Second Internacional Symposium on SCC*, K. Ozawa and M. Ouchi, eds., Tokyo, pp. 63-68.

P.-C. AİTCIN, C. JOLICOEUR, J. G. MACGREGOR, Superplasticizers: how they work and why they occasionally don't, *Concrete Int.* 16, 5 (1994) 45-52.

PERRATON D.; AİTCIN P.C.; CARLES-GBERGUES A.; Permeability as seen by researchers. In: Malier Y, editor. *High Performance Concrete: From Material to Structure*. London, UK: E & FN Spon; 1994. p. 252–75.

PERSSON, B. (1999) “Creep, Shrinkage and Elastic Modulus of Self-Compacting Concrete”, *RILEM Proceedings*.

PETERSSON, Ö., BILLBERG, P., VAN, B. K, “A model for self-compacting concrete”, In: BARTOS, P. J. M.; MARRS, D. L.; CLEAND, D. J.(eds), In: *Proc. International RILEM Conference on Production Methods and Workability of Concrete*, E & FN, pp. 483-492, 1996.

PLANK, J. *et al.* Synthesis and Performance of Methacrylic Ester Based Polycarboxylate Superplasticizers Possessing Hydroxyl Terminated Ppoly (Ethylene Glycol) Side Chains. *Cement and Concrete Research*, v. 38, p. 1210-1216, 2jan. 2008.

RAMACHANDRAN, V. S.; BEAUDOIN, J. J. Handbook of analytical techniques in concrete. Park Ridge, NJ: Noyes Publications, 2001.

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.

RIXON, M.R.; MAILVAGANAM, N. P. Chemical admixture for concrete. Ed. E & FN Spon, London, UK, 1999. 437p.

ROJAS, Carolina Martínez; CINCOTTO, Maria Alba. Influência da estrutura molecular dos policarboxilatos na hidratação do cimento Portland. *Ambient. constr.*, Porto Alegre , v. 13, n. 3, p. 267-283, Sept. 2013. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S167886212013000300016&lng=en&nrm=iso>. Acessado em 19 Novembro 2017.

SAKATA, N.; MARUYAMA, K.; MINAMI, M. (1996) Basic Properties and Effects of Welan Gun on Self-Consolidating Concrete. In: International Rilem Conference on Production Methods and Workability of Concrete. P. J. M. Bartos, D. L. Marrs and D. J. Cleand (editores), E & fn Spon, p 237-253.

SHADKAM, H. R. ; DADSETAN S. ; TADAYON, M. ; SANCHEZ, L. F. M. ; ZAKERI J. A. ; An investigation of the effects of limestone powder and Viscosity Modifying Agent in durability related parameters of self-consolidating concrete (SCC). *Construction and Building Materials*, Dez. 2017.

SONEBI M.; BARTOS, P. J. M. (1999) “Hardened SCC and its Bond with Reinforcement”, *Proceedings of the First International RILEM Symposium on SCC*, Stockholm, Sept., pp. 275-289.

SONEBI M.; BARTOS, P. J. M. (2001) “ Performance of Reinforced Columns Cast with Self-Compacting Concrete”, *Proceedings of the Fifth CANMET/ACI International Conference*, SP-200, V.M. Malhora, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., pp. 415-431.

SONEBI M.; ZHU, W. ; GIBBS, J. (2001) “ Bond of Reinforcement in Self-Compacting Concrete”, *Concrete*, V.35, No. 7, July-Aug., pp. 26-28.

T. M. VICKERS JR., S. A. FARRINGTON, J. R. BURY, L. E. BROWER, Influence of dispersant structure and mixing speed on concrete slump retention, *Cem. Concr. Res.* 35, 10 (2005) 1882-1890.

TAYLOR, H. F. W. *Cement chemistry*. 2. ed. London: Thomas Telford, 1997.

TUTIKIAN, B. ALENCAR, R; BATTAGIN, I. L. S. GIL, A. RISSARDI, C. Novas normas brasileiras para controle e aceitação do concreto autoadensável. *Concreto & Construções*, São Paulo: IBRACON, v. 84, ano XLIV, p.60-67, out. - dez. 2016. Trimestral.

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

UCHIKAWA, H.; HANEHARA, S.; SAWAKI, D. (1997) "The Role of Steric Repulsive Force in the Dispersion of Cement Particles in Fresh Paste Prepared With Organic Admixture. *Cement and Concrete Research*, v. 27, p. 37-50, 1997.

VIEIRA, S. P. (2017). Propriedades do concreto autoadensável com diferentes tipos de adições. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-06A/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 126 p.

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

WINNEFELD, F. *et al.* (2007) Interaction of Polycarboxylate-Based Superplasticizer and Cements: influence of polymer structure and C3A content of cement. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 12., Montreal. Proceedings... Montreal, 2007b.

WINNEFELD, F. *et al.* Effects of the Molecular Architecture of Comb-Shaped Superplasticizers on Their Performance in Cementitious Systems. *Cement and Concrete Composites*, v. 29, p. 251-262, 2007a.

YURUGI, M., SAKAI, G., & SAKATA, N. (1995). "Viscosity agent and mineral admixtures for highly fluidized concrete". *Proceedings, Concrete under Severe Conditions, Environment and Loadings*, 2, 995-1004.

ZHU, W. ; GIBBS, J. C. ; BARTOS, P. J. M. (2001) “Uniformity of In-Situ-Properties of Self-Compacting Concrete in Full-Scale Structural Elements”, *Cement and Concrete Composites*, V. 23, No. 1, pp. 57-64.

ZHU, W.; BARTOS, P. J. M. (2003) “Permeation Properties of Self-Compacting Concrete”, *Cement and Concrete Composites*, V. 23, No. 1, pp. 57-64.

ZINGG, A. *et al.* (2009) Interaction of Polycarboxylate-Based Superplasticizers With Cements Containing Different C3A Amounts. *Cement and Concrete Composites*, v. 31, p. 153-162.

7 ANEXOS – ESTADO ENDURECIDO

Nas tabelas a seguir, são apresentados os resultados referentes aos ensaios para o estado endurecido, para cada corpo de prova.

Tabela 7.1 – Resultados de Resistência à compressão simples

Traço	Resistência à compressão simples (MPa)						Desempenho (%)
	7 dias		14 dias		28 dias		
T1=SP1-REF	38,17	39,57	45,56	44,02	44,69	44,97	100,00
	40,11		43,21		44,17		
	40,43		43,30		46,04		
T2=SP1-0,5VMA	40,65	40,42	45,20	44,41	44,78	44,37	99,59
	40,27		41,10		45,76		
	40,34		46,94		42,57		
T3=SP1-1,5VMA	40,81	40,07	40,45	40,89	44,77	42,35	94,19
	39,87		40,28		39,94		
	39,53		40,89		42,34		
T5=SP2-1,5VMA	43,77	44,08	44,79	44,91	49,97	49,95	111,13
	45,72		44,56		50,01		
	42,74		44,91		49,88		
T6=SPVMA	20,87	21,74	22,26	21,84	22,36	21,95	48,82
	22,63		21,77		24,05		
	21,63		21,48		19,44		

Tabela 7.2 – Resultados de Resistência à tração por compressão diametral

Traço	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)		
	28 dias		Desempenho (%)
T1=SP1-REF	5,44	5,21	100,00
	5,05		
	5,14		
T2=SP1-0,5VMA	4,95	4,95	94,91
	4,75		
	5,14		
T3=SP1-1,5VMA	4,32	4,88	93,59
	4,99		
	5,33		
T5=SP2-1,5VMA	4,08	4,55	87,32
	4,52		
	5,05		
T6=SPVMA	3,13	3,14	60,32
	3,11		
	3,20		

Tabela 7.3 – Resultados do Módulo de Elasticidade

Traço	Módulo de elasticidade (GPa)		
	28 dias		Desempenho (%)
T1=SP1-REF	29,02	32,57	100,00%
	36,11		
T2=SP1-0,5VMA	33,49	35,85	110,07%
	38,20		
T3=SP1-1,5VMA	45,13	44,78	137,49%
	44,42		
T5=SP2-1,5VMA	38,96	39,51	121,33%
	40,06		
T6=SPVMA	27,61	27,18	83,46%
	26,75		

*Os ensaios de módulo de elasticidade para os traços T1, T2 e T6 foram realizados aos 28 dias. Já para os traços T3 e T5, o ensaio foi realizado aos 35 dias.

Tabela 7.4 – Resultados do Índice de Absorção por Imersão

Traço	Índice de absorção								
	Massa seca (g)		Massa saturada (g)		Massa imersa (g)		Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica (g/cm ³)
T1=SP1-REF	3,67	3,65	3,86	3,83	2,30	2,27	5,03	11,75	2,65
	3,69		3,84		2,27				
	3,58		3,79		2,24				
T2=SP1-0,5VMA	3,59	3,58	3,76	3,77	2,22	2,22	5,31	12,26	2,63
	3,53		3,74		2,19				
	3,62		3,81		2,25				
T3=SP1-1,5VMA	3,55	3,57	3,76	3,78	2,18	2,11	5,87	13,33	2,40
	3,60		3,81		2,24				
	-		-		-				
T5=SP2-1,5VMA	3,65	3,58	3,75	3,74	2,23	2,21	4,46	10,42	2,60
	3,52		3,74		2,19				
	-		-		-				
T6=SPVMA	3,26	3,22	3,48	3,44	1,91	1,88	6,83	14,08	2,62
	3,22		3,43		1,87				
	3,19		3,42		1,86				

*Os ensaios de módulo de elasticidade para os traços T3 e T6 foram realizados apenas para 2 corpos de prova cada.