



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

RENAN BOZELLI FERMINO

**AVALIAÇÃO DO TEMPO DE MANUTENÇÃO DE ADITIVOS
QUÍMICOS PARA PRODUÇÃO DE CONCRETO
AUTOADENSÁVEL:
UMA TRANSFERÊNCIA DE TECNOLOGIA DO
LABORATÓRIO À OBRA**

Londrina
2023

RENAN BOZELLI FERMINO

**AVALIAÇÃO DO TEMPO DE MANUTENÇÃO DE ADITIVOS
QUÍMICOS PARA PRODUÇÃO DE CONCRETO
AUTOADENSÁVEL:
UMA TRANSFERÊNCIA DE TECNOLOGIA DO
LABORATÓRIO À OBRA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina - UEL, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof.^a Dr.^a Berenice Martins Toralles

Londrina
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

Fermino, Renan Bozelli.

AVALIAÇÃO DO TEMPO DE MANUTENÇÃO DE ADITIVOS QUÍMICOS PARA PRODUÇÃO DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL: UMA TRANSFERÊNCIA DE TECNOLOGIA DO LABORATÓRIO À OBRA / Renan Bozelli Fermino. - Londrina, 2023.
158 f. : il.

Orientador: Berenice Martins Toralles.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2023.

Inclui bibliografia.

1. Concreto autoadensável - Tese. 2. Transferência de tecnologia de sua produção laboratorial à obra - Tese. 3. Estudo dos aditivos químicos - Tese. 4. Tempo de manutenção de aditivos químicos - Tese. I. Martins Toralles, Berenice . II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU 62

RENAN BOZELLI FERMINO

**AVALIAÇÃO DO TEMPO DE MANUTENÇÃO DE ADITIVOS
QUÍMICOS PARA PRODUÇÃO DE CONCRETO
AUTOADENSÁVEL:
UMA TRANSFERÊNCIA DE TECNOLOGIA DO
LABORATÓRIO À OBRA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina - UEL, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof.^a Dr.^a Berenice Martins
Torales
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof.^a Dr.^a Nayara Soares Klein
Universidade Federal do Paraná – UFPR

Prof.^a Dr.^a Wanessa Roberta Fazinga
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Londrina, 27 de fevereiro de 2023.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida e por estar ao meu lado em toda a trajetória, me guiando e me presenteando com maravilhosas oportunidades e pessoas ao longo dessa caminhada.

A minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Berenice Martins Toralles, por ter acreditado em meu potencial desde o primeiro momento, pelas orientações e empenho ao longo da minha pesquisa, permitindo-me viver momentos de alegria e muito aprendizado que serão eternizados em minha memória. Agradeço por todo carinho, dedicação e ensinamentos.

Aos meus pais, Nilza Bozelli Fermino e Nivaldo Aparecido Fermino por compartilharem comigo todas as minhas conquistas, por me defenderem em todas as lutas e por serem sempre o meu alicerce mais precioso. Meu amor por vocês é infinito.

Ao meu irmão, Ramon Bozelli Fermino, que foi e é um ser humano de inspiração pra mim, onde estive a todo o tempo do meu lado, me apoiando e me lembrando sempre que eu posso e sou capaz. Não sei o que eu seria sem você.

Aos meus amigos do programa, em especial a Fernanda Diniz Avila, por estar presente desde o período da graduação, passando por todo o nervosismo da inscrição e felicidade com a aprovação no mestrado, me proporcionando risadas únicas em toda essa caminhada. Você estará sempre em meu coração.

Ao meu amigo e companheiro de casa Maxsuillian Raimundo Detogni, por todo apoio e auxílio nestes anos, por me proporcionar momentos únicos e me acalmar quando preciso. Meu amor transborda por você.

Ao meu irmão da vida, Kayan Leite Camargo, que sempre estive do meu lado nos momentos em que foi necessário sair, espairar e compartilhar minhas alegrias e dificuldades. Eu amo você e sou grato pela sua amizade.

À CAPES pela bolsa recebida durante o desenvolvimento do mestrado.

Agradeço imensamente ao Roger Paranzini Guizilini da concreiteira Concrenorte, da cidade de Arapongas-PR, por todo apoio, investimento, tempo e

conhecimento transmitido.

Aos alunos de iniciação científica, Eduardo Yudi Miazaki e Stefany Santos, pelo auxílio paciência na elaboração dos ensaios e por toda a disposição em me ajudar nessa pesquisa.

À Maria Fernanda Porto e Francieli Stéfani Cofani Pinto, por me apoiar em todas as dúvidas pertinentes as cálculos de doagem.

E a todos que contribuíram de alguma maneira para o desenvolvimento desse trabalho e construção deste sonho.

*“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu,
mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre
aquilo que todo mundo vê.”*

Arthur Schopenhauer

FERMINO, Renan Bozelli. **Avaliação Do Tempo De Manutenção De Aditivos Químicos Para Produção De Concreto Autoadensável: Uma Transferência De Tecnologia Do Laboratório À Obra**. 2023. 158 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2023.

RESUMO

O concreto autoadensável é um material com capacidade de fluir com facilidade dentro das formas, passando pelas armaduras e preenchendo os espaços sob o efeito de seu peso próprio, sem a necessidade de vibração ou compactação mecânica. É obtido pela ação de aditivos superplastificantes, que proporcionam maior facilidade de bombeamento, excelente homogeneidade, resistência e durabilidade. Pela viabilidade do seu uso, estudos sobre o tema se tornam importantes, relatos sobre metodologias de dosagem são escassas e estudo e produção do material diretamente *in loco* são ainda mais raros. Com isso, o trabalho tem por objetivo avaliar a manutenção da trabalhabilidade de aditivos químicos e as características de um concreto autoadensável, com transferência de tecnologia do laboratório à obra. Além disso, avaliam-se parâmetros que interferem em sua dosagem e no seu processo de produção. Desse modo, dada a dosagem dos concretos que tem como fundamento a relação matriz cimentícia/vazios do esqueleto granular, é estudado o tempo de manutenção dos aditivos até os sessenta minutos da produção da argamassa e concreto com o intuito de avaliar a sua manutenção quanto às características do concreto autoadensável. Como o superplastificante à base de policarboxilato tende a perder suas propriedades com o tempo, um aditivo com base de lignossulfonato é estudado inicialmente na mistura dos materiais cimentícios com o intuito de conferir trabalhabilidade e só depois a inserção do policarboxilato com o objetivo de entregar um concreto com propriedades satisfatórias de autoadensabilidade em obra. Com relação aos resultados, afirma-se que das argamassas produzidas, todas alcançaram valores dentro dos limites de autoadensabilidade. Infere-se ainda sobre a etapa de argamassa que a àquela que possui 80% de excesso de pasta em relação ao volume de vazios do agregado miúdo, com adição de 0,15% (para um aditivo com base de policarboxilato) e 1,10% (para um com policarboxilato + nanopartículas de sílica) em relação à massa de cimento possuem os melhores resultados para serem levadas a frente no estudo de concreto, pois obtiveram autoadensabilidade dentro dos 60 minutos analisados e tem o menor excesso de pasta estudado, resultando em um menor consumo de cimento por metro cúbico e menor gasto com aditivos. Em se tratando da manutenção dos aditivos, dois traços de concreto foram produzidos em laboratório, possuindo propriedades bastante satisfatórias quanto à autoadensabilidade, atingindo resistências de até 57,10 MPa aos 14 dias. Ao ser feita a transferência de tecnologia, um traço foi levado para estudo *in loco*, onde foi produzido 2,5m³ de concreto, caracterizado como autoadensável em até 2 horas analisadas, com resistência média de 47,01 MPa em 7 dias. Desta forma, o estudo de manutenção dos aditivos foi atingida com êxito e a transferência de tecnologia concluída com sucesso, uma vez que o comportamento laboratorial e em obra dos aditivos foi bastante semelhante, possibilitando sua trabalhabilidade e propriedades autoadensáveis em até 120 minutos em obra.

Palavras-chave: Concreto autoadensável. Manutenção de aditivo químico. Autoadensabilidade. Lignossulfonato. Policarboxilato. Transferência de tecnologia.

FERMINO, Renan Bozelli. **Evaluation of the Maintenance Time of Chemical Additives for the Production of Self-Compacting Concrete: A Transfer of Technology from the Laboratory to the Site.** 2023. 158 p. Dissertation (Master in Civil Engineering) – State University of Londrina, Londrina, 2023.

ABSTRACT

Self-compacting concrete is a material capable of flowing easily within the forms, passing through the reinforcements and filling the spaces under the effect of its own weight, without the need for vibration or mechanical compaction. It is obtained by the action of superplasticizing additives, which provide easier pumping, excellent homogeneity, resistance and durability. Due to the feasibility of its use, studies on the subject become important, reports on dosage methodologies are scarce and study and production of the material directly in loco are even rarer. With this, the objective of this work is to evaluate the maintenance of the workability of chemical additives and the characteristics of a self-compacting concrete, with transfer of technology from the laboratory to the construction site. In addition, parameters that interfere with its dosage and production process are evaluated. Thus, given the dosage of concrete based on the cementitious matrix/void ratio of the granular skeleton, the maintenance time of the additives is studied up to sixty minutes of mortar and concrete production in order to evaluate their maintenance in terms of the characteristics of self-compacting concrete. As the polycarboxylate-based superplasticizer tends to lose its properties over time, an additive based on lignosulfonate is initially studied in the mixture of cementitious materials in order to confer workability and only after the insertion of the polycarboxylate with the objective of delivering a concrete with satisfactory self-compacting properties on site. With regard to the results, it is stated that of the mortars produced, all reached values within the limits of self-densification. It is also inferred about the mortar stage that the one that has 80% excess paste in relation to the volume of voids in the fine aggregate, with addition of 0.15% (for an additive based on polycarboxylate) and 1.10 % (for one with polycarboxylate + silica nanoparticles) in relation to the cement mass have the best results to be taken forward in the study of concrete, as they obtained self-densification within the 60 minutes analyzed and have the lowest paste excess studied, resulting in a lower consumption of cement per cubic meter and lower spending on additives. With regard to the maintenance of additives, two concrete mixes were produced in the laboratory, with very satisfactory properties in terms of self-compacting, reaching strengths of up to 57.10 MPa after 14 days. When the technology was transferred, a mix was taken for on-site study, where 2.5m³ of concrete was produced, characterized as self-compacting in up to 2 analyzed hours, with an average strength of 47.01 MPa in 7 days. In this way, the maintenance study of the additives was successfully achieved and the technology transfer successfully concluded, since the behavior of the additives in the laboratory and on site was very similar, enabling their workability and self-compacting properties in up to 120 minutes on site.

Key-words: Self-compacting concrete. Chemical additive maintenance. Self-compacting. Lignosulfonate. Polycarboxylate. Technology transfer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma do conteúdo da revisão bibliográfica.....	25
Figura 2 - Fluxograma do método de dosagem de Porto (2020)	32
Figura 3 – Equipamentos dos ensaios (a) <i>Slump Flow Test</i> , (b) <i>Slump Flow Test</i> com anel japonês, (c) Funil-V e (d) Caixa-L.....	35
Figura 4 - Dimensões do cone de Marsh.....	42
Figura 5 - Curva para definição do ponto de saturação do aditivo superplastificante	43
Figura 6 - Ilustração do tronco de cone de consistência.....	44
Figura 7 - Ilustração do funil-V	45
Figura 8 - Procedimento expedito (T_{risco}).....	46
Figura 9 - Estrutura molecular dos policarboxilatos éster	51
Figura 10 - Interação entre as partículas de cimento e o polímero	52
Figura 11 – Esquema explicativo sobre o calor de hidratação do cimento.....	54
Figura 12 - Ação eletrostática sobre os grãos de cimento	56
Figura 13 – Manutenção de aditivos químicos no concreto – traço 1	56
Figura 14 – Manutenção de aditivos químicos no concreto	57
Figura 15 – Percentual de perda de desempenho das pastas.....	58
Figura 16 - Curva granulométrica do agregado miúdo.....	64
Figura 17 - Curva granulométrica do agregado graúdo (brita e pedrisco).....	65
Figura 18 – Maior compactidade do agregado graúdo	67
Figura 19 – Material retido na peneira de número 200	68
Figura 20 - Fluxograma das etapas desenvolvidas na pesquisa	69
Figura 21 - Fluxograma das etapas desenvolvidas na pesquisa	70
Figura 22 - Cone de Marsh.....	71
Figura 23 - Enchimento de frasco com 200 mL de pasta.....	72
Figura 24 - Fluxograma do procedimento de dosagem da argamassa	73
Figura 25 - Equipamentos para ensaio de tempo de escoamento e espalhamento em argamassas: a) Funil V; b) Tronco de cone.....	74
Figura 26 - Etapas para realização do procedimento expedito	75
Figura 27 - Etapas para realização dos traços das argamassas	76
Figura 28 - Fluxograma do procedimento de escolha do aditivo superplastificante a ser estudado na etapa de concretos	77

Figura 29 - Fluxograma do procedimento de definição da manutenção dos aditivos superplastificantes	78
Figura 30 – Etapas da produção de argamassa com uso do aditivo polifuncional à base de lignossulfonato	79
Figura 31 - Fluxograma do procedimento de dosagem da argamassa	80
Figura 32 – Etapas da produção do concreto com uso do aditivo polifuncional à base de lignossulfonato + superplastificante.....	82
Figura 33 - Fluxograma do procedimento de produção do CAA in loco.....	83
Figura 34 - Relação de log do tempo de escoamento pelo teor de aditivo SP das pastas	86
Figura 35 – Explicação da nomenclatura das argamassas.....	88
Figura 36 - Espalhamento das argamassas com aditivo 1 (G_m)	91
Figura 37 - Tempo de fluxo das argamassas com aditivo 1 (R_m).....	92
Figura 38 – Espalhamento (G_m) e tempo de fluxo (R_m) das argamassas com aditivo 1 e pó de basalto, em adição à massa de cimento de 7%.....	93
Figura 39 - Espalhamento das argamassas com aditivo 2 (G_m)	94
Figura 40 - Tempo de fluxo das argamassas com aditivo 2 (R_m).....	95
Figura 41 - Espalhamento (G_m) e tempo de fluxo (R_m) das argamassas com aditivo 2 e pó de basalto, em adição à massa de cimento de 16%.....	96
Figura 42 - Espalhamento das argamassas com aditivo aditivo 3 (G_m).....	97
Figura 43 - T_{risco} na argamassa 3_ARG100/0,6	98
Figura 44 - Tempo de fluxo das argamassas com aditivo 3 (R_m).....	98
Figura 45 - Espalhamento (G_m) e tempo de fluxo (R_m) das argamassas com aditivo 3 e adição mineral de 16% em relação à massa de cimento.....	99
Figura 46 - Espalhamento das argamassas com aditivo 4 (G_m)	100
Figura 47 – Tempo de fluxo das argamassas com aditivo 4 (R_m).....	101
Figura 48 - Espalhamento (G_m) e tempo de fluxo (R_m) das argamassas com aditivo 4 e pó de basalto, em adição de 16% em relação à massa de cimento	102
Figura 49 - Tempo de manutenção do aditivo 1	104
Figura 50 - Tempo de manutenção do aditivo 2	105
Figura 51 - Tempo de manutenção do aditivo 3	106
Figura 52 - Tempo de manutenção do aditivo4	107
Figura 53 – Ajuste no tempo de manutenção das argamassas produzidas com o Aditivo 1	108

Figura 54 – Ajuste no tempo de manutenção das argamassas produzidas com o Aditivo 2	110
Figura 55 – Ajuste no tempo de manutenção das argamassas produzidas com o Aditivo 3	111
Figura 56 – Ajuste no tempo de manutenção das argamassas produzidas com o Aditivo 4	112
Figura 57 – Gelificação do aditivo 3	114
Figura 58 – Gelificação do aditivo 4	114
Figura 59 - Fluxograma do procedimento de produção do CAA	115
Figura 60 – Preparo do caminhão betoneira para alcançar abatimento de 8 ± 1 cm	124
Figura 61 – 1º abatimento do concreto analisado	124
Figura 62 – 2º abatimento do concreto analisado	125
Figura 63 – Ensaio de <i>slump flow in loco</i>	126
Figura 64 – Ensaio de anel japonês <i>in loco</i>	126
Figura 65 – Ensaio de funil-V <i>in loco</i>	127
Figura 66 – Pré-moldado de concreto no estado fresco	128
Figura 67 – Pré-moldado de concreto no estado endurecido	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades e mecanismos do CAA no estado fresco	33
Tabela 2 - Identificação dos ensaios, propriedades avaliadas e parâmetros medidos nos ensaios do concreto autoadensável	34
Tabela 3 - Lista dos principais ensaios que avaliam a autoadensabilidade do concreto com as respectivas normas que os prescrevem no Brasil, Europa e EUA	36
Tabela 4 - Limites da área relativa de espalhamento (G_m) em argamassas.....	46
Tabela 5 - Limites do tempo de escoamento relativo (R_m) em argamassas	46
Tabela 6 - Classes de aditivos superplastificantes	50
Tabela 7 - Composição química do cimento Portland CII-F40.....	61
Tabela 8 - Dados técnicos do aditivo polifuncional	62
Tabela 9 - Dados técnicos do aditivo superplastificante – Aditivo 1	62
Tabela 10 - Dados técnicos do aditivo 2	63
Tabela 11 - Dados técnicos do aditivo 3	63
Tabela 12 - Dados técnicos do aditivo 4	63
Tabela 13 - Propriedades físicas do agregado miúdo	64
Tabela 14 - Propriedades físicas da brita 1.....	66
Tabela 15 - Propriedades físicas da brita 0.....	66
Tabela 16 – Propriedades físicas das composição de 60% de brita 1 com 40% de brita 0.....	67
Tabela 17 - Ensaios no estado fresco proposto no procedimento de dosagem na etapa de argamassa	74
Tabela 18 - Limites da literatura utilizados.....	74
Tabela 19 - Etapas para realização do procedimento expedito.....	81
Tabela 20 - Planejamento experimental para verificação do estado endurecido do concreto autoadensável	81
Tabela 21 - Pastas cimentícias e seus respectivos consumos.....	85
Tabela 22 - Ângulos internos das curvas de tempo de fluidez para determinação do ponto de saturação dos aditivos superplastificantes	87
Tabela 23 - Consumo de materiais por m^3 de argamassa.....	88
Tabela 24 - Argamassas com o tempo de ação dos aditivos analisado	103
Tabela 25 - Consumo de materiais por m^3 de concreto	116
Tabela 26 - Abatimento do concreto somente com a presença do lignossulfonato	116

Tabela 27 – Resultados de caracterização quanto à autoadensabilidade do concreto– Aditivo 1	117
Tabela 28 - Abatimento do concreto somente com a presença do lignossulfonato	119
Tabela 29 – Resultados de caracterização quanto à autoadensabilidade do concreto– Aditivo 2	120
Tabela 30 – Resistência à compressão dos concretos	122
Tabela 31 - Consumo de materiais por m ³ de concreto produzido in loco	123
Tabela 32 – Resistência à compressão do concreto produzido in loco	129

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a/c; a/cim	Relação água/cimentícios
ASTM	American Society for Testing Materials
CAA	Concreto autoadensável
CADAR	Concreto autoadensável de alta resistência
CAR	Concreto de alta resistência
CCA	Cinza da casca do arroz
CV	Concreto convencional
CP	Cimento Portland
CV	Cinza Volante
C ₃ A	Aluminato tricálcico
D _m	Diâmetro médio do espalhamento de argamassas
DMC	Diâmetro máximo característico
D ₀	Diâmetro da base do tronco de cone do espalhamento de argamassas
EAF	Escória de Alto Forno
EFNARC	Specifications and Guidelines for Self-Compacting Concrete
EX _{arg}	Excesso de argamassa
EX _{pasta}	Excesso de pasta
FC	Fíler calcário
f ₂₈	Resistência à compressão aos 28 dias
G _m	Área relativa de escoamento
HC	Hidratação do cimento
I _{vam}	Índice de vazios do agregado miúdo
IV; IVs	Índice de vazios
LS	Lignossulfonato
M _{am}	Massa de agregado miúdo
M _B	Massa do agregado graúdo obtido na porção de concreto retirada da base da coluna de segregação
M _{cim}	Massa de cimento
M _T	Massa do agregado graúdo obtido na porção de concreto retirada do topo da coluna de segregação

MFT	Espessura de filme de argamassa
NBR	Norma Brasileira
PCE	Policarboxilato éster
PLF	Aditivo polifuncional
PRS	Parâmetros reológicos
PS	Ponto de saturação
R_m	Tempo relativo de escoamento
s	Segundos
AS	Sílica ativa
SP	Aditivo superplastificante
SR	Índice de resistência à segregação
SP/CP	Compatibilidade de um aditivos superplastificante com o Cimento Portland
t	Tempo
T_{risco}	Tempo escoamento para o material retornar a posição inicial no procedimento expedito proposto
UEL	Universidade Estadual de Londrina
$V_{\text{água}}$	Volume de água
V_{ag}	Volume de agregado graúdo
V_{am}	Volume de agregado miúdo
V_{arg}	Volume de argamassa
V_{cim}	Volume de cimento
V_{conc}	Volume de concreto
V_{pasta}	Volume de pasta
V_{SP}	Volume de aditivo superplastificante
$V_{V_{\text{ag}}}$	Volume de vazios do agregado graúdo
$V_{V_{\text{am}}}$	Volume de vazios do agregado miúdo
VMA	Aditivo modificador de viscosidade
γ_{cim}	Massa específica do cimento
$\gamma_{\text{água}}$	Massa específica da água
γ_{SP}	Massa específica do aditivo químico
ρ_{am}	Massa unitária compactada do agregado miúdo
ρ_{ag}	Massa unitária solta do agregado graúdo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 JUSTIFICATIVA.....	21
1.2 QUESTÃO DE PESQUISA	22
1.3 OBJETIVOS	22
1.3.1 Objetivo Geral.....	22
1.3.2 Objetivos Específicos	23
1.4 DELIMITAÇÃO DE PESQUISA	23
1.5 CONTRIBUIÇÃO ESPERADA	23
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 CONCRETO AUTOADENSÁVEL	26
2.1.1 Histórico e Conceituação	26
2.1.2 Materiais constituintes	27
2.1.2.1 Cimento <i>Portland</i>	28
2.1.2.2 Agregados	29
2.1.2.3 Água.....	30
2.1.2.4 Adição Mineral.....	30
2.1.3 Método de Dosagem	31
2.1.4 Propriedades no Estado Fresco	33
2.1.4.1 Ensaios de Caracterização do CAA no Estado Fresco	33
2.1.5 Propriedades no Estado Endurecido	37
2.1.5.1 Resistência mecânica à compressão.....	37
2.1.6 Ferramentas para controle de qualidade e aceitação do CAA produzido <i>in loco</i>	38
2.1.6.1 Fabricação e dosagem na usina.....	38
2.1.6.2 Transporte e recebimento em obra.....	39
2.2 AUTOADENSABILIDADE DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS	40
2.2.1 Autoadensabilidade em estudos com pastas cimentícias	41
2.2.2 Autoadensabilidade em estudos com argamassas	43
2.3 ESTUDO DA MANUTENÇÃO DA TRABALHABILIDADE DE ADITIVOS QUÍMICOS.....	47
2.3.1 Aditivos superplastificantes.....	49
2.3.2 Polifuncionais	54

3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	60
3.1 LOCAL DA PESQUISA	60
3.2 DELINEAMENTO DA PESQUISA.....	60
3.3 MATERIAIS.....	60
3.3.1 Cimento Portland.....	61
3.3.2 Aditivo Polifuncional e Superplastificante.....	62
3.3.3 Agregado miúdo	64
3.3.4 Agregado graúdo.....	65
3.3.5 Pó de basalto.....	68
3.4 MÉTODO	69
3.4.1 Procedimento de dosagem.....	70
3.4.1.1 Etapa 1 – Pastas cimentícias	71
3.4.1.2 Etapa 2 – Argamassas	72
3.4.1.3 Etapa 3 – Concretos.....	80
3.4.2 Verificação da autoadensabilidade do concreto <i>in loco</i>	83
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	85
4.1 ESTUDO EM PASTA – ETAPA 1	85
4.1.1 Considerações parciais das pastas	87
4.2 ESTUDO EM ARGAMASSA – ETAPA 2	88
4.2.1 Avaliação da autoadensabilidade	90
4.2.1.1 Aditivo 1	90
4.2.1.2 Aditivo 2	94
4.2.1.3 Aditivo 3	96
4.2.1.4 Aditivo 4	100
4.2.2 Tempo de manutenção dos aditivos químicos nas argamassas	102
4.2.3 Ajustes no tempo de manutenção dos aditivos químicos nas argamassas ..	108
4.2.4 Considerações parciais das argamassas.....	113
4.3 ESTUDO EM CONCRETO – ETAPA 3	114
4.3.1 Produção do concreto autoadensável - Aditivo 1	116
4.3.2 Produção do concreto autoadensável – Aditivo 2	119
4.3.3 Propriedade mecânica de resistência à compressão do concreto	122
4.3.4 Transferência de tecnologia e produção do CAA <i>in loco</i>	123
4.3.5 Considerações parciais do concreto	130
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	132

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	133
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	134
APÊNDICES.....	145
APÊNDICE A - Desenvolvimento do cálculo do consumo de cimento para dosagem de argamassas.....	146
APÊNDICE B - Desenvolvimento do cálculo do consumo de cimento para dosagem de concretos.....	148
APÊNDICE C - Desenvolvimento do cálculo do procedimento de dosagem para argamassas (100% Expasta e 0,45% de aditivo 1).....	150
APÊNDICE D - Desenvolvimento do cálculo do procedimento de dosagem para argamassas (90% Expasta e 1,12% de aditivo 2)	152
APÊNDICE E - Desenvolvimento do cálculo do procedimento de dosagem para argamassas (80% Expasta e 0,8% de aditivo 3).....	154
APÊNDICE F - Desenvolvimento do cálculo do procedimento de dosagem para argamassas (80% Expasta e 0,8% de aditivo 4).....	156

1 INTRODUÇÃO

Com o cenário atual existente na construção civil onde a demanda por imóveis aumenta gradativamente, as empresas construtoras buscam ainda mais a otimização de processos, sendo este o conjunto de ações que objetiva reduzir consideravelmente os gastos e bens desnecessários, tanto com equipamentos e materiais quanto no que se refere a recursos humanos para o ciclo de produção (ALMONDES, 2018). Frente a este panorama, diversas opções e derivações do concreto tradicional surgem e o estudo do seu comportamento além dos laboratórios se torna indispensável para análises dos seus parâmetros de qualidade em obra.

Em se tratando do concreto, um material com abundância de matéria-prima para sua produção, versatilidade e adaptação às diversas formas estruturais, somado ao custo relativamente baixo, ele se tornou um dos materiais mais empregados no mundo (ARAÚJO, 2007).

Com a evolução da indústria de concreto e a busca por melhorar as características desse material desenvolveu-se no Japão o concreto autoadensável (CAA), cujo objetivo era aumentar a durabilidade de estruturas em concreto armado e solucionar problemas com mão-de-obra qualificada para a execução da concretagem (TUTIKAN, 2004).

O CAA surgiu como uma alternativa ao concreto convencional (CV). De acordo com Karahan et al. (2012) e Yung et al. (2013), a principal atratividade do seu uso é a facilidade de manuseio e aplicação, cujas habilidades são de passar por restrições, capacidade de resistir à segregação e habilidade de preenchimento das fôrmas que se dá exclusivamente por meio da ação da gravidade, sem nenhuma interferência mecânica ou manual. Ao se trabalhar com concretos mais fluidos, tem-se como consequência redução no tempo de manuseio e adensamento, ocasionando maior produtividade e menor custo final na operação de concretagem. Cita-se como o princípio mais importante para manter as características do CAA, o uso de aditivo superplastificante (SP) e alto teor de argamassa, resultando em uma maior coesão e fluidez da pasta. Pode-se afirmar que as principais diferenças entre o concreto convencional e o autoadensável são as características reológicas, estando relacionadas à fluidez e à deformabilidade, que normalmente são alcançadas no CAA através de uma maior proporção de pasta cimento-agregado do que a usualmente utilizada em concreto convencional (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Devido a problemas relacionados com atrasos na execução da obra ou no transporte para entrega do concreto, observa-se no momento do seu lançamento a perda de trabalhabilidade, fazendo com que aconteça a rejeição do produto entregue decorrido entre o início da mistura dos materiais e a aplicação do concreto no canteiro de obra. Polesello *et al.* (2015) afirma que em virtude de existir uma preocupação ambiental com o descarte deste material e do dimensionamento de custos cada vez mais precisos, fica claro a necessidade de alternativas que viabilizem sua utilização sem que haja impactos negativos em suas propriedades finais.

Misturas prolongadas do concreto são frequentemente observadas, principalmente quando dosado em central, resultado das distâncias entre a central e os locais de entrega ou devido a atrasos no andamento da obra (POLESELLO, 2015).

Com o intuito de estudar a aplicabilidade do concreto autoadensável e seu desempenho diretamente no canteiro de obra, preocupa-se com as características e como mantê-las ao longo do trajeto do caminhão betoneira da concreteira à obra, já que a ação do SP na composição é imediata e as características de autoadensabilidade não se mantém a longo prazo (MENDES; BAUER; SILVA, 2017). A partir daí, se torna essencial um estudo preliminar dos parâmetros que influenciam na dosagem e produção do CAA, levando em consideração a sua trabalhabilidade, que é a propriedade que determina o esforço exigido para manipular uma quantidade de concreto fresco, com perda mínima de homogeneidade (TOILLIER, 2017).

A maioria das propriedades autoadensáveis do concreto no estado fresco e endurecido podem ser facilmente caracterizadas por parâmetros medidos em laboratório, porém, sua produção diretamente em canteiro de obra não é somente uma reprodução do traço já encontrado. À vista disso, os resultados laboratoriais não são representativos do material em escala real e podem ser usados apenas como valores de referência em vez de parâmetros de controle (BARLUENGA, G., *et.al.*, 2017)

Pode-se inferir que a principal situação problema se torna a avaliação de parâmetros iniciais como o estudo dos aditivos superplastificantes e como o seu comportamento interfere no estado fresco do CAA, explorando o seu tempo de manutenção aliado à trabalhabilidade do material, apoiado por estudos preliminares em pastas e argamassas, que possibilitam sua avaliação em um volume menor do mesmo. Com isso, o estudo de parâmetros de dosagem é indispensável para que se replique tais conhecimentos do laboratório para a prática da obra. Sendo assim, o

entendimento das características no estado fresco de concretos produzidos com a utilização de SP se tornam de suma importância, visto que a interferência deste material em contato com o cimento é existente e sua manutenção ao longo do tempo com a finalidade de se garantir um produto final autoadensável deve ser estudada.

1.1 JUSTIFICATIVA

O concreto autoadensável surge como uma alternativa ao convencional por ter a capacidade de preencher todos os espaços destinados a ele na fôrma por conta própria, sem nenhuma intervenção externa. Portanto, este não necessita ser adensado e, além disso, não segrega e não aprisiona ar em excesso. Com isso, sua aplicação é mais fácil, rápida, requer menos mão de obra, evita manifestações patológicas, como ninhos de concretagem, bem como diminui o ruído ocasionado por vibradores (REPETTE, 2011).

Afirma-se que por sua estrutura ser mais densa, o que indica que há um menor volume de vazios, a aderência se torna melhor entre o concreto e o aço (ALMEIDA FILHO, 2006). Isso favorece resultados relacionados ao comportamento mecânico dos elementos estruturais quando comparados àqueles que utilizam o concreto convencional.

De acordo com Gomes e Barros (2009), torna-se nítido o interesse por essa tecnologia do concreto em todo o mundo por conta dos inúmeros trabalhos publicados em congressos, simpósios e seminários que tratam especificamente do CAA, além dos eventos que tratam de tecnologia do concreto e pelas várias aplicações que são justificadas pelas vantagens bastante atrativas para as construtoras.

Os poucos estudos que existem acerca do tema desta pesquisa, envolvendo o estudo da manutenção de aditivos químicos com a transferência de tecnologia da produção do concreto autoadensável do laboratório à obra, trazem que o foco principal para sua produção vai estar nos materiais envolvidos, principalmente nas características do aditivo, sua manutenção com o tempo e os resultados experimentais da autoadensabilidade deste concreto. Se torna um avanço para a comunidade científica o estudo dessa tecnologia produzida de fato em obra mantendo suas propriedades e parâmetros de qualidade do produto final. Para isso, é necessário conhecimento acerca do estado fresco da mistura do CAA, relacionando-a à trabalhabilidade para lançamento e concretagem de elementos estruturais.

Pode-se inferir que o principal desafio desencadeado a partir destes conceitos se torna a avaliação do estudo do tempo de manutenção dos aditivos químicos, explorando a trabalhabilidade do concreto ao longo do tempo, considerando sua dosagem e levando em conta também o seu transporte e as suas características de saída da concreteira até chegada na obra, que deverão ser estudadas de forma detalhada com o intuito de conhecer o tempo de ação dos aditivos utilizados para aplicação no momento correto com o intuito de suas características de autoadensabilidade serem mantidas até o seu lançamento. Para isso, é necessário elencar os principais problemas que uma central encontra com a concretagem realizada com CAA, seja durante o estado fresco ou suas posteriores manifestações patológicas e através destas informações avaliar as características de cada material a ser utilizado com o intuito de ser produzido um concreto com excelência do ponto de vista da qualidade e aplicação numa edificação.

1.2 QUESTÃO DE PESQUISA

Como avaliar a manutenção da consistência com o tempo e características autoadensáveis de um concreto produzido em indústria concreteira e transportado para lançamento em obra?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar o tempo de manutenção de aditivos químicos para a produção de concreto autoadensável, considerando sua estabilidade e consistência com o tempo, além da realização de ensaios que confirmem sua autoadensabilidade, permitindo sua execução de forma que as propriedades se mantenham ao longo do seu transporte da concreteira à obra, considerando cada particularidade dos materiais e garantindo a qualidade do produto final.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Validar a aplicabilidade do método de dosagem de concreto autoadensável (CAA) proposto por PORTO (2020) diretamente em obra;
- b) Quantificar a influência dos aditivos polifuncionais e superplastificantes no concreto autoadensável produzido em laboratório e em central;
- c) Elencar os principais gargalos de produção do CAA na central para otimizar soluções desde à sua produção até o lançamento.

1.4 DELIMITAÇÃO DE PESQUISA

A pesquisa delimitou-se ao estudo de materiais cimentícios com relação água/cimentícios de 0,40, cimento Portland CP II F-40, aditivo superplastificante à base de policarboxilato e aditivo polifuncional à base de lignossulfonatos.

1.5 CONTRIBUIÇÃO ESPERADA

Busca-se com este trabalho contribuir para o aprofundamento dos tempos de manutenção dos aditivos químicos que influenciam na qualidade do CAA produzido externo ao laboratório. Desta maneira, ao ser feita tal transferência de tecnologia da sua produção, espera-se que esta pesquisa apresente dados que demonstrem o estágio de ação dos aditivos polifuncionais e superplastificantes no concreto com o intuito de se obter o controle e previsão do seu momento de aplicação de acordo com o tempo de produção da concreteira à obra.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho apresenta cinco capítulos, sendo o primeiro dedicado à introdução, justificativa, questão de pesquisa, objetivos, delimitação de pesquisa e a contribuição esperada.

No segundo capítulo se apresenta a revisão bibliográfica, estudando primeiramente o desenvolvimento do concreto autoadensável, suas definições,

vantagens e desvantagens. Após isso, estão apresentadas as propriedades no estado fresco do CAA com uma análise das principais normas, nacional e internacionais, vigentes. Em seguida, trata-se sobre os materiais constituintes do CAA com foco nas características dos aditivos e dois estudos desenvolvidos na mesma linha deste trabalho.

Os materiais empregados e o método de dosagem proposto por Porto (2020) utilizado no desenvolvimento da campanha experimental se encontram no terceiro capítulo, onde abordará acerca da produção de pastas, argamassas e por fim, concretos.

Os resultados e discussões, sobre as propriedades autoadensáveis que os diferentes tipos de argamassas com excessos de pasta e teores distintos de aditivos superplastificantes resultaram, estão descritos no quarto capítulo. Ainda nele, encontram-se a etapa de produção do concreto e resultados quanto à autoadensabilidade do mesmo. E o foco maior se encontra à cerca da avaliação do tempo de manutenção dos aditivos químicos e a posterior transferência de tecnologia da produção do concreto autoadensável do laboratório à obra.

Por fim, o quinto e último capítulo apresenta as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo trata-se de uma revisão bibliográfica acerca do concreto autoadensável com base no conhecimento disponibilizado nas literaturas existentes sobre o tema, onde são apresentados a origem e definição do CAA, os diferentes materiais constituintes e suas características para posterior entendimento da compatibilidade entre eles, as propriedades no estado fresco e no estado endurecido, mencionado o método de dosagem proposto para validação e as condições envolvendo os aditivos químicos que poderão influenciar até o lançamento do produto final em obra. Com o intuito de facilitar o entendimento da base de pesquisa, menciona-se o fluxograma da Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma do conteúdo da revisão bibliográfica



Fonte: O autor.

2.1 CONCRETO AUTOADENSÁVEL

2.1.1 Histórico e Conceituação

Em meados dos anos 80, no Japão, houve uma redução da mão de obra qualificada e equipamentos sofisticados, o que gerou enorme deficiência para produção do concreto, principalmente para realizar o adensamento de modo mecanizado, com formas complexas e com uma alta taxa de armaduras, características de construções que necessitam de alta resistência a abalos sísmicos. Desde então, o material vem sendo aprimorado e utilizado em diversos setores da construção civil e problemas de durabilidade nas estruturas de concreto começaram a surgir, o que desencadeou estudos de durabilidade nos centros de pesquisas do país (CAVALCANTI, 2006).

Com o intuito de desenvolver estruturas mais duráveis, com menos falhas e reduzir a mão de obra qualificada na construção civil, Hajime Okamura, em 1986, apresentou publicamente a proposta de desenvolver um concreto que não necessitasse de nenhuma vibração externa para o adensamento. Por fim, em 1988, obteve-se o CAA, que por sua vez apresentava elevada fluidez, mantendo os agregados graúdos em suspensão devido à viscosidade e coesão adequadas, bem como preencher estruturas densamente armadas (OLIVEIRA, 2012).

No setor de pré-fabricados o CAA vem se destacando por conta de suas vantagens em virtude de oferecer facilidade na concretagem de peças com altas taxas de armadura, rapidez na execução e qualidade de acabamento superficial.

Conceitua-se o CAA a partir da importância de se obter um concreto que não sofra muito os efeitos da qualidade da mão de obra aplicada quando da operação de colocação in loco e que dispense qualquer tipo de compactação mecânica, sendo ela feita apenas com seu peso próprio, em qualquer tipo ou forma de cofragem não apresentando segregação ou agregação (OKAMURA, 1997).

A Norma brasileira ABNT NBR 15823-1 (2017), aplicada ao CAA, o define como “concreto que é capaz de fluir, auto adensar pelo peso próprio, preencher a forma e passar por embutidos (armaduras, dutos e insertos), enquanto mantém sua homogeneidade (ausência de segregação) nas etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento”.

Para Tutikian e Dal Molin (2015) um concreto somente será considerado autoadensável se a mistura apresentar fluidez, coesão e resistência à segregação de forma simultânea. Assegurando estas qualidades, o concreto pode apresentar vantagens como acelerar as etapas de concretagem em função de sua rapidez no lançamento e a dispensa do adensamento, acelerando assim a construção, reduz também a mão de obra nas concretagens, permite a concretagem de peças de seções reduzidas e regiões com altas taxas de armadura além de diminuir a incidência de falhas causadas por deficiências no adensamento da mistura e contribuir com a segurança e conforto do trabalhador à medida que diminui o número de operários envolvidos na concretagem, eliminando o ruído decorrente da etapa de vibração do concreto.

2.1.2 Materiais constituintes

De forma geral, os materiais utilizados na produção dos concretos autoadensáveis são os mesmos utilizados nos convencionais (EFNARC, 2005; MEHTA; MONTEIRO, 2008, TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015).

Como mencionado por Tutikian e Dal Molin (2015, p. 29) “A seleção dos materiais para a produção do CAA não é simples”. Uma maior quantidade de finos (adições minerais quimicamente ativas ou inertes) é exigida de forma que se conecte aos diversos tipos de cimento e aditivos químicos (plastificantes, superplastificantes e os modificadores de viscosidade), além das características dos agregados que afetam de forma significativa as propriedades reológicas e mecânicas do concreto.

O uso de adições minerais tem o objetivo de aumentar a coesão das misturas e evitar a segregação do agregado graúdo. O uso de modificadores de viscosidade auxilia na garantia destas propriedades (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015; REPETE, 2011; DOMONE, 2006).

De forma sucinta, apresentar-se-ão algumas características desejáveis dos materiais que são usualmente utilizados na produção do concreto autoadensável.

2.1.2.1 Cimento *Portland*

Permite-se mencionar que não existem restrições quanto à escolha do tipo de cimento, no entanto recomenda-se a utilização daqueles com maior índice de finos em sua composição, já que esta característica confere maior resistência ao concreto em virtude de proporcionar um maior preenchimento de vazios, do ponto de vista físico do material (PAULA, 2006).

A alta contribuição de finos no CAA, do ponto de vista da forma física, garante a coesão adequada à mistura, necessária para evitar a segregação dos agregados graúdos e a exsudação. Por finos entende-se todo material com diâmetro inferior a 0,125 mm, incluindo cimento, fração areia e adições (SANTOS, 2010).

A viscosidade e a tensão de escoamento do CAA dependem das características reológicas da pasta. Desta forma, embora não existam critérios científicos que balizem o uso de um determinado tipo de cimento para o CAA, recomendam os cimentos que apresentem na sua composição teores de aluminato tricálcico (C_3A) menores que 10% e com maior superfície específica (GOMES; BARROS, 2009; REPETTE, 2011; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015).

Os cimentos com teores de C_3A superiores a 5% estão associados à expansão e a um quadro de fissuração por retração em função das reações dos sulfatos com o monossulfato hidratado (etringita). Portanto, segundo Mehta e Monteiro (2008), os cimentos mais finos (finura Blaine $> 3000\text{cm}^2/\text{g}$) são os mais indicados para a produção do CAA, visto que possuem maior quantidade de partículas em contato com a água e mais próximas umas das outras, minimizando choque e através disso, reduzindo a tensão de escoamento, aumentando a viscosidade e melhorando a coesão das misturas. Estas características do aglomerando exigem procedimentos que minimizem os efeitos relativos ao calor de hidratação, retração do concreto e a perda de fluidez da mistura.

Cabe ressaltar, que além do que foi mencionado, cimentos com elevados teores de álcalis e C_3A e elevada finura exigem maiores quantidades de aditivo superplastificante e podem apresentar queda na manutenção da fluidez da mistura (REPETE, 2011).

A substituição de parte do CP por adições minerais, também se apresenta como alternativa para garantir a presença de finos na mistura. Segundo levantamento realizado por Gettu e Agulló (2003), o consumo de cimento para a

produção de CAA está entre 200 a 450 kg/m³ para concretos de resistência normal e entre 400 e 515 kg/m³ para os de alta resistência (LEITE, 2007).

Permite-se afirmar que o CP II-F40, utilizado na pesquisa, possui uma excelente performance, uma vez que é produzido com o mais rígido controle que acarreta em uma menor variação do mercado. Afirma-se que devido a alta reatividade, este cimento necessita de cura bastante cuidadosa, principalmente nas primeiras idades. Sua composição conta com adição de 11 a 25% de fíler calcário.

2.1.2.2 Agregados

Permite-se inferir que os agregados têm papel relevante nos aspectos da resistência mecânica, na durabilidade e na estabilidade dimensional dos concretos. Da mesma forma como no concreto convencional, características dos agregados utilizados no CAA como porosidade, composição granulométrica, absorção de água, forma e textura superficial dos grãos irão afetar as suas propriedades. Sendo assim, os agregados devem atender aos mesmos requisitos e especificações prescritos nas normas destinadas ao concreto convencional (GOMES; BARROS, 2009).

Quanto à escolha dos agregados miúdos, Repette (2011) recomenda areias naturais de granulometria contínuo, médias a finas, onde seu módulo de finura varia entre 2,4 a 1,0, já que estas melhoram a resistência à segregação da mistura. Trazendo outra referência quanto às dimensões das partículas, Gomes e Barros (2009) sugerem que partículas de agregados com dimensões menores que 0,125 mm sejam consideradas como parte da fração de adição mineral (inertes), que compõem a pasta à medida que interferem na reologia do CAA, sejam por atuarem com fíler ou por aumentarem a coesão e viscosidade das misturas.

Em se tratando dos agregados graúdos, recomenda-se o uso daqueles com diâmetros inferior a 19mm, por facilitar a mobilidade da mistura e minimizar os efeitos de bloqueio por parte dos agregados (GOMES; BARROS, 2009; REPETTE, 2011; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015).

Alerta-se que quanto maior for o diâmetro do agregado graúdo, maior deverá ser a viscosidade da argamassa para evitar a segregação e aumentar as possibilidades de bloqueio do concreto. Para Repette (2011), o uso de agregado de 9,5 mm é uma alternativa para gerar CAA com bom desempenho.

2.1.2.3 Água

A presença de água na dosagem do concreto é indispensável visto que o cimento consome aproximadamente 19% de seu peso em água com a finalidade de formar os cristais sólidos que promovem a resistência mecânica do concreto (FREITAS JÚNIOR, 2016). Além disto, ela contribuirá na trabalhabilidade do concreto, colaborando para que a mistura assuma aspecto plástico suficiente para ser transportada e aplicada nas fôrmas.

A precisão dos cálculos para determinar a quantidade de água só é possível após o estudo de dosagem, que levará em consideração o local e tipo de aplicação, requisitos de projeto, qualidade do cimento e agregados disponíveis, entre outros fatores. Vale salientar que sua utilização deve ser criteriosa, já que a presença de matéria orgânica, por exemplo, prejudica a durabilidade da estrutura ou resulta no aparecimento de manchas. De modo geral, a água de abastecimento público atende aos critérios necessários e existe uma norma regulamentadora que discute critérios e auxilia na sua utilização e escolha, a ABNT NBR 15900 – Água para amassamento do concreto.

Em vista disso, para garantir a fluidez do CAA e ao mesmo tempo evitar que o teor de água afete suas propriedades, sugere-se substituir parte da água por aditivo SP (CAVALCANTI, 2006).

A determinação do teor de água a ser consumido em CAA geralmente leva em consideração a quantidade (em massa) do total de material fino (ou pó), sendo que, em média, para concretos com resistências maiores, esse teor de água varia entre 150 a 210l/m³ e a relação a/c de 0,25 a 0,48 (LEITE, 2007).

2.1.2.4 Adição Mineral

Correia Gomes, P. C. C. e Barros, A. R. (2009) define adições minerais como materiais que são finamente moídos e são incorporados ao concreto com a finalidade de obter características especiais, como por exemplo, reduzir os custos e melhorar a trabalhabilidade do concreto no estado fresco, podendo até melhorar a sua resistência à fissuração térmica, à expansão álcali agregado e ao ataque de sulfatos.

Existem diferentes tipos de adições minerais como por exemplo metacaulim, cinzas volantes, sílica ativa e cinza de casca de arroz. Dentre estas, a que ocupa patamar de destaque é a sílica ativa, quer pela sua finura (13.000 a 30.000 m²/kg) ou por seus efeitos no concreto. Ao ser acrescentada à pasta, características como maior plasticidade e coesão serão atribuídas a ela, além de menor garantir menor exsudação e segregação, embora seja necessária maior quantidade de água e aditivo superplastificante (ALMONDES, 2016).

Menciona-se com foco especial, em virtude de sua utilização no trabalho, o pó de pedra basáltica, cuja classificação pela norma técnica NBR 7211 (2019), é descrita como um material proveniente do britamento de rochas, com diâmetro menor que 4,8 mm sendo um material maleável. Tal adição é um resíduo procedente da exploração de jazidas, que apresenta de 15 a 20% da produção de britagem, consequentemente das rochas (CRUZ, 2021).

Esta adição mencionada é o rejeito da exploração de pedreiras que representa em torno de 15 a 20% da produção de uma instalação de britagem, como consequência da cominuição das rochas (SÁ, 2006).

Segundo Costa (2019) o pó de pedra é utilizado de várias maneiras no ramo da construção civil: pavimentação, usinas de asfalto, calçamentos com base asfálticas e de concreto, fabricação de pré-moldados, estabilizante de solos, confecções de argamassa para assentamento e emboço, paralelepípedos de concreto, entre outros.

Toillier (2017) traz que este tipo de adição aponta para um aumento da viscosidade do concreto autoadensável, aumentando o volume de finos e reduzindo a quantidade de água livre na mistura. Sendo assim, com sua utilização, os vazios se preenchem de forma mais significativa, causando uma melhor fluidez do CAA.

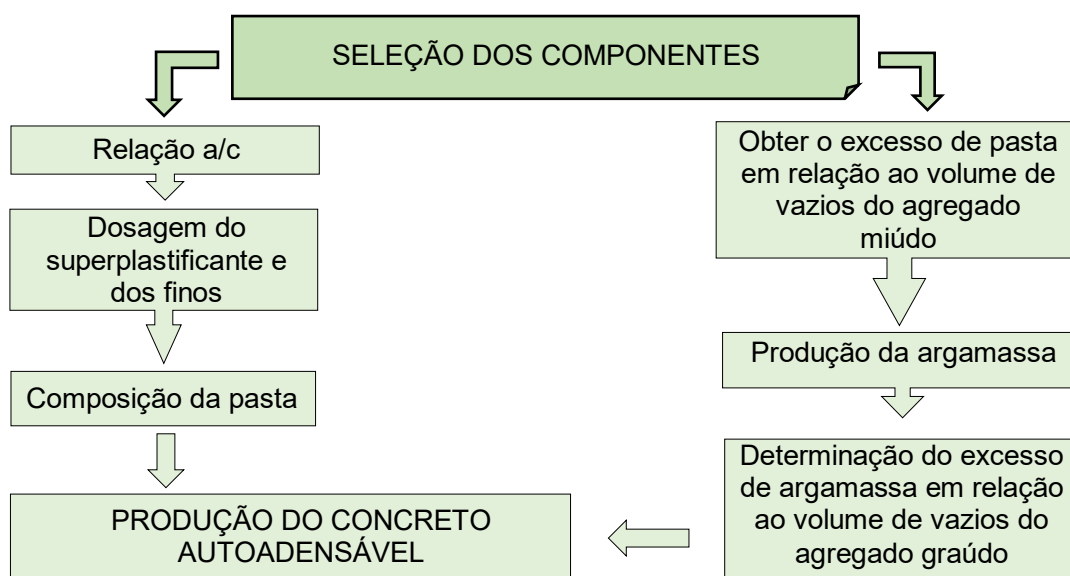
2.1.3 Método de Dosagem

Pode-se afirmar que diversos métodos de dosagem do concreto autoadensável existentes são válidos e todos têm por princípio a busca em garantir a fluidez e estabilidade das misturas confeccionadas, com ausência de segregação (GOMES; BARROS, 2009).

O procedimento de dosagem proposto neste trabalho teve sua fundamentação teórica baseada no apresentado por Porto (2020) que foi uma adaptação do descrito por Toralles-Carbonari (1996) e Gomes (2002).

Toralles-Carbonari (1996) desenvolveu uma metodologia de dosagem com o intuito da produção desse material de alta resistência que consistia em realizar a otimização separada da composição de pasta e do esqueleto granular. Ao propor seu método, a autora elenca as seguintes hipóteses: a fluidez da pasta governa as propriedades reológicas do concreto; o teor ótimo de superplastificante é definido pelo ponto de saturação utilizando-se do ensaio do cone de Marsh; o esqueleto granular deve apresentar o menor volume de vazios e o conteúdo da pasta depende dos requisitos de desempenho do concreto.

Figura 2 - Fluxograma do método de dosagem de Porto (2020)



Fonte: Adaptado de Porto (2020).

O estudo de Porto (2020) propõe, como mencionado na Figura 2, a determinação do ponto de saturação do aditivo químico na etapa da produção de pastas cimentícias para que se inicie a produção de argamassas de modo que se obtenha um excesso de pasta cujo valor ideal é aquele capaz de preencher os vazios do agregado miúdo e excedê-los de maneira que a argamassa produzida obtenha características satisfatórias quanto à autoadensabilidade. Sendo assim, a produção dos concretos segue a mesma linha da etapa mencionada, sendo agora encontrado um excesso de argamassa em relação ao número de vazios do agregado graúdo.

2.1.4 Propriedades no Estado Fresco

A trabalhabilidade e as propriedades reológicas fundamentais, a evolução reversível e não reversível, a tixotropia, a perda de abatimento, o tempo de pega, a exsudação, a segregação e as questões práticas relacionadas com o enchimento e pressão das fôrmas são tratadas entre as propriedades do concreto fresco (KOVLER; ROUSSEL, 2011).

É definido para que se obter um concreto com as propriedades reológicas necessárias, não basta apenas obter autoadensibilidade das pastas e argamassas, mas também uma resistência à segregação entre o agregado graúdo e a argamassa, no momento em que o concreto flui em uma zona de armadura dentro de um ambiente confinado (OKAMURA; OUCHI, 2003).

A Tabela 1 aponta alguns mecanismos relacionados às propriedades características do CAA no estado fresco.

Tabela 1 - Propriedades e mecanismos do CAA no estado fresco

Propriedade	Mecanismo
Habilidade de fluir	Fluidez elevada e coesão da mistura
Habilidade de passagem	Viscosidade moderada da pasta e argamassa; e propriedade dos agregados, em especial dimensão máxima do agregado graúdo
Resistência à segregação ou estabilidade	Viscosidade e coesão da mistura

Fonte: Adaptada de Gomes (2002).

2.1.4.1 Ensaio de Caracterização do CAA no Estado Fresco

O estudo do comportamento do fluxo de CAA, levando em consideração as três propriedades fundamentais que o caracteriza – habilidade de fluir, habilidade de passagem e resistência à segregação – é realizado através de equipamentos e procedimentos distintos dos comumente empregados na produção do concreto convencional. No entanto, não há uma medição isolada de cada uma das três propriedades requisitadas por parte dos equipamentos, sendo usados determinados grupos de equipamentos, dos quais uns se mostram mais aptos e mais práticos que outros (LEITE, 2007; TUTIKIAN, 2004).

As diretrizes da EFNARC (2017) apresentam uma série de dispositivos e métodos de ensaios desenvolvidos especialmente para caracterizar o concreto autoadensável no estado fresco, conforme a Tabela 2. Após ser apresentada, serão descritos os principais ensaios para a caracterização do CAA no estado fresco. Tais experimentos específicos foram desenvolvidos com o intuito de garantir que o concreto apresente os três requisitos fundamentais que o tornam autoadensável (PEREIRA, 2010).

Tabela 2 - Identificação dos ensaios, propriedades avaliadas e parâmetros medidos nos ensaios do concreto autoadensável

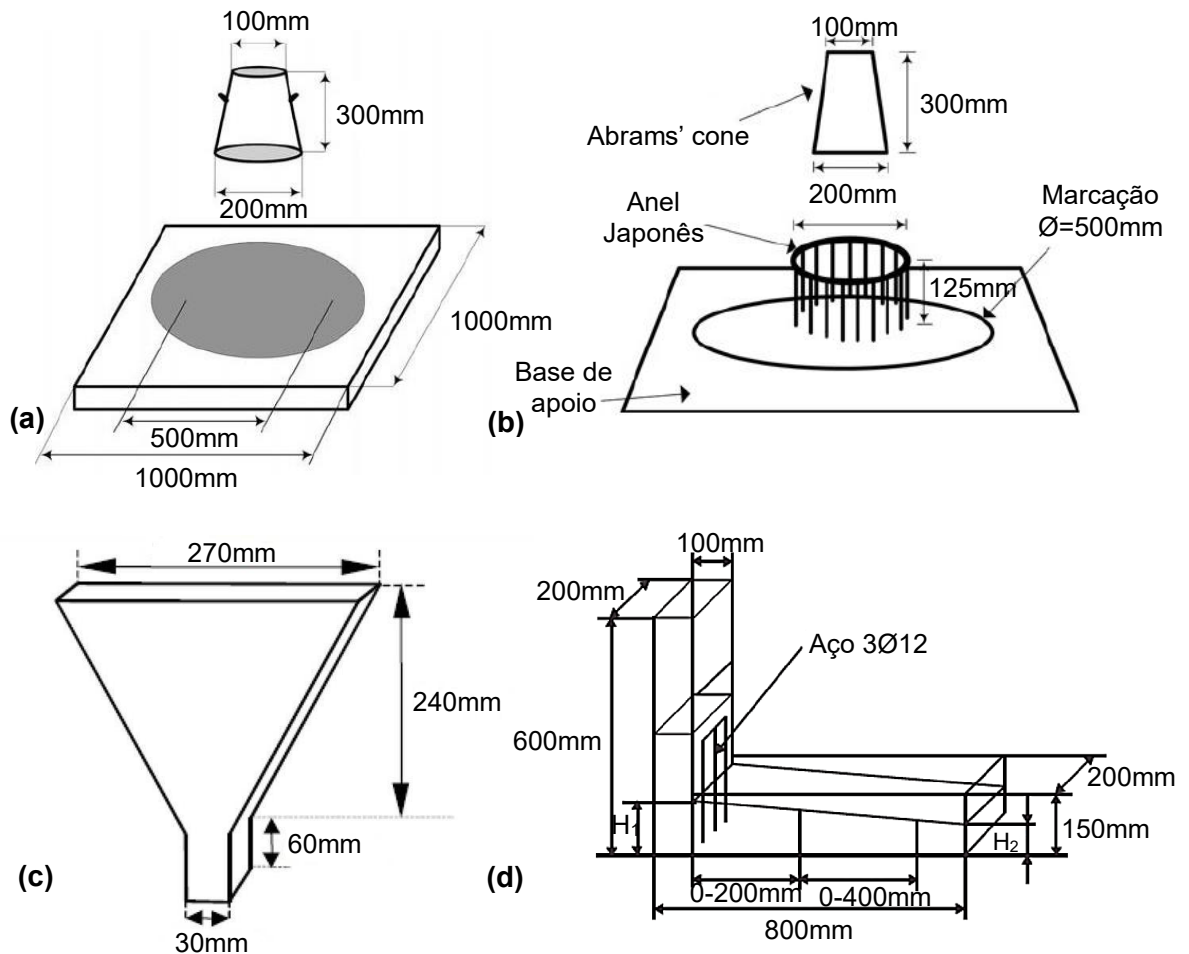
Características	Ensaio	Parâmetro Medido
1- Fluidez e capacidade de preenchimento	<ul style="list-style-type: none"> • Slump-flow • Kajima box 	<ul style="list-style-type: none"> • Espalhamento total • Preenchimento (visual)
2- Viscosidade / Fluidez	<ul style="list-style-type: none"> • T₅₀₀ • V-funnel • O-funnel • Orimet 	<ul style="list-style-type: none"> • Tempo de Fluxo
3- Capacidade de Passagem	<ul style="list-style-type: none"> • L-box • U-box • J-ring • Kajima box 	<ul style="list-style-type: none"> • Taxa de passagem • Diferença de altura • Fluxo total • Capacidade de passagem (visual)
4- Resistência à segregação (Coesão)	<ul style="list-style-type: none"> • Penetration • Sieve segregation • Settlement column 	<ul style="list-style-type: none"> • Profundidade • Porcentagem de pasta • Taxa de segregação

Fonte: Adaptada de EFNARC (2017).

Foram desenvolvidos ensaios específicos com o intuito de garantir que o concreto apresente os três requisitos fundamentais que o torna autoadensável (PEREIRA, 2010).

A Figura 3 mostra os principais ensaios para caracterização do CAA no estado fresco, onde todos são normatizados pela norma brasileira ABNT NBR 15823/2017.

Figura 3 – Equipamentos dos ensaios (a) *Slump Flow Test*, (b) *Slump Flow Test* com anel japonês, (c) Funil-V e (d) Caixa-L



Fonte: Mendes *et al.* (2017).

Menciona-se acerca dos ensaios citados, que o primeiro deles, *Slump Flow Test*, é útil para avaliar a fluidez do concreto em condições não confinadas. O objetivo principal do ensaio é analisar a capacidade de deformação do concreto sob seu peso próprio; sendo possível, ainda, verificar a estabilidade da mistura, ou seja, se há separação dos agregados graúdos da argamassa e exsudação. Outro ensaio é o *Slump Flow* com o anel japonês o qual é utilizado para avaliar a habilidade do concreto fluir, em conjunto com a habilidade de passar através de obstáculos, além de ser possível se observar a ocorrência de segregação na mistura. Por conseguinte, o ensaio do funil em V é realizado para avaliar a capacidade do concreto escoar e passar por estreitamentos, sendo mais indicado para concretos com agregados graúdos com dimensão máxima de 20 mm. O ensaio da caixa-L que possibilita a avaliação, na direção horizontal, da facilidade com que o fluxo de concreto passa pela

armadura sem que haja bloqueio, mantendo sua coesão e não permitindo a segregação (MENDES *et al.*, 2017).

A Tabela 3 é apresentada com as normas que prescrevem os ensaios que avaliam a autoadensabilidade do concreto no Brasil, na Europa e nos Estados Unidos, sendo documentos bastante semelhantes visto que seguem documentos de referência parecidos acerca da produção e caracterização do CAA, como a EFNARC. Nota-se que são normas recentes e datadas a partir de 2017.

Tabela 3 - Lista dos principais ensaios que avaliam a autoadensabilidade do concreto com as respectivas normas que os prescrevem no Brasil, Europa e EUA

Ensaio	Propriedade Avaliada	Normas	
Slump flow	Habilidade de preenchimento Resistência à segregação por inspeção visual	BRASIL	ABNT NBR 15823-2 (2017)
		EUROPA	EN 12350-8 (2019)
		EUA	ASTM C1611 (2017)
Slump flow T500	Habilidade de preenchimento Viscosidade aparente (fluidez)	BRASIL	ABNT NBR 15823-2 (2017)
		EUROPA	EN 12350-8 (2019)
		EUA	ASTM C1611 (2017)
Funil V	Viscosidade aparente (fluidez)	BRASIL	ABNT NBR 15823-5 (2017)
		EUROPA	EN 12350-9 (2019)
		EUA	-
Caixa L	Habilidade passante	BRASIL	ABNT NBR 15823-4 (2017)
		EUROPA	EN 12350-10 (2010)
		EUA	-
Anel J	Habilidade passante	BRASIL	ABNT NBR 15823-3 (2017)
		EUROPA	EN 12350-12 (2019)
		EUA	ASTM C1621 (2017)
Coluna de Segregação	Resistência à segregação (mensurável)	BRASIL	ABNT NBR 15823-6 (2017)
		EUROPA	-
		EUA	ASTM C1610 (2017)

Fonte: O autor (2022).

2.1.5 Propriedades no Estado Endurecido

Os estudos acerca do CAA sempre foram mais direcionados às propriedades deste material no seu estado fresco e continuam sendo, com aprimoramentos e desenvolvimento de novas tecnologias. Entretanto, devido à possibilidade de uso estrutural, as propriedades no estado endurecido ganharam maior importância, exigindo então estudos que possibilitassem a previsão do comportamento do CAA nesse estado (KLEIN, 2008).

Leite (2007) afirma que além da preocupação com o uso estrutural e durabilidade, deve-se estudar as propriedades no estado endurecido para obter informações que auxiliem na escolha da dosagem adequada, visando produzir misturas mais econômicas. Dentre as principais características do CAA no estado endurecido estão:

- Microestrutura mais homogênea;
- Melhoria da resistência à compressão, ao ser comparado ao CCV;
- Tendência de redução do módulo de elasticidade;
- Melhoria na aderência entre barras de aço e concreto;
- Melhoria da durabilidade.

A seguir apresentam-se as propriedades no estado endurecido do CAA de interesse deste presente trabalho.

2.1.5.1 Resistência mecânica à compressão

A resistência à compressão é definida como a medida de tensão exigida para romper o material, sendo que, no concreto, esta depende do processo de hidratação do cimento, que geralmente é lento. As especificações e ensaios relativos à resistência do concreto são tradicionalmente baseados em corpos de prova curados, na idade de 28 dias, em condições precisas de temperatura e umidade (CAVALCANTI, 2006).

No concreto endurecido a característica mais relevante, normalmente, é a resistência à compressão, a qual pode ser determinada por meio do ensaio padrão de compressão uniaxial, cujo resultado, após os 28 dias, pode ser considerado como índice geral da resistência do concreto (KLEIN, 2008).

Os materiais e proporções utilizadas na dosagem para produção de CAA com as exigências de caracterização influenciam diretamente nas propriedades mecânicas do concreto, dentre estes fatores os principais são o emprego de superplastificante e a redução da relação água/aglomerante; consumo elevado de finos; bem como o alto teor de pasta e a redução do volume do agregado graúdo (LEITE, 2007).

Araújo (2007) afirma que o CAA apresenta um bom desempenho na resistência à compressão e pode ainda suprir outras necessidades construtivas, tendo em vista que a sua produção leva em consideração as exigências constantes no projeto estrutural.

2.1.6 Ferramentas para controle de qualidade e aceitação do CAA produzido *in loco*

Primeiramente, para ser realizada a validação e produção do concreto autoadensável *in loco*, alguns ajustes no traço serão necessários para compensar uma possível utilização de misturador diferente daquele utilizado em laboratório (ALMONDES, 2018). Estes ajustes girarão em torno da quantidade de água, sendo necessária ou não uma modificação na relação a/c e também no aditivo utilizado. O controle da consistência do CAA é primordial e é o maior objetivo de estudo trazendo a produção desse material à obra.

Os ensaios slump-flow, anel japonês e funil V, normatizados pela NBR 15823-1 (ABNT, 2017a), deverão ser realizados no CAA no estado fresco, após a mistura dos componentes em caminhão-betoneira, a fim de se comprovar as propriedades exigidas para que um concreto seja considerado autoadensável. Deve-se ainda moldar pelo menos dois corpos de prova para cada idade nas quais serão realizados os ensaios de resistência à compressão, fazendo o processo ainda de cura seca ao ar nos moldes por 24 horas e após serem desmoldados, submetidos à cura úmida até atingirem as idades de rompimento.

2.1.6.1 Fabricação e dosagem na usina

De início, as centrais de concreto devem ter um conhecimento acerca das propriedades e características dos materiais disponíveis em seus depósitos que compõem o CAA, como o esqueleto granular dos agregados, composição de finos a

ser utilizado e também dos aditivos. Com tal intuito, devem então realizar ensaios que permitem analisar o comportamento dos mesmos nas mais diversas condições, como citadas.

Possuindo toda a caracterização dos materiais e definido o tipo de cimento, a próxima etapa é a definição e o conhecimento do tipo de aditivo adequado para o traço a ser desenvolvido, levando em consideração aspectos de extrema importância tais como a distância entre usina e obra, prazo de desfôrma; resistência inicial, coesão entre os constituintes, dentre outros. O controle de umidade dos demais materiais será o parâmetro para determinar a quantidade de água a ser utilizada. Posteriormente, são realizados os ensaios de caracterização já mencionados no corpo deste texto, para avaliar a fluidez, habilidade passante e resistência à segregação do CAA (COSTA, CABRAL, 2019).

O concreto autoadensável possui alguns princípios que deverão ser respeitados como sua elevada fluidez, atingida quando a pasta do concreto lubrifica e espaça adequadamente os agregados, de forma que sua capacidade de escoamento não seja comprometida pelo atrito interno entre os mesmos. Deverá também apresentar resistência à segregação e ser capaz de passar por restrições sem que haja bloqueio e para isso a pasta deve ter viscosidade suficientemente elevada com o intuito de manter os agregados em suspensão, evitando que segreguem pela ação da gravidade. Citam-se como fatores que controlam a segregação a quantidade e a distribuição granulométrica dos agregados, sendo que as distribuições contínuas são as mais adequadas para esse fim. Por último, a capacidade de passar pelos espaços entre as armaduras, e dessas com as paredes das fôrmas, limita o teor e a dimensão dos agregados graúdos na mistura (COSTA, CABRAL, 2019).

Afirma-se ainda a necessidade do controle da introdução dos materiais nos caminhões, no qual os operadores consigam coordenar e visualizar todo o processo de dosagem: a posição do caminhão betoneira, dos silos, o início e término da colocação de cada insumo, os volumes adicionados, a temperatura na betoneira, o tempo de mistura, dentre outras etapas.

2.1.6.2 Transporte e recebimento em obra

Fatores como o trânsito e a temperatura ambiente se encaixam nos fatores externos que podem influenciar o transporte do concreto. Ao ser realizada a

sua produção, preocupa-se com o aditivo que compõe o CAA, visto que sua colocação altera rapidamente a consistência do concreto e fatores como a distância da central de produção à obra e a intensidade como é feita a mistura do material interferem de forma significativa no resultado. Salienta-se que o motorista do caminhão consiga realizar o trajeto em um tempo hábil que garanta as características do CAA a uma temperatura que, preferencialmente, não sofra grande alterações.

Com o intuito de melhorar as condições da mistura no transporte, ressalta-se que a partir da primeira adição de água, o tempo ideal de inserção do aditivo, que decorre desde o início da mistura até a entrega do concreto, deve ser fixado de forma que o fim do adensamento não ocorra após o início de pega do concreto e das camadas ou partes contínuas a essa remessa (evitando assim a formação de junta fria); além do transporte ser de no máximo 120 minutos e fixado de maneira que o fim da descarga ocorra em no máximo 150 minutos, de acordo com a ABNT NBR 7212/2021. Caso seja necessário um maior tempo, o estudo de aditivos específicos se torna essencial.

2.2 AUTOADENSABILIDADE DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS

A autoadensabilidade do concreto pode ser caracterizada pela capacidade do mesmo preencher as formas e envolver as armaduras apenas pela ação do peso próprio, mantendo sua homogeneidade, desde que o material possua característica reológicas apropriadas (NUNES, 2001; SKARANDAHL e PETERSSON, 2001).

As principais propriedades de autoadensabilidade em um concreto autoadensável são: habilidade de preenchimento, habilidade passante e resistência à segregação (GOMES e BARROS, 2009; MANUEL, 2005; SKARANDAHL e PETERSSON, 2001). Tais propriedades fazem com que a mistura eleve sua fluidez e viscosidade o suficiente para manter a coesão dos materiais, permitindo o preenchimento em toda a forma sem que haja a presença de segregação ou o boqueio entre as armaduras ou obstáculos presentes durante o lançamento (GOMES E BARROS, 2009).

Das propriedades que caracterizam a autoadensabilidade de um material cimentício, Manuel (2005) e Pereira (2010) afirmam que a habilidade de preenchimento é diretamente dependente da fluidez do material, uma vez que o

mesmo necessidade da existência da capacidade em preencher completamente todas as áreas e cantos da forma sob ação do peso próprio, ou seja, com a ausência de adensamento externo. Já a habilidade passante se caracteriza, segundo Manuel (2005), como a capacidade do material passar entre obstáculos sem que haja o bloqueio ou sequer separação dos seus constituintes. E por último, Gomes e Barros (2009) defini a resistência à segregação como a característica que evita a separação dos seus componentes, citando-se por exemplo a divisão entre os agregados e a pasta cimentícia, sendo governada pela viscosidade da mistura.

Segundo Nunes (2001), para obter resistência adequada à segregação, é necessário reduzir a tendência de separação dos sólidos e minimizar a exsudação. Segundo a autora, para atingir a primeira propriedade, é necessário limitar a quantidade de agregado, reduzir o seu tamanho máximo, minimizar a relação água/finos e/ou introduzir um agente de aderência. Ao mesmo tempo, para que a exsudação seja menor, os autores recomendam diminuir o teor de água, a relação água/finos, usar finos com maior área superficial específica e/ou introduzir agentes de viscosidade.

2.2.1 Autoadensabilidade em estudos com pastas cimentícias

Com o intuito de se obter uma máxima fluidez da pasta sem aumentar a relação água/cimento e sem perder a coesão dos materiais, é importante estudar os parâmetros que influenciam a reologia e a fluidez da mesma (KWAN e WONG, 2008). Desse modo, a mesma têm sido objeto de estudo de diversas investigações (AGULLÓ et al., 1999; GUNNELIUS et al., 2014; KALETA e GRZESZCZYK, 2015; KWAN e WONG, 2008; MA e WANG, 2013; MATOS et al., 2018; SANTOS et al., 2017; SILVA, GOMES e MORAIS, 2019; ZHANG, ZHANG, 2014).

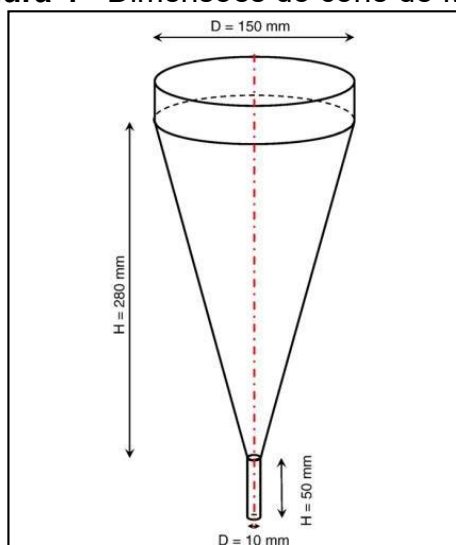
De acordo com parâmetros reológicos, as pastas de cimento são classificadas como fluidos não-newtonianos, ou seja, comporta-se, na sua grande maioria, como um fluido visco-plástico, apresentando uma tensão de escoamento, a qual deverá ser superada pela tensão de cisalhamento para que haja fluxo (BORJA, 2013). Portanto, o conhecimento das propriedades de trabalhabilidade da pasta de cimento em função do tempo é relevante para controle de qualidade e aplicabilidade desses materiais em obras.

Sendo assim, um ponto essencial observado na elaboração de pastas é a compatibilidade de um aditivo superplastificante com determinado cimento Portland (SP/CP) que pode ser feita por meio da determinação da fluidez da mistura de cimento com o ensaio do cone de Marsh, assim como a influência de diferentes minerais sobre o tempo de escoamento do material no mesmo equipamento (CASTRO, LIBORIO e PANDOLFELLI, 2011). O ensaio mencionado, além de avaliar a compatibilidade SP/CP, é utilizado para encontrar o ponto de saturação do aditivo químico (SILVA, GOMES e MORAIS, 2019).

Ao passo que tal característica é mencionada, explica-se que é observada, na produção da pasta, a existência de um teor máximo de aditivo capaz de promover aumento da fluidez, denominado ponto de saturação (PS), sendo definido através da variação do teor de aditivo, sendo que qualquer valor maior acarreta na saturação da pasta, não trazendo nenhum resultado significativo ou até mesmo prejudicial no resultado dos ensaios (MELO, MORCELLI, 2017).

Monte e Figueiredo (2008) afirmam que a principal vantagem do equipamento é sua simplicidade quando comparado com um viscosímetro, por exemplo, ao passo que mede o tempo necessário para que um determinado volume de material flua através do cone por uma pequena abertura; sendo que quanto menor o tempo de escoamento, maior é a fluidez da pasta.

Figura 4 - Dimensões do cone de Marsh

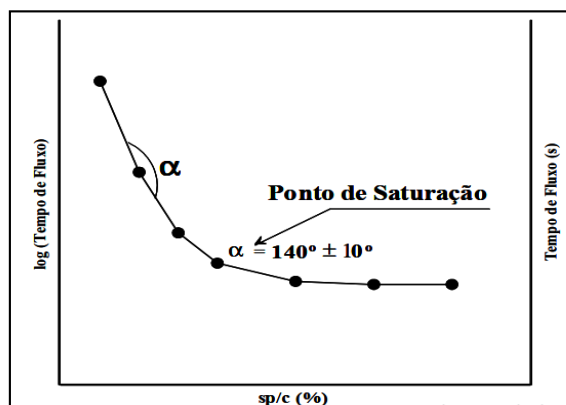


Fonte: Bouvet, Ghorbet e Bennacer (2010).

A Figura 4 representa o funil de metal, aparato de ensaio utilizado para medir o PS dos aditivos superplastificantes, ponto no qual o aumento do teor de

aditivo não gera incremento da fluidez do material (MELO, MORCELLI, 2017). Com o intuito de se obter tal ponto de forma mais objetiva, Gomes, Gettu e Agullo (2003) apresentam uma definição em que o PS é tomado como a dosagem a qual o ângulo interno da curva log do tempo de fluxo por teor de superplastificante é igual a $140 \pm 10^\circ$, como mencionado na Figura 5.

Figura 5 - Curva para definição do ponto de saturação do aditivo superplastificante



Fonte: Gomes, Gettu e Agullo (2003).

Agullo et.al. (1999) afirma que, mesmo que mencionadas as características e formas de obtenção do PS do aditivo, o estudo da pasta cimentícia apresenta limitações, principalmente em se tratando se sua reologias ser diferente da encontrada no concreto. Portanto, quando iniciada a fase de produção de concretos, torna-se essencial uma otimização final da composição através de testes em concretos.

2.2.2 Autoadensabilidade em estudos com argamassas

Este item apresenta as características de autoadensabilidade avaliadas em estudos com argamassas e os limites esperados nos ensaios destes materiais cimentícios. Testes de espalhamento e tempo de fluxo avaliam os materiais cimentícios com base em suas propriedades no estado fresco, como a trabalhabilidade.

Sahmaran, Cristianto e Yaman (2006) afirmam a fase da argamassa servir como base para a autoadensabilidade do concreto. Domone (2006) sugere que tal fase é utilizada por diversos métodos de dosagem como um meio eficiente de determinar as quantidades apropriadas dos materiais como água, aditivo, cimento Portland, adições e esqueleto granular.

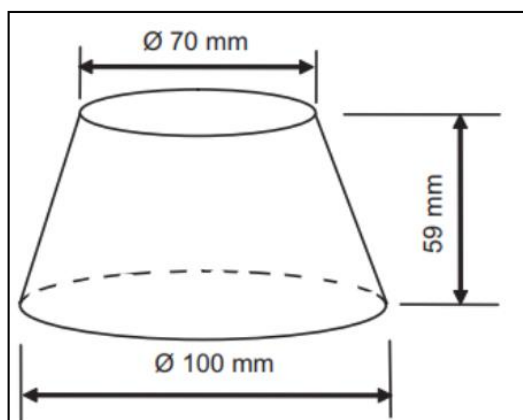
É desempenhado pelos componentes da argamassa um papel de extrema importância na produção de concretos autoadensáveis visto que ela terá uma função de lubrificante do concreto, conferindo fluidez e automaticamente a compactação do material de forma natural, ou seja, somente pelo seu peso próprio. Pode-se afirmar também, que a argamassa quem irá definir a coesão da mistura ao unir os agregados graúdos (KHOTBEHSARA et al., 2015).

A razão a/c e o teor de aditivo superplastificante empregados na dosagem do CAA são determinados a partir de ensaios em argamassa (CAVALCANTI, 2006). A realização de tal estudo nessa etapa de produção justifica-se em virtude do concreto autoadensável ter menor volume de agregados graúdos na mistura (tipicamente 31% a 35%) e, portanto, as propriedades das argamassas são dominantes, além de ser de mais fácil realização do que os ensaios em concreto (DOMONE, JIN, 1999)

Para realização da caracterização da autoadensabilidade em argamassas, são feitas análises dos índices de área relativa de espalhamento (Gm) e tempo de escoamento relativo (Rm) e eles são propostos com o intuito de realizar a indicação da proporção de materiais finos, areia e superplastificante que irão influenciar nas propriedades do CAA em seu estado fresco (DOMONE, 2006; NEPOMUCENO; OLIVEIRA, 2008; OKAMURA; OZAWA; OUCHI, 2000).

O ensaio de espalhamento da argamassa é realizado em um molde de forma tronco cônica, cujas especificações são apresentadas na Figura 6, a fim de verificar a habilidade de espalhamento da argamassa, medindo-se o diâmetro de abertura da mistura, a partir do qual se determina a área de espalhamento relativa (Gm), como mostra a Equação 01.

Figura 6 - Ilustração do tronco de cone de consistência

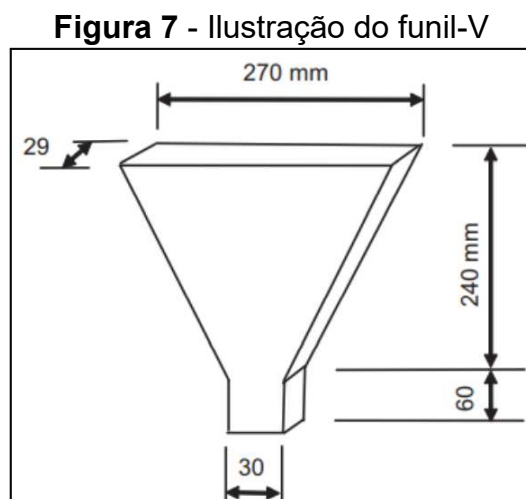


Fonte: Nepomuceno, Oliveira e Lopes (2012).

$$Gm = \left(\frac{D_m}{D_0}\right)^2 - 1,0 \quad (1)$$

Apresenta-se que D_m é o diâmetro médio medido após o espalhamento da argamassa e D_0 é o diâmetro inicial, que corresponde à base do molde, cujo diâmetro é de 100 mm.

O ensaio de fluidez é realizado com o equipamento denominado Funil-V, cujas especificações estão ilustradas na Figura 7 e através dele, determinar-se-á o tempo (t) necessário para o escoamento da argamassa (tempo de fluxo) e o tempo de escoamento relativo (Rm) a partir da Equação 02.



Fonte: Nepomuceno, Oliveira e Lopes (2012).

$$Rm = \left(\frac{10}{t}\right) \quad (2)$$

Pode-se afirmar que valores altos de Gm indicam maior deformabilidade, quanto que altos valores de Rm está relacionado com alta viscosidade. Para tanto, são apresentadas nas Tabelas 4 e 5, que indicam, respectivamente, valores definidos de área relativa de espalhamento e tempo escoamento relativo representando uma deformabilidade e viscosidade ideal (OKAMURA e OUCHI 2003).

Tabela 4 - Limites da área relativa de espalhamento (G_m) em argamassas

Limites da Literatura			
Edamatsu et al. (1999)	Okamura e Ouchi (2003)	Melo (2005)	Nepomuceno, Oliveira e Lopes (2012)
$3 \leq G_m \leq 7$	= 5	$3 \leq G_m \leq 6,8$	$5,3 \leq G_m \leq 5,9$

Fonte: Adaptado de Porto (2020).

Tabela 5 - Limites do tempo de escoamento relativo (R_m) em argamassas

Limites da Literatura			
Edamatsu et al. (1999)	Okamura e Ouchi (2003)	Melo (2005)	Nepomuceno, Oliveira e Lopes (2012)
$1 \leq G_m \leq 2$	= 1	$1 \leq G_m \leq 2,86$	$1,14 \leq G_m \leq 1,30$

Fonte: Adaptado de Porto (2020).

Além dos ensaios e limites propostos acima, Porto et al. (2019) propôs um procedimento expedito com o intuito de analisar a presença de exsudação nas argamassas, como pode ser identificado na Figura 8.

Figura 8 - Procedimento expedito (T_{risco})

Fonte: O autor.

Para a realização deste ensaio, um risco deve ser feito com uma espátula de 4 cm ao longo do diâmetro do material espalhado e o parâmetro adotado, segundo autores, é que a argamassa não pode ser considerada autoadensável se o material não retornar à posição inicial ou se houver presença de exsudação ao longo do risco ou no material deslocado com a espátula. Permite-se salientar que esse procedimento ainda precisa de estudos aprofundados com intuito de se correlacionar dados com os ensaios já consagrados, porém é um procedimento de baixo custo, rápido, de análise visual clara e com potencial para ser realizado tanto em laboratório,

como em canteiro de obra (PORTO et. al, 2019).

Torna-se de extrema importância mencionar que devem ser descartadas as misturas com tendência à segregação, mesmo que índices de autoadensabilidade dentro do recomendado pela literatura sejam obtidos (MELO, 2005).

2.3 ESTUDO DA MANUTENÇÃO DA TRABALHABILIDADE DE ADITIVOS QUÍMICOS

Neville (2016) afirma o aditivo ser um produto químico que é adicionado à mistura de concreto em teores não maiores do que 5%, com exceção para casos especiais, em relação à massa de cimento durante a mistura ou durante uma mistura complementar antes do lançamento do concreto, com a finalidade de se obterem modificações específicas, ou modificações das propriedades normais do concreto.

Os aditivos são responsáveis por modificar as características de hidratação do cimento. Eles melhoram a trabalhabilidade, reduzem a segregação e exsudação, permitem a penetração do concreto em ferragens densas, aceleram ou retardam o tempo de pega, proporcionam melhor acabamento, entre outras modificações (EFFTING, 2014).

A maioria dos aditivos que possam ser escolhidos para serem utilizados na produção do concreto autoadensável, vai possuir um manual com sua composição e as indicações de dosagem de acordo com o fabricante. A partir da definição do traço, as propriedades químicas do tipo de aditivo utilizado serão essenciais para a proporção a ser aplicada na mistura.

Por esse material ter ação rápida no concreto, sua utilização fica restrita a um curto tempo de aplicação antes do lançamento do mesmo (COSTA, 2017). A consistência é a propriedade mais importante a ser analisada antes de validar a utilização desse CAA em obra e ela deve ser conferida realizando o ensaio do *slump flow test*, e dependendo do resultado, talvez faz-se necessário dosar o concreto novamente, adicionando uma complementação de aditivo ou de água à mistura, em volumes pré-estabelecidos.

Segundo Costa (2017) em razão do CAA não conseguir manter suas propriedades por muito tempo e existir a possibilidade da central de concreto ficar

bastante distante das obras, opta-se inicialmente por acrescentar o aditivo superplastificante apenas após a chegada dos caminhões-betoneira na obra. Portanto, os caminhões-betoneira partem da central com o concreto em seu estado convencional com utilização de um aditivo polifuncional para conferir característica de CCV.

A propriedade de trabalhabilidade do concreto determina o esforço exigido para manipular uma quantidade de concreto fresco, com perda mínima de homogeneidade. O termo manipular inclui as operações de primeiras idades como o lançamento, adensamento e acabamento (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Essa perda do abatimento do concreto com o tempo varia em função da riqueza da mistura, do tipo de cimento, da temperatura do concreto e da trabalhabilidade inicial (NEVILLE, BROOKS, 2013), sendo que, o aumento na temperatura tem um efeito significativo sobre a taxa de hidratação do cimento Portland, resultando em redução nos tempos de início de pega e conseqüentemente na perda de trabalhabilidade do concreto, o que pode ser observado no aumento de consumo de água necessário para obtenção de um mesmo abatimento quando há a alteração na temperatura (TOILLIER, 2017).

Permite-se dizer que a trabalhabilidade é afetada por muitos fatores internos e externos em relação à mistura propriamente dita, podendo ser citada a granulometria, a forma das partículas e proporções de agregado, quantidade e qualidade dos materiais cimentícios, presença de aditivos químico e relação água/cimento como fatores internos; e condições do ambiente, finalidade do uso, dimensões e armadura da peça, tipo de mistura e de transporte, modo de lançamento e adensamento citados como fatores externos (TOILLIER, 2017).

Para concretos dosados em central, o produto chegar à obra de destino com o abatimento desejado pelo cliente é um grande problema enfrentado já que durante o transporte até o canteiro existe uma alteração da sua consistência (COSTA, CABRAL, 2019). Uma solução comumente empregada é acrescentar água na mistura, que por um lado ocorre a melhoria da trabalhabilidade e por outro a perda da resistência mecânica. A ABNT NBR 7212:2012 dita não ser permitida a adição suplementar de água antes da descarga do concreto. Em contrapartida, a mesma norma especifica que pode haver a adição suplementar de aditivo antes da descarga, de modo que se chegue à consistência requerida pelo consumidor.

Os aditivos de manutenção têm por característica manter a trabalhabilidade do concreto por mais tempo. Um bom desempenho é alcançado se

mantiverem a trabalhabilidade sem alterar o processo de pega, reduzindo o mínimo possível a resistência mecânica do concreto (TOILLIER, 2017).

Com o desenvolvimento dos aditivos de manutenção de trabalhabilidade, o caminhão-betoneira, que faz o transporte do concreto usinado, consegue chegar até a obra com o abatimento necessário, sem existir a necessidade de acrescentar água à mistura e sem comprometer a resistência do concreto. A qualidade proporcionada pelos mantenedores de trabalhabilidade é visível no concreto, apesar do seu elevado custo (TOILLIER, 2017).

Na produção do concreto, existem diversas características físicas que influenciam na sua trabalhabilidade, que são difíceis de serem medidas, podendo ser citado o atrito interno entre diversos componentes sólidos, que pode ser modificado através da vibração, pela adição de água ou aditivos adequados. Menciona-se a temperatura como outro fator que causa grande influência na trabalhabilidade de concretos, já que com a elevação da mesma, uma maior demanda de água é exigida. Sua adição da mistura é eficiente para melhorar a trabalhabilidade, todavia dificilmente irá manter a homogeneidade do concreto, além de implicar uma redução da resistência mecânica (MARTIN, 2005).

De forma sucinta, apresentar-se-ão dois tipos de aditivos de relevância para o estudo, os superplastificantes (SP) e os polifuncionais. Os aditivos do tipo superplastificantes tem a função de fazer o concreto alcançar alta fluidez nas misturas e, os plastificantes possuem diversas aplicações, como aumentar a trabalhabilidade, podendo manter o consumo de água (SOUZA, MORCELLI, MORAIS, 2017).

2.3.1 Aditivos superplastificantes

O SP, segundo a norma ABNT NBR 11768:2019, é definido de forma que mesmo 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. Tal norma determina diferentes classes de aditivos superplastificantes, como pode ser observada na Tabela 6.

Tabela 6 - Classes de aditivos superplastificantes

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

Procura-se utilizar esse tipo de aditivo com a segunda definição da norma para o concreto autoadensável, 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).

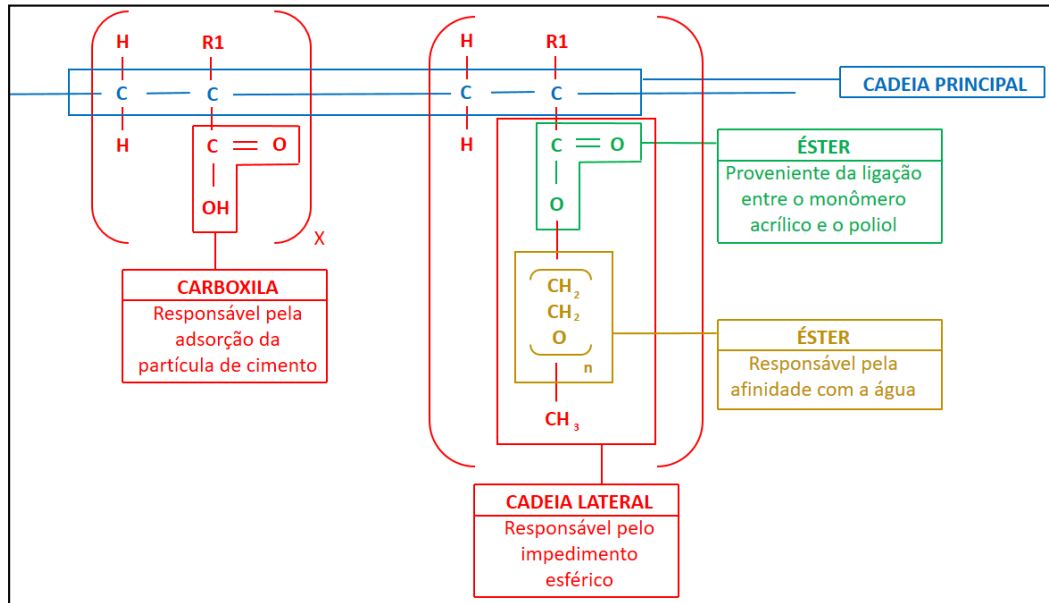
Torna-se importante entender como tal aditivo age na mistura e, Almeida e Evaristo (2017) citam que na ausência de dispersantes, as partículas de cimento tendem a aglomerar ao entrar em contato com a água, devido a diversos tipos de interação, quais sejam: forças de atração entre as partículas (forças 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 consequente segregação de fases (POLESELLO, 2015).

Os aditivos superplastificantes à base de policarboxilato éster (PCE) são os mais utilizados na produção dos CAAs principalmente em virtude da ação dispersante (efeito estérico) deste tipo de aditivo sem provocar diminuição significativa da pasta (REPETTE, 2011; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015).

Em se tratando da estrutura química dessa categoria de aditivos, Yamada (2000) indica 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. A cadeia principal do material é composto 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 9, é apresentado um modelo da estrutura molecular dos policarboxilatos éster.

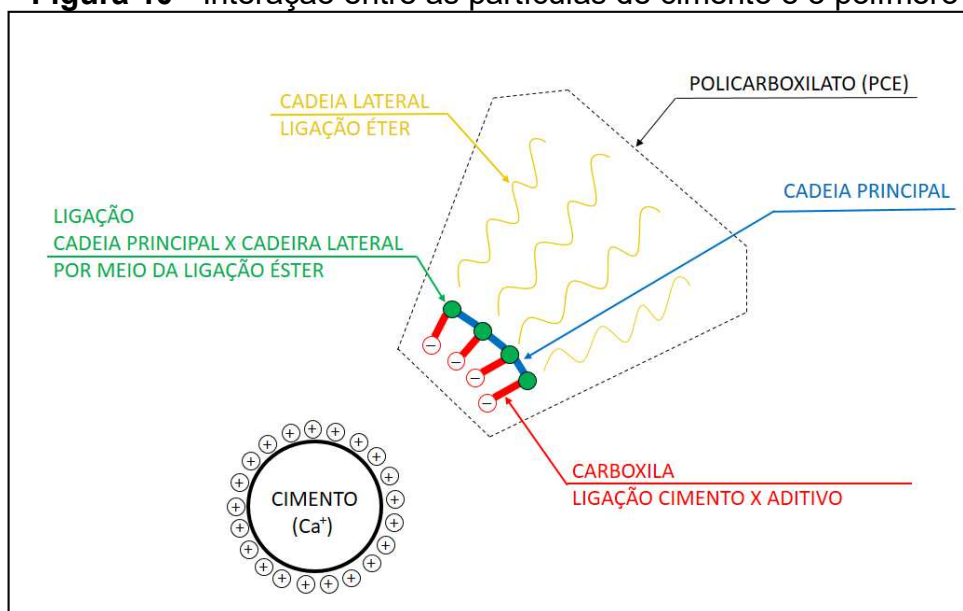
Figura 9 - Estrutura molecular dos policarboxilatos éster



Fonte: (ROJAS; CINCOTTO, 2013).

A adsorção da molécula do PCE à superfície das partículas de cimento (ou dos produtos da hidratação sua hidratação) ocorre por intermédio dos grupos carboxílicos presentes em sua estrutura. As cadeias formadas dessa interação cuja origem é eletrostática, agem de forma a dispersar-se, em virtude da presença dos grupos éter, fazendo com que as partículas de cimentos ajam por repulsão estérica, tendo em vista que as cadeias laterais apresentam afinidade com a solução gerada nas idades iniciais do processo de hidratação em virtude (ALONSO et al., 2007; GRIESSER, 2002; HUI et al., 2007; PLANK; SACHSENHAUSER, 2009). Na Figura 10, é apresentado o esquema do mecanismo de dispersão das partículas de cimento.

Figura 10 - Interação entre as partículas de cimento e o polímero



Fonte: (ROJAS; CINCOTTO, 2013).

Explica-se, segundo a figura, que ao invés do mecanismo de ação dos PCE's ser direcionado por dispersão eletrostática, existe uma inibição de sítios reativos ao longo da dispersão. A repulsão dos ésteres permite a criação de pequenas barreiras entre as partículas de cimento após a adsorção da cadeia na superfície da partícula. Como a repulsão do éster é mais eficaz do que a repulsão eletrostática, ela tem um grande efeito no aumento do abatimento, embora a quantidade seja considerada menor do que a dos aditivos plastificantes comuns (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Afirma-se a enorme dificuldade em relação à propagação do uso desses aditivos, já que a perda de consistência com o tempo em comparação aos concretos convencionais é alta, tornando-se um grande problema para sua utilização. A consistência obtida pelo superplastificante se mantém apenas por um período de 30 a 60 minutos, podendo variar em virtude das condições climáticas da região de concretagem e, sua máxima trabalhabilidade é alcançada normalmente de 10 a 15 minutos, e em seguida, uma perda relativamente rápida do espalhamento acaba acontecendo, sendo o principal motivo para incorporar esse aditivo na mistura somente em momentos próximos do seu lançamento em obra (TOILLIER, 2017).

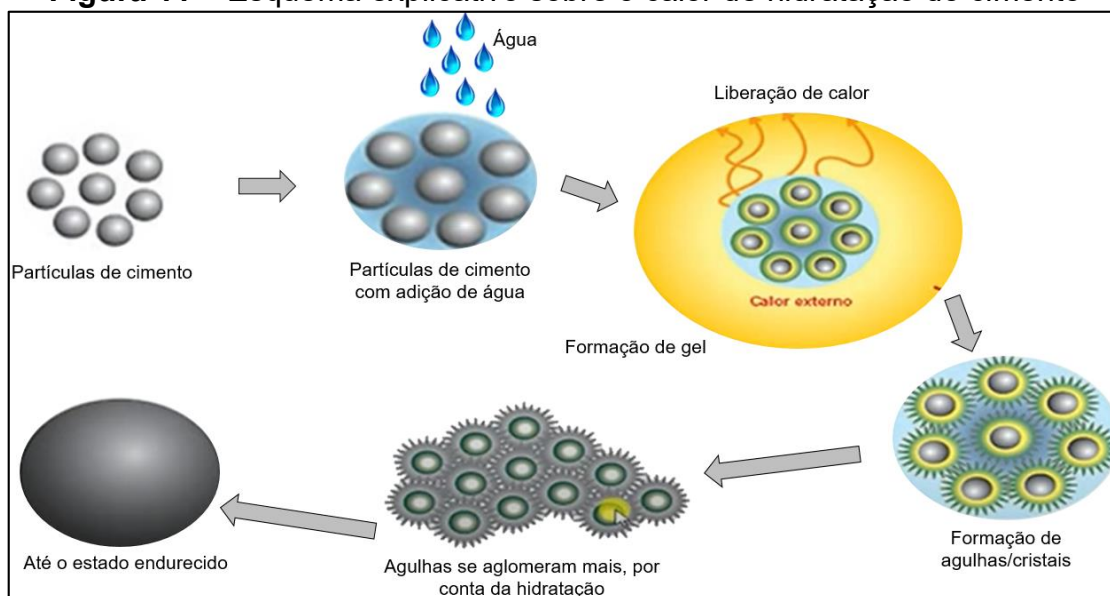
Alguns parâmetros são decisivos na determinação do desempenho dos aditivos e a capacidade deles adsorverem-se às partículas de cimento, tais como a interação eletrostática da macromolécula com o cimento e a densidade de carga

aniônica desta, ambas proporcionais à quantidade de grupos carboxílicos da cadeia principal, além do 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 cadeiras 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).

Os aditivos de manutenção de trabalhabilidade são classificados como superplastificantes tipo II. A NBR11768-1:2019 os define como um aditivo que, sem modificar a consistência do concreto no estado fresco, permite uma elevadíssima redução no conteúdo de água de um concreto; ou que, sem alterar a quantidade de água, aumenta consideravelmente o abatimento e a fluidez do concreto; ou, ainda, aditivo que produz esses efeitos simultaneamente.

Para entender o processo de manutenção do aditivos, torna-se essencial o entendimento da hidratação do cimento (HC), conforme ilustrado na Figura 11, que são as reações químicas que ocorrem quando partículas de cimento entram em contato com a água, fazendo com que os silicatos e os aluminatos presentes no cimento, com o transcorrer do tempo, formam uma massa endurecida e resistente. Elas são exotérmicas, ou seja, ocorrem com a liberação de calor, promovendo o aquecimento da mistura do concreto e a velocidade com que ocorre a HC irá depender do tipo de cimento utilizado e a sua composição. A partir disso, inicia-se uma formação de agulhas/cristais que com o decorrer do tempo elas tendem a se replicar e aglomerar ainda mais, por conta da hidratação, até que forme por fim uma massa endurecida. Fatores externos ou intempéries, como vento, temperatura e umidade do ar também podem ter grande influência no resultado.

Figura 11 – Esquema explicativo sobre o calor de hidratação do cimento



Fonte: Adaptado de Paredes, Bronholo (2013)

Os PCE's agem de forma a retardar a hidratação do cimento, conforme demonstram alguns estudos, uma vez que esses induzem a formação de uma camada que envolve os grãos que acaba por impedir o contato das partículas com a água e, por conseguinte, a dissolução destas (FRACALOSSI, 2011).

O grau com o qual aditivos compostos por policarboxilatos 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).

Estudos afirmam que, em sua maioria, quanto menor a trabalhabilidade inicial representada por ensaios de consistência, mais rápida é a sua perda com o tempo. Uma sugestão em virtude disso é a utilização de abatimentos iniciais mais altos, podendo ser obtidos com o uso de aditivos plastificantes, sendo o intuito de obter tempos de lançamento compatíveis com a prática de obra (TUTIKIAN et. al, 2007).

2.3.2 Polifuncionais

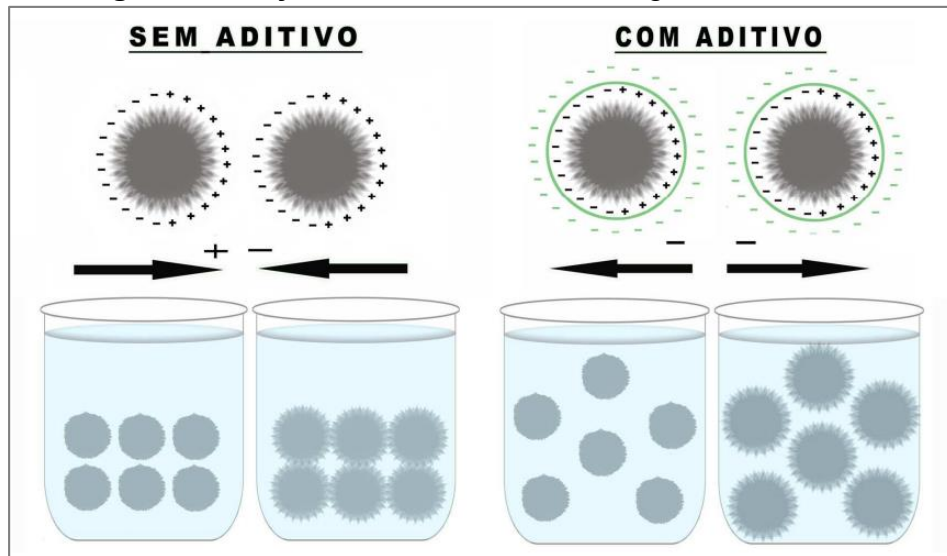
Fortes aliados dentro de um canteiro de obras com o intuito de minimizar o consumo de água são os aditivos polifuncionais (PLF) para concreto.

Também conhecido como plastificantes, eles são capazes de reduzir, em média, de 6% a 8% de água no traço. Além de tal redução, eles atuam nas propriedades reológicas do concreto e alteram as reações de hidratação do cimento, melhoram a trabalhabilidade, modificam a viscosidade, aceleram ou retardam o tempo de pega, controlam o desenvolvimento de resistências mecânicas, intensificam a resistência à ação do congelamento, diminuem a fissuração térmica, atenuam as consequências do ataque por sulfatos, reação álcali-agregado e corrosão de armadura, entre outras propriedades. Explica-se a forma de ação desses aditivos através de ações físico-químicas em concretos, onde geram cargas de mesma polaridade entre as partículas de cimento, repulsando do mesmo no processo de produção do traço de concreto. Por consequência, uma menor quantidade de água é solicitada para a produção de traços. Tal redução pode chegar em até 30% no processo, além de permitir uma melhoria da plasticidade, fluidez e coesão (MILA, 2014).

Ressalta-se o estudo e entendimento de um aditivo PLF cuja matéria-prima é o lignossulfonato (LS) que é conhecido como aditivos plastificantes de primeira geração sendo obtido a partir do rejeito líquido do processo de extração da celulose da madeira (HARTMANN, 2002).

Souza, Morcelli e Moraes (2017) afirmam ser a função básica dos LS no concreto a dispersão das partículas coloidais, onde suas moléculas se ligam a essas partículas existentes em suspensão, gerando cargas negativas as mesmas, o que acaba por gerar um efeito repulsivo entre as partículas, conforme indica a Figura 12. Camadas de moléculas de água dipolares circundam as partículas hidrofóbicas de cimento, como resultado, evitam a sua flocculação e um sistema com boa dispersão é obtido. Todo o processo influencia as propriedades do concreto, tanto no estado fresco, como no endurecido.

Figura 12 - Ação eletrostática sobre os grãos de cimento

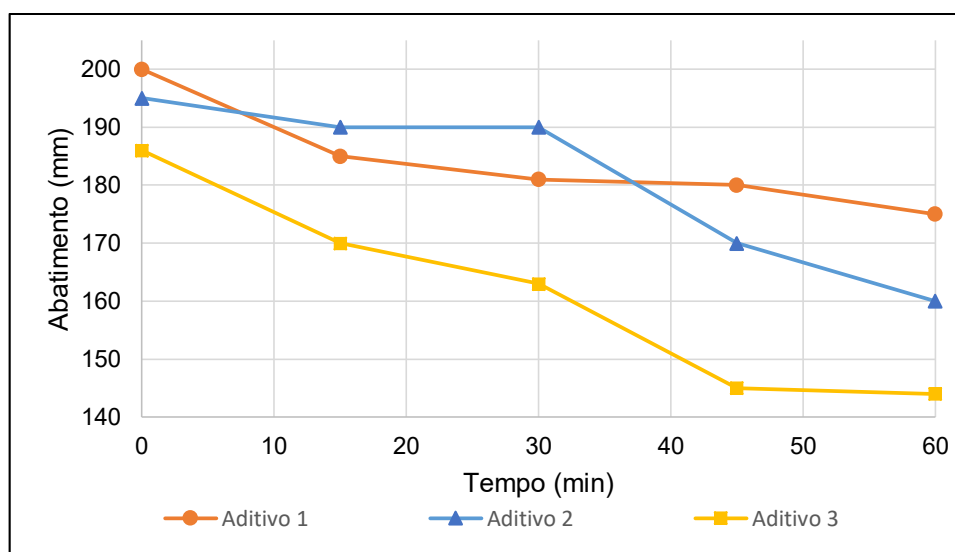


Fonte: (FRACALLOSSI, 2011).

Esse tipo de aditivo apresenta boa manutenção de trabalhabilidade, possibilitando aumentar a fluidez do concreto, elevar a resistência à compressão e ainda reduzir o consumo de cimento (SOUZA, MORCELLI, MORAIS, 2017).

Toillier (2017) estuda o tempo de manutenção de aditivos químicos de acordo com o abatimento do concreto ao decorrer de 60 minutos. Este estudo é apresentado na Figura 13.

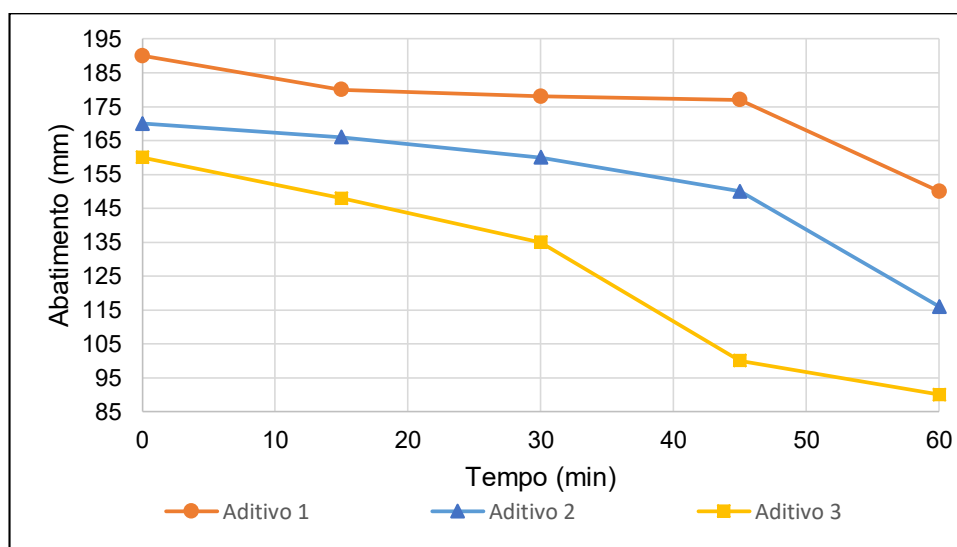
Figura 13 – Manutenção de aditivos químicos no concreto – traço 1



Fonte: Adaptado de Toillier (2017).

A autora deste estudo analisa três diferentes aditivos, à base de policarboxilato e percebe-se na Figura 13 os resultados quanto à perda de abatimento do mesmo. Os aditivos foram colocados na mesma porcentagem em relação ao peso do cimento e notou-se uma perda considerável na propriedade. Tal trabalho infere que no decorrer do tempo a propriedade de trabalhabilidade é perdida no concreto e os aditivos ajudam a melhorar, de forma significativa, tal perda.

Figura 14 – Manutenção de aditivos químicos no concreto



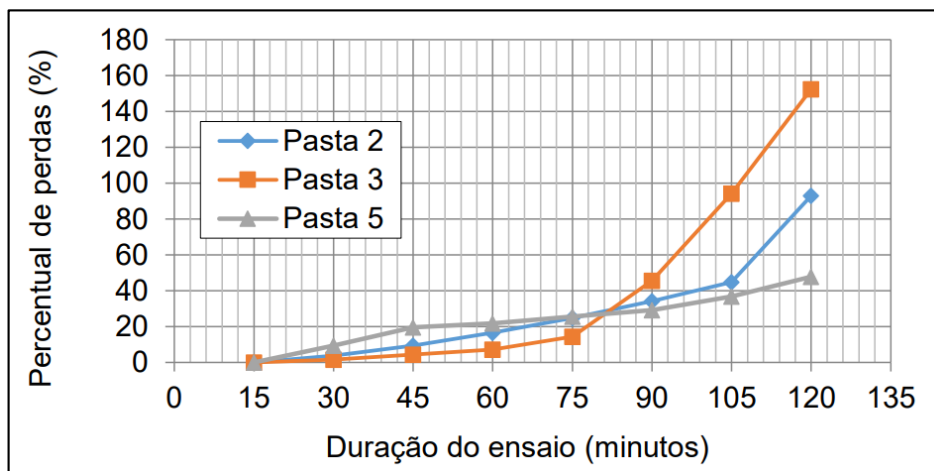
Fonte: Adaptado de Toillier (2017).

A Figura 14 apresenta uma modificação no traço e porcentagens de aditivos, que Toillier (2017) explica se fazer necessário para melhorar as diferenças de abatimento com o tempo. Pode-se inferir que o melhor desempenho quanto à perda foi do aditivo 1, mantendo muito bem suas propriedades nos primeiros 30 minutos. Isso a autora explica por ser um aditivo cuja base possui lignossulfonatos e policarboxilatos, que em combinação permite uma baixa redução no abatimento inicialmente em razão dos componentes químicos retardarem a hidratação do cimento.

Outro estudo relacionado foi o apontado por Jalali *et. al* (2016) cujo trabalho tinha por objetivo buscar demonstrar a possibilidade de estabelecimento do tempo disponível de trabalhabilidade do concreto autoadensável fresco através de ensaios aplicados nas suas pastas, utilizando-se de um aparato desenvolvido para medir o tempo de início e fim de pega em canteiro de obra. Neste estudo estiveram envolvidas análises em conjunto da Universidade de Pernambuco (com recursos

disponíveis no Recife) e Universidade do Minho, em Portugal. Pode-se observar na Figura 15 a porcentagem de perda de trabalhabilidade no decorrer do tempo.

Figura 15 – Percentual de perda de desempenho das pastas



Fonte: Jalali *et al* (2016)

Observou-se nesta pesquisa que os tempos de fluidez estão mais próximos para as pastas 2 e 5 em relação à pasta 3. Cabe salientar que as pastas 2 e 5 possuem aditivos superplastificantes à base de policarboxilatos éster e plastificantes à base de lignossulfonatos em sua composição, ao passo que a pasta 3 somente os PCE's. Foi ainda notado que o tempo de fluidez das pastas 2 e 5 apontam que a melhor trabalhabilidade é possível de ser obtida até os 105 minutos, e, a partir daí, acentua-se o aumento na curva do tempo de fluidez, que pode ser decorrente da perda de desempenho do superplastificante. Por outro lado, percebe-se que a pasta 3 possui maior tempo de fluidez e melhor trabalhabilidade até 75 minutos. Os autores entendem o porquê do CAA aplicado na região do Recife, usualmente, possuir a associação de superplastificantes e plastificantes em suas composições (JALALI, *et al*, 2016).

Ainda sobre este estudo, os autores afirmam que o plastificante à base de lignossulfonato confere uma boa fluidez ao concreto, em virtude da explicação dada sobre a Figura 12, sobre a ação eletrostática sobre os grãos de cimento. Aliado a essa propriedade conferida por tal aditivo, se vinculado a um policarboxilato éster, permite-se aumentar ainda mais o tempo de trabalhabilidade do concreto, já que os PCE's agem de forma a retardar a hidratação do cimento, já que ao induzir a formação de uma camada que envolve os grãos, ela impede o contato das partículas com a água e, causando a dissolução das mesmas. O grau com o qual aditivos compostos

por policarboxilatos 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 (JALALI, *et al*, 2016).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados durante o procedimento metodológico, assim como a validação do método de dosagem proposto por Porto (2020) e os procedimentos relevantes utilizados para obter conclusões acerca da transferência de tecnologia da produção de um concreto autoadensável do laboratório à obra.

3.1 LOCAL DA PESQUISA

Com o fim de obter resultados relevantes ao desenvolvimento da pesquisa, os ensaios foram realizados em parte no complexo de laboratórios de Engenharia Civil, da Universidade Estadual de Londrina (UEL), e ainda na Concrenorte Concreto e Argamassa, concreteira localizada no município de Arapongas – PR que permitiu produção e acompanhamento dos parâmetros de qualidade do CAA com seu posterior lançamento.

3.2 DELINEAMENTO DA PESQUISA

Este estudo se iniciou com o desenvolvimento da revisão bibliográfica, sendo em seguida realizadas as coletas e aquisições dos materiais para a produção do CAA, fornecidas pela Concrenorte, e posteriormente os ensaios para caracterização dos mesmos. Ao término desta etapa, foi validada a metodologia de dosagem proposta por Porto (2020). Após validação da autoadensabilidade das argamassas, foi aplicado para a produção do concreto, permitindo a comprovação do método. Em paralelo à validação, o tempo de manutenção dos aditivos químicos foram verificados e confirmados na produção de concreto, que permitiu a transferência de tecnologia da sua produção do laboratório à obra, sendo aplicado o mesmo estudo acerca dos aditivos na concreteira/obra.

3.3 MATERIAIS

Os materiais utilizados na produção dos materiais cimentícios – argamassas e concretos – estão listados a seguir:

- a) Cimento *Portland*: o cimento *Portland* a ser utilizado é o do tipo

CP II-F40, em conformidade com a ABNT NBR 16697 – Cimento Portland – Requisitos (2018);

- b) Agregado miúdo natural (AMN);
- c) Pedra britada de basalto;
- d) Aditivo Superplastificante (SP): um dos aditivos utilizados é um composto sintético à base de polímeros policarboxilato e outros três estudados, além dessa base citada tem também a presença de nanopartículas de sílica;
- e) Aditivo Polifuncional à base de lignossulfonato;
- f) Pó de basalto utilizado como adição mineral (correção);
- g) Água: a água utilizada para a produção do CAA é proveniente do sistema de abastecimento de água da Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR).

3.3.1 Cimento Portland

A escolha do tipo de cimento foi o composto com fíler e ocorreu em virtude de ser o tipo utilizado pela concreteira, que realizou o fornecimento dos materiais para a pesquisa com intuito da realização da transferência de tecnologia e validação in loco. A massa específica, segundo o fabricante, é de 3.050 kg/m³ e de acordo com o mesmo, o início do tempo de pega é maior ou igual a 1 hora. A Tabela 7 apresenta os dados da composição do cimento Portland CPII-F40 utilizado no procedimento experimental, segundo o fabricante.

Tabela 7 - Composição química do cimento Portland CPII-F40

Componente	Faixa de concentração (% em massa)
Silicato tricálcico	20 - 70
Silicato dicálcico	10 - 60
Ferro-aluminato de cálcio	05 - 15
Sulfato de cálcio	02 - 08
Aluminato tricálcico	01 - 15
Carbonato de cálcio	0 - 10
Óxido de magnésio	0 - 6
Óxido de cálcio livre	0 - 2

Fonte: O Fabricante.

3.3.2 Aditivo Polifuncional e Superplastificante

Quanto ao aditivo polifuncional utilizado foi um plastificante de pega normal, o CQ Plast PN 795 S, à base de lignossulfonatos e matérias-primas naturais, isento de cloretos. A Tabela 8 menciona seus dados técnicos de acordo com o fabricante.

Tabela 8 - Dados técnicos do aditivo polifuncional
Dados técnicos do aditivo polifuncional à base de lignossulfonato

Função	Plastificante Polifuncional
Base Química	Lignossulfonatos
Aspecto	Líquido preto
pH	4,5 - 7,5
Densidade	1,130 - 1,160 g/cm ³
Dosagem	0,4 - 1,2% s.p.c

Fonte: O Fabricante.

Em se tratando dos aditivos superplastificantes, foram utilizados quatro tipos diferentes. O primeiro deles, da linha CQ Flow 18 – 1865, sendo de terceira geração à base de policarboxilatos totalmente isento de cloretos e atendendo aos requisitos das normas NBR 11768 (tipo P e SP) e ASTM C494 (tipo A e F). Na Tabela 9 seguem dados técnicos fornecidos pelo fabricante.

Tabela 9 - Dados técnicos do aditivo superplastificante – Aditivo 1

Dados Técnico do Aditivo 1	
Função	Superplastificante
Base Química	Policarboxilatos
Aspecto	Líquido amarelo
pH	4,5 - 6,5
Densidade	1,07 - 1,09 g/cm ³

Fonte: O Fabricante.

Os outros três aditivos superplastificantes consistem na mistura de nanopartículas de sílica em conjunto com polímeros hidrofílicos a base de éter e éster policarboxilato.

Nas Tabelas 10, 11 e 12, encontram-se respectivamente os dados técnicos dos aditivos 2, 3 e 4, respectivamente.

Tabela 10 - Dados técnicos do aditivo 2

Característica	Unidade	Valor
Homogeneidade	-	Homogêneo, sem sedimentação
Cor	-	Lis. Castanho - avermelhado
pH	Adimensional	9,0 - 9,5
Massa Específica	g/cm ³	1,04
Teor de Sólidos	%	10 - 14
Cloretos solúveis em água (Cl ⁻)		Isento de cloretos

Fonte: O Fabricante.

Tabela 11 - Dados técnicos do aditivo 3

Característica	Unidade	Valor
Homogeneidade	-	Homogêneo, sem sedimentação
Cor	-	Lis. Castanho - avermelhado
pH	Adimensional	9,0 - 9,5
Massa Específica	g/cm ³	1,05
Teor de Sólidos	%	14 - 18
Cloretos solúveis em água (Cl ⁻)		Isento de cloretos

Fonte: O Fabricante.

Tabela 12 - Dados técnicos do aditivo 4

Característica	Unidade	Valor
Homogeneidade	-	Homogêneo, sem sedimentação
Cor	-	Lis. Amarelado claro
pH	Adimensional	9,0 - 9,5
Massa Específica	g/cm ³	1,05
Teor de Sólidos	%	18 - 22
Cloretos solúveis em água (Cl ⁻)		Isento de cloretos

Fonte: O Fabricante.

3.3.3 Agregado miúdo

O agregado miúdo natural utilizado é proveniente do Rio Paraná, da cidade de Nova Londrina/PR. Na Tabela 13 estão apresentadas suas propriedades.

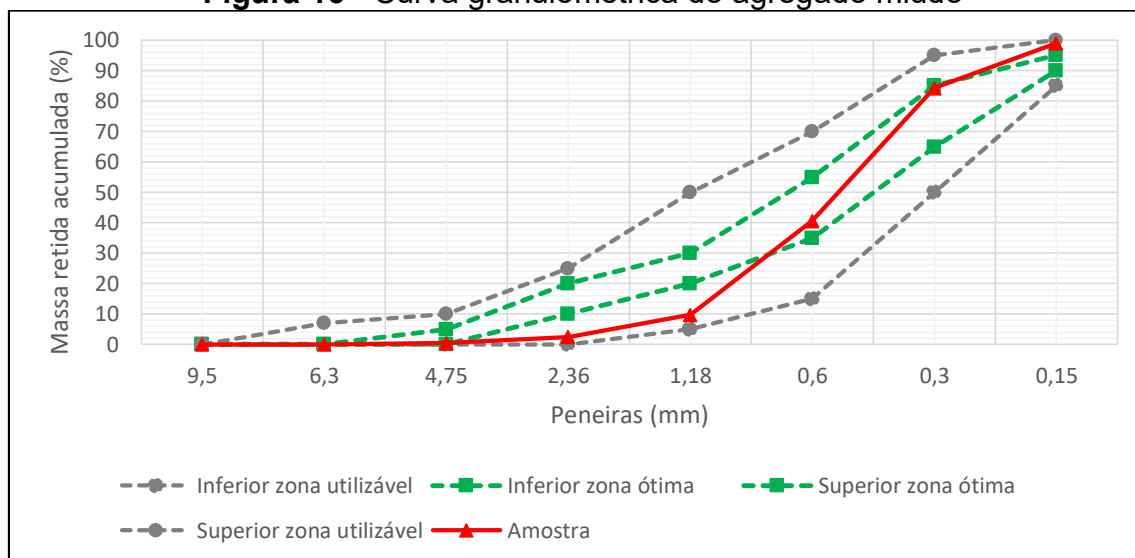
Tabela 13 - Propriedades físicas do agregado miúdo

Ensaio	Resultados	Norma Reguladoras
Índice de vazios (%)	41,78	ABNT NBR NM 45/2006
Massa unitária solta (kg/m ³)	1.534	DNER-ME 194/1998
Massa específica seca (kg/m ³)	2.634	ABNT NBR NM 52/2009
Teor de pulverulento (%)	0,52	ABNT NBR NM 46/2003
Absorção de água (%)	0,57	ABNT NBR NM 30/2001

Fonte: O autor.

A distribuição granulométrica do agregado miúdo foi realizada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003) e pode ser visualizada na Figura 16.

Figura 16 - Curva granulométrica do agregado miúdo



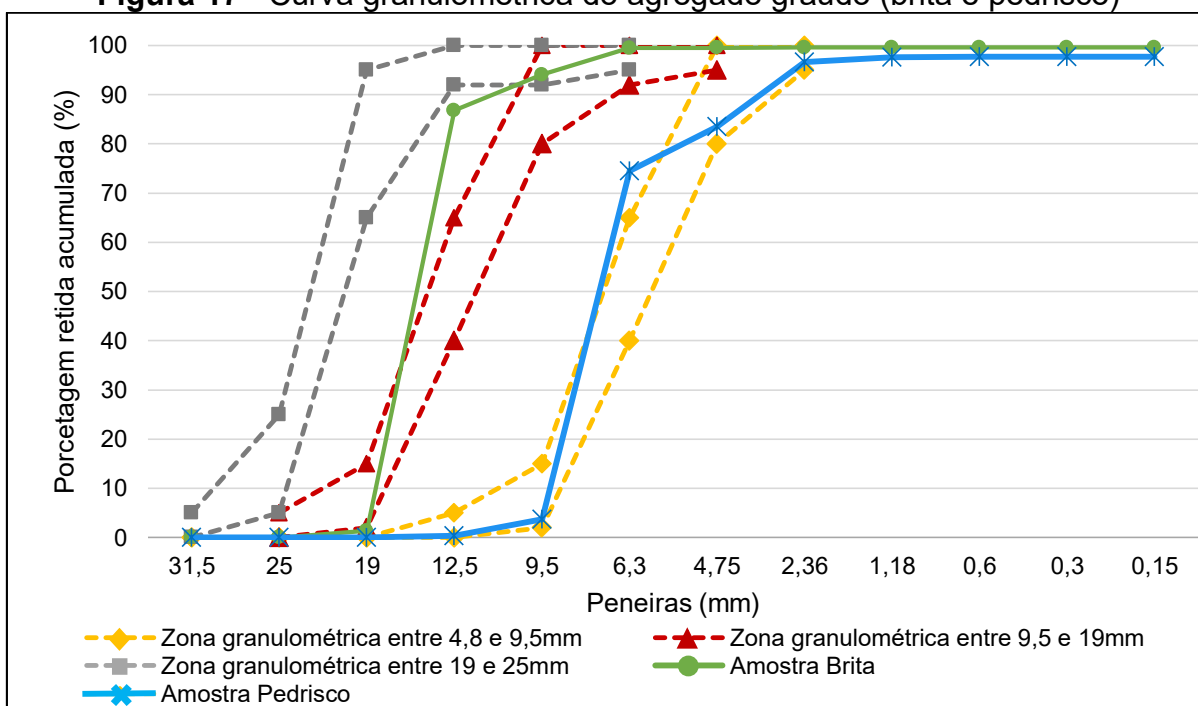
Fonte: O autor.

Conforme é possível verificar na Figura 16, a distribuição granulométrica do agregado miúdo se encontra em boa parte dentro da zona ótima e em sua totalidade na zona utilizável, de acordo com a NBR 7211 (2019), além de notar seu comportamento em S, característico de agregados com granulometria contínua. Ressalta-se que seu módulo de finura é igual a 2,37, possuindo dimensão máxima de 2,36 mm.

3.3.4 Agregado graúdo

Com relação aos agregados graúdos, foram utilizadas duas granulometrias. Quanto à distribuição granulométrica das britas, as mesmas se encontram na Figura 17 sendo realizada de acordo com o proposto pela norma ABNT NBR 248/2003.

Figura 17 - Curva granulométrica do agregado graúdo (brita e pedrisco)



Fonte: O autor.

É possível observar de acordo com os resultados obtidos, que para a brita, mais de 85% da amostra acumulada ficou retida na peneira de 12,5 mm, indicando a zona granulométrica da brita analisada, limitada pelo diâmetro mínimo de 2,36 mm e máximo 19 mm. Portanto, a dimensão máxima característica (DMC) é determinado como sendo de 19 mm, tendo como classificação brita 1. Já para o pedrisco, observa-se um DMC de 9,5 mm, permitindo enquadrá-lo na categoria de brita 0.

Além disso, menciona-se as demais propriedades da brita 1 e brita 0, respectivamente, nas Tabelas 14 e 15.

Tabela 14 - Propriedades físicas da brita 1

Ensaio	Resultados	Norma Regulamentadoras
Índice de vazios (%)	47,92	ABNT NBR NM 45:2006
Massa unitária sem compactar (kg/m ³)	1.532	ABNT NBR NM 45:2006
Absorção de água (%)	0,79	ABNT NBR NM 53:2009
Massa específica (kg/m ³)	2.940	ABNT NBR NM 53:2009
Teor de material pulverulento (%)	0,99	ABNT NBR NM 46/2003

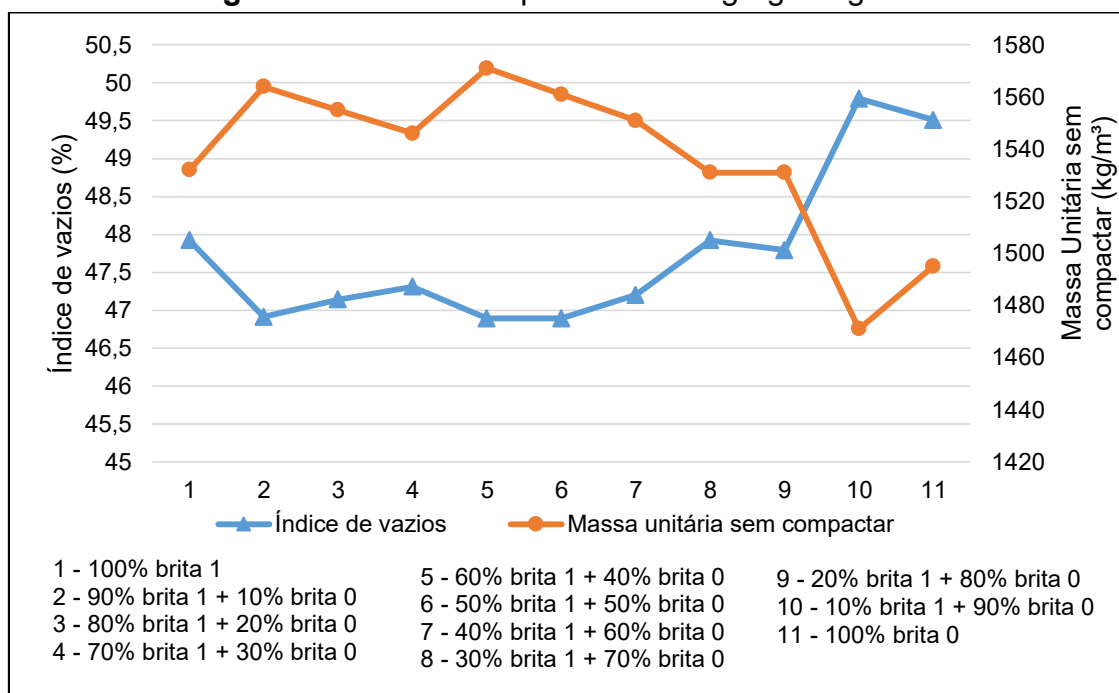
Fonte: O autor.

Tabela 15 - Propriedades físicas da brita 0

Ensaio	Resultados	Norma Regulamentadoras
Índice de vazios (%)	49,51	ABNT NBR NM 45:2006
Massa unitária sem compactar (kg/m ³)	1.495	ABNT NBR NM 45:2006
Absorção de água (%)	1,42	ABNT NBR NM 53:2009
Massa específica (kg/m ³)	2.960	ABNT NBR NM 53:2009
Teor de material pulverulento (%)	1,37	ABNT NBR NM 46/2003

Fonte: O autor.

A partir dos resultados obtidos da caracterização dos agregados graúdos, uma composição entre brita 1 e 0 foi feita com intuito de analisar a compactidade, visto que o método proposto leva em consideração tal propriedade. É possível observar que ela acontece quando há um menor índice de vazios e maior massa unitária nas composições. Para tanto, foram preparadas 11 (onze) composições de 2000 gramas cada, partindo de uma primeira amostra com 100% de brita 1 para outra de 90% de brita 1 com 10% de brita 0, seguindo para uma terceira de 80% de brita 1 com 20% de brita 0 e assim por diante, até que chegasse numa décima primeira amostra com 100% de brita 0. Destas composições, foram encontradas propriedades físicas como a massa unitária sem compactar e índice de vazios, como pode-se verificar na Figura 18.

Figura 18 – Maior compactidade do agregado graúdo

Fonte: O autor.

Para tanto, assim como mostra a Figura 18, a composição escolhida para ser trabalhada na produção de concretos autoadensáveis foi a de número 5, composta por 60% brita 1 e 40% brita 0, por ter atingido o menor índice de vazios, na faixa de 46,89% e uma maior massa unitária, sendo 1.571 kg/m³. Assim como dita o método de dosagem proposto, tal escolha foi feita com base na amostra que resultou numa maior compactidade.

Na Tabela 16, encontram-se as propriedades físicas desta composição que foram utilizadas no cálculo da dosagem para produção dos concretos.

Tabela 16 – Propriedades físicas das composição de 60% de brita 1 com 40% de brita 0

Composição de 60% de brita 1 e 40% de brita 0	
Massa unitária sem compactar	1571 kg/m ³
Massa específica	2960 kg/m ³
Índice de vazios	46,89%
Absorção de água	1,08%
Teor de material pulverulento	1,15%

Fonte: O autor.

3.3.5 Pó de basalto

Foi utilizada como adição o pó de basalto, fornecido pela concreteira (região de Arapongas-PR), material disponível como areia britada de basalto. Observa-se na Figura 19 a composição inicial da mistura (a) e o material resultante retido na peneira número 200 (0,075mm) (b), sendo somente este material utilizado como adição, caso necessário, para correção da viscosidade em argamassas e concretos. A massa específica obtida para esse material foi de 2.885 kg/m³.

Figura 19 – Material retido na peneira de número 200

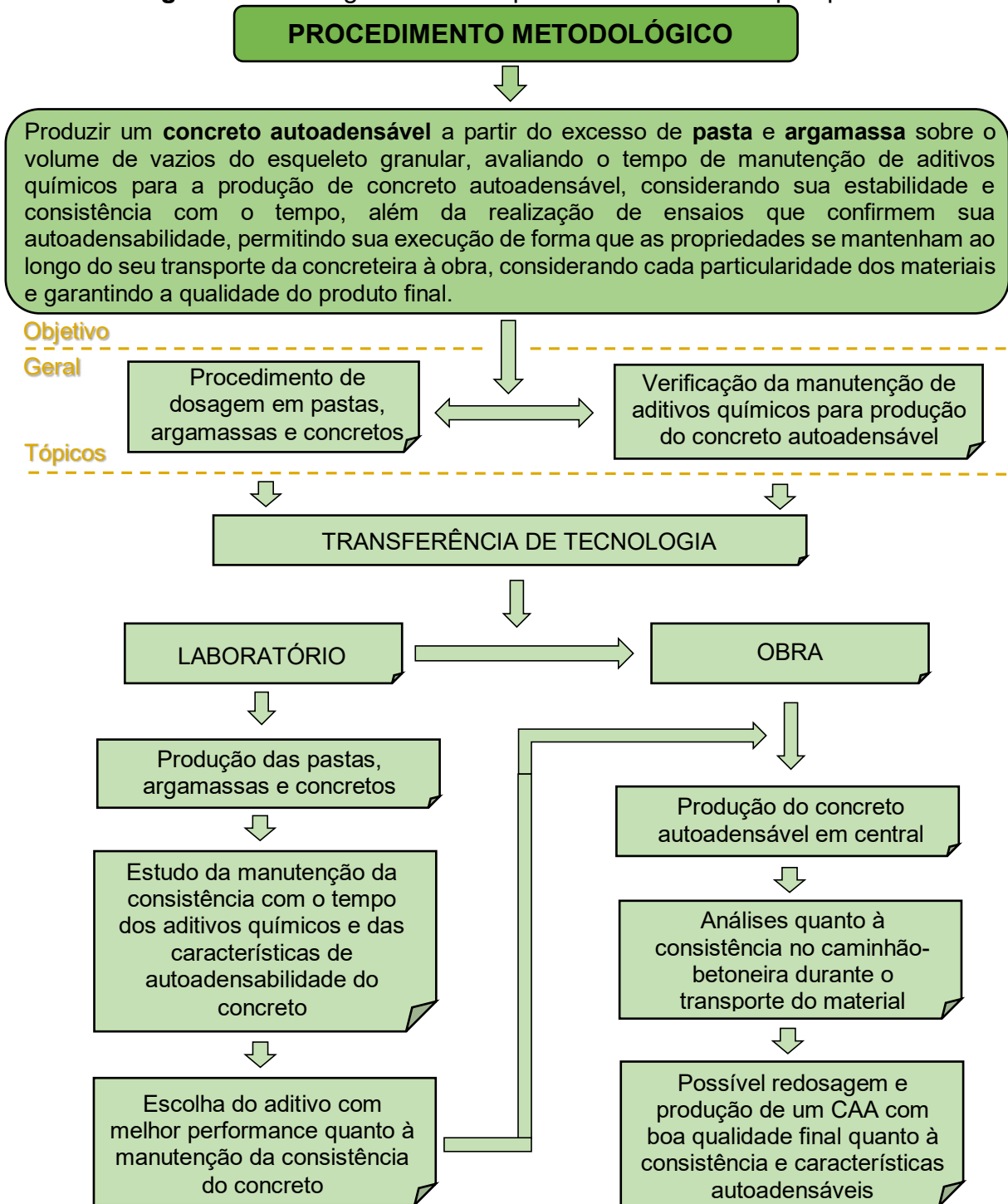


Fonte: O autor

3.4 MÉTODO

Com o intuito de se obter o objetivo proposto nesta pesquisa, o método está subdividido como apresentado no fluxograma da Figura 20.

Figura 20 - Fluxograma das etapas desenvolvidas na pesquisa



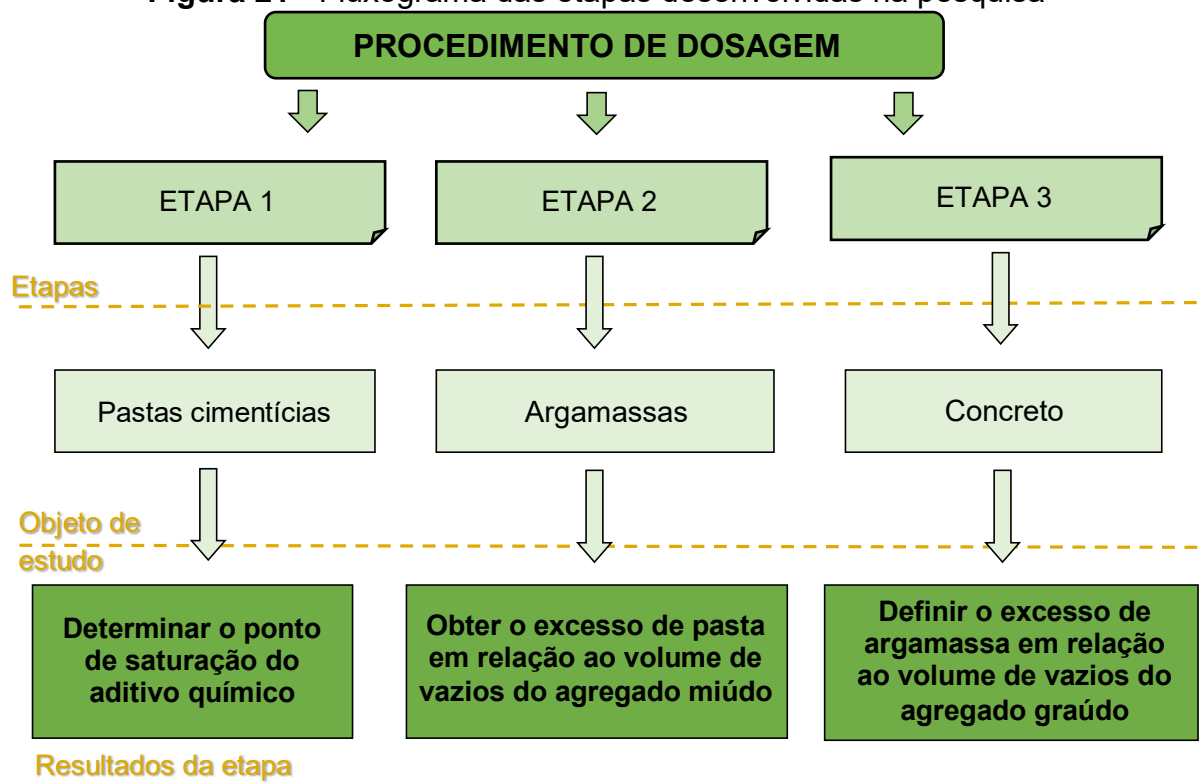
Subtópicos

Fonte: O autor.

3.4.1 Procedimento de dosagem

O procedimento de dosagem proposto neste trabalho é uma validação do realizado por Porto (2020) que por sua vez, utilizou-se de uma adaptação dos trabalhos de Toralles-Carbonari (1996) e Gomes (2002). Sendo assim, o procedimento estuda as diferentes fases que compõem um concreto como apresentado na Figura 21.

Figura 21 - Fluxograma das etapas desenvolvidas na pesquisa



Fonte: Adaptado de Porto (2020).

Em se tratando da primeira etapa do estudo, afirma-se que as análises em pasta tem por objetivo encontrar o ponto de saturação dos aditivos químicos em estudo. Quando o mesmo já é conhecido ou o teor de aditivo especificado pelo fabricante, a realização da mesma é dispensável.

Assume-se que, na Etapa 2, o intuito da pesquisa se torna obter o excesso de pasta (EX_{pasta}), de acordo com o esqueleto granular do agregado miúdo (AM), resultando então numa argamassa autoadensável, segundo limites impostos pela literatura.

A partir do alcance das características e propriedades autoadensáveis obtidos na etapa de argamassa, o estudo da Etapa 3 se inicia, onde a mesma deva preencher os vazios do AG e exceder o seu volume de maneira que o concreto apresente características satisfatórias de autoadensabilidade.

Inferre-se ainda que deva fixar a relação água/cimento, sendo considerada como um dado de entrada do procedimento e mantida em todas as etapas do procedimento de dosagem.

3.4.1.1 Etapa 1 – Pastas cimentícias

O ponto de saturação do aditivo químico é o objeto de estudo nesta etapa. Sendo assim, utiliza-se do ensaio de tempo de escoamento com o cone de Marsh – Figura 22 – que expressa um cone de metal no qual 800 mL de pasta cimentícia é colocada em seu interior para que, em seguida, seja determinado o tempo necessário para que 200 mL flua através do orifício, conforme proposto por Monteiro, Pitangueira e Wolenski (2012).

Figura 22 - Cone de Marsh



Fonte: O autor.

Na Figura 23 é ilustrada uma leitura do ponto de saturação, de forma aleatória, apenas com o intuito da explicação de como foi feita a realização deste ensaio, permitindo afirmar que quando um frasco de vidro recebia 200 mL de pasta, conforme na última ilustração da direita, o tempo era anotado para fazer as correlações.

Figura 23 - Enchimento de frasco com 200 mL de pasta

Fonte: O autor.

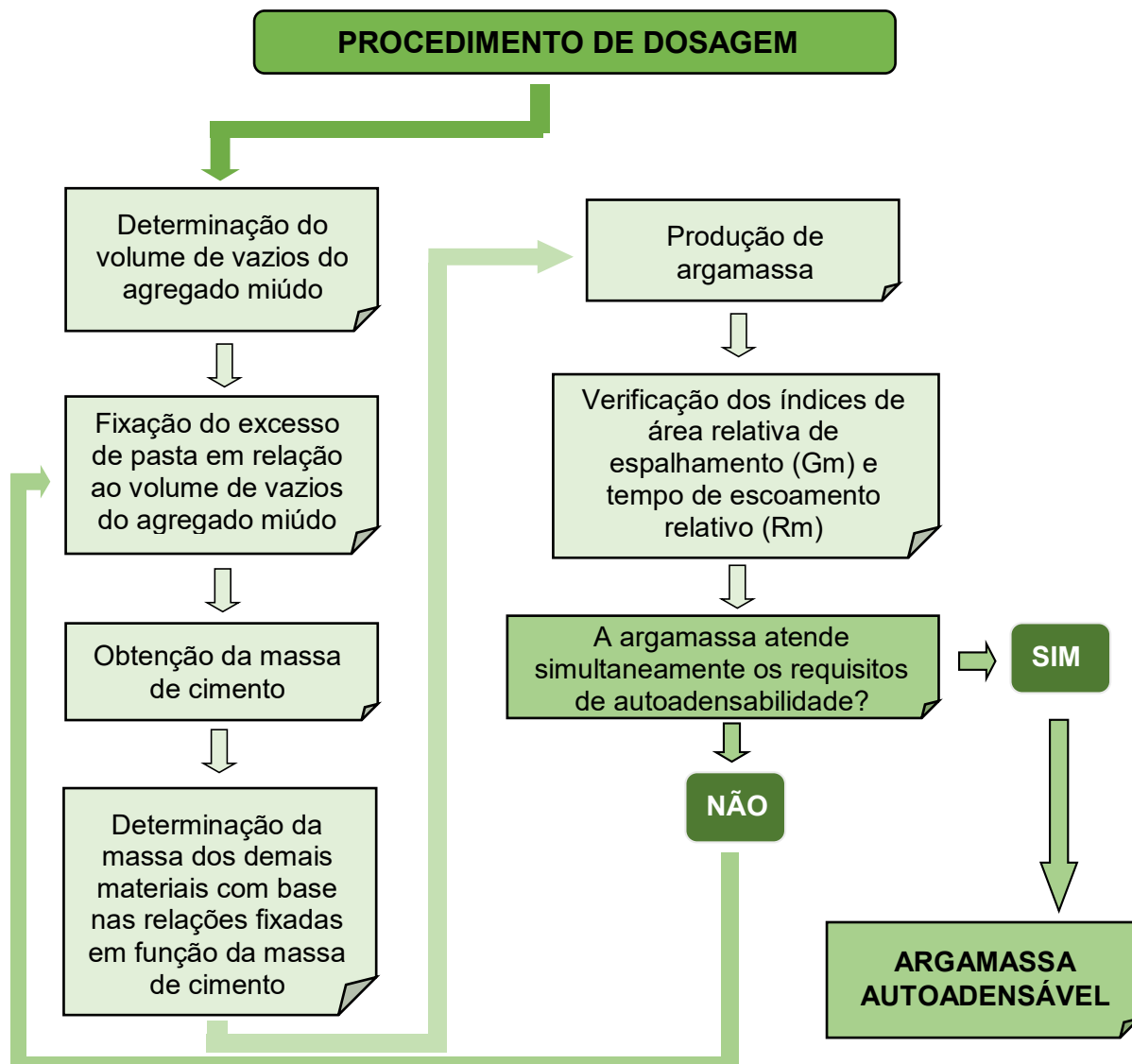
Nesta etapa, foram produzidas 17 (dezesete) pastas ao total, com teores diferentes de aditivo num mesmo traço utilizado por Porto (2019) somente com o intuito de analisar o ponto de saturação dos aditivos.

A partir da metodologia proposta por Gomes, Gettu e Agulló (2003), o ponto de saturação tornar-se-á aquele que possuir ângulo interno de $140 \pm 10^\circ$ na curva de log do tempo de fluxo por teor de aditivo químico.

3.4.1.2 Etapa 2 – Argamassas

A Etapa 2 tem como objetivo a determinação da porcentagem de excesso de pasta (EX_{pasta}) em relação ao volume de vazios do agregado miúdo cujo valor ideal é aquele capaz de preencher os vazios de tal agregado e excedê-los de maneira que a argamassa produzida obtenha características satisfatórias quanto à autoadensabilidade. Para tal, os passos dessa etapa metodológica são apresentados nos fluxograma da Figura 24.

Figura 24 - Fluxograma do procedimento de dosagem da argamassa



Fonte: Adaptado de Porto (2020).

O Apêndice A mostra, de forma detalhada, todo o processo de cálculo e formulações das quantidades de materiais para a produção de argamassa autoadensável. O consumo primordial do cálculo é o do cimento sendo o que dita todas as outras quantidades.

Porto (2020) menciona que após encontrar o consumo de cimento, torna-se possível obter o consumo dos demais materiais a partir das relações fixadas. Sendo assim, são apresentados na Tabela 17 os ensaios realizados no estado fresco da argamassa.

Tabela 17 - Ensaio no estado fresco proposto no procedimento de dosagem na etapa de argamassa

Ensaio	Unidade	Equação	Método
Espalhamento (G_m)	mm	$G_m = \left(\frac{D_m}{D_0}\right)^2 - 1$	Okamura, Ozawa e Ouchi (2000)
Tempo de escoamento (R_m)	s ⁻¹	$R_m = \frac{10}{t}$	Okamura, Ozawa e Ouchi (2000)
Procedimento Expedito (T_{risco})	s ⁻¹	-	Porto et. al. (2019)

Fonte: O autor.

Na Tabela 18, estão apresentados os limites bibliográficos utilizados para os ensaios apresentados na Tabela 18.

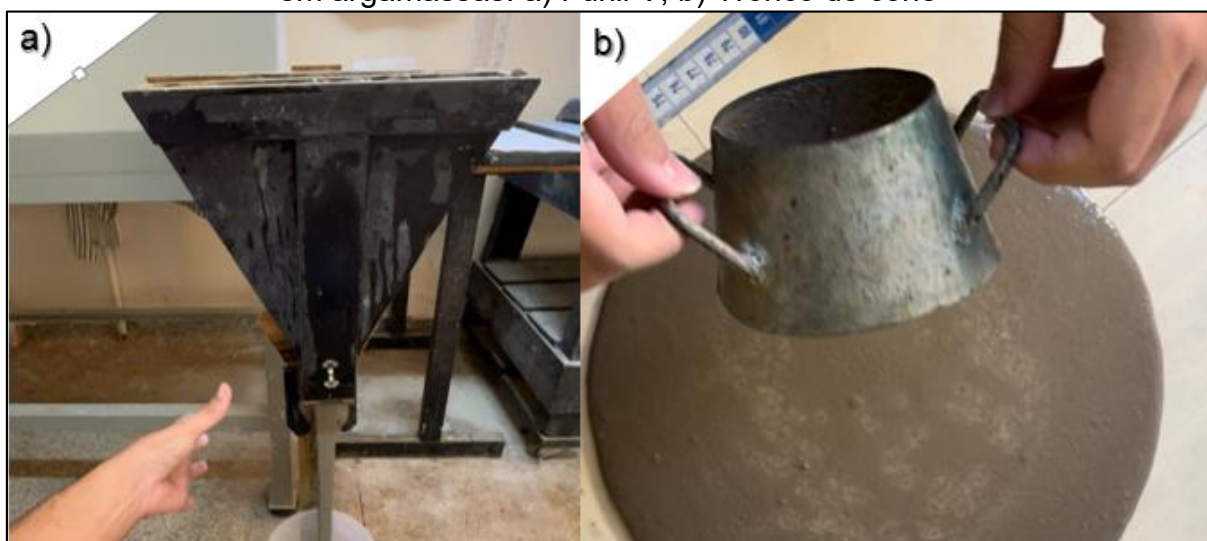
Tabela 18 - Limites da literatura utilizados

Limites utilizados	Referência bibliográfica
Área relativa de espalhamento $3 \leq G_m \leq 6,8$	Melo (2005)
Tempo de escoamento relativo $1 \leq R_m \leq 2,86$	Melo (2005)

Fonte: O autor (2022)

Os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios de caracterização em argamassas foram os da Figura 25.

Figura 25 - Equipamentos para ensaio de tempo de escoamento e espalhamento em argamassas: a) Funil V; b) Tronco de cone



Fonte: O autor.

O outro ensaio realizado na metodologia proposta por Porto (2020) que tem como criação própria, através de Porto et. al. (2019) é o Procedimento Expedito, cuja realização se dá com a passagem de uma espátula de 4 cm no centro da argamassa espalhada, avaliando a estabilidade visual da mesma após ser riscada, onde deve retornar à posição original. A Figura 26 mostra as etapas da realização do procedimento.

Figura 26 - Etapas para realização do procedimento expedito

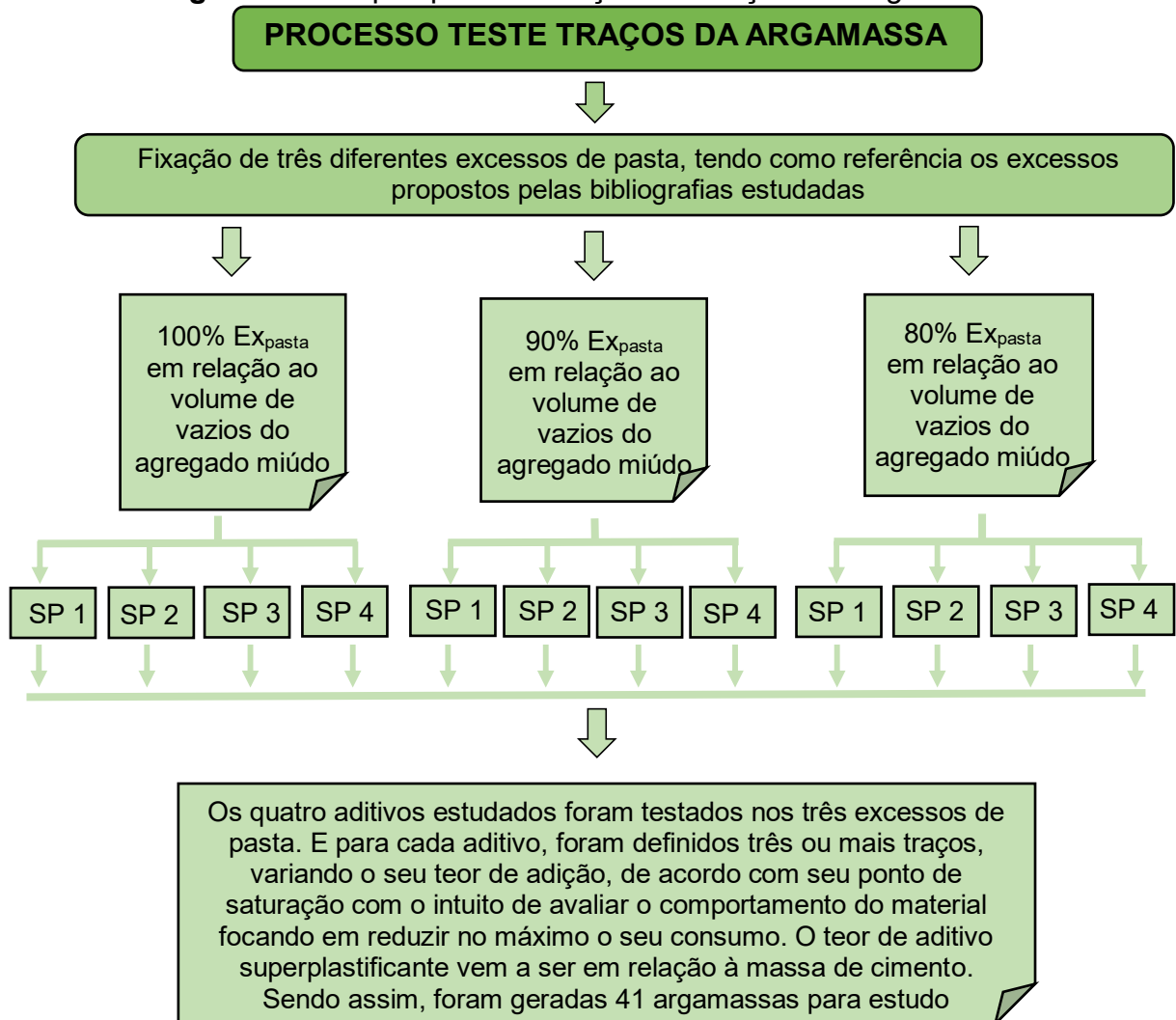


Fonte: O autor.

Sendo assim, no T_{risco} , o material deverá ser considerado autoadensável se o mesmo fechar o centro do risco realizado pela espátula, como mostra a última etapa da Figura 26.

Salienta-se que nesta etapa de estudo, 4 aditivos superplastificantes (denominados como aditivo 1, 2, 3 e 4) foram analisados com base química de policarboxilatos e suas etapas de estudo foram feitas conforme a Figura 27.

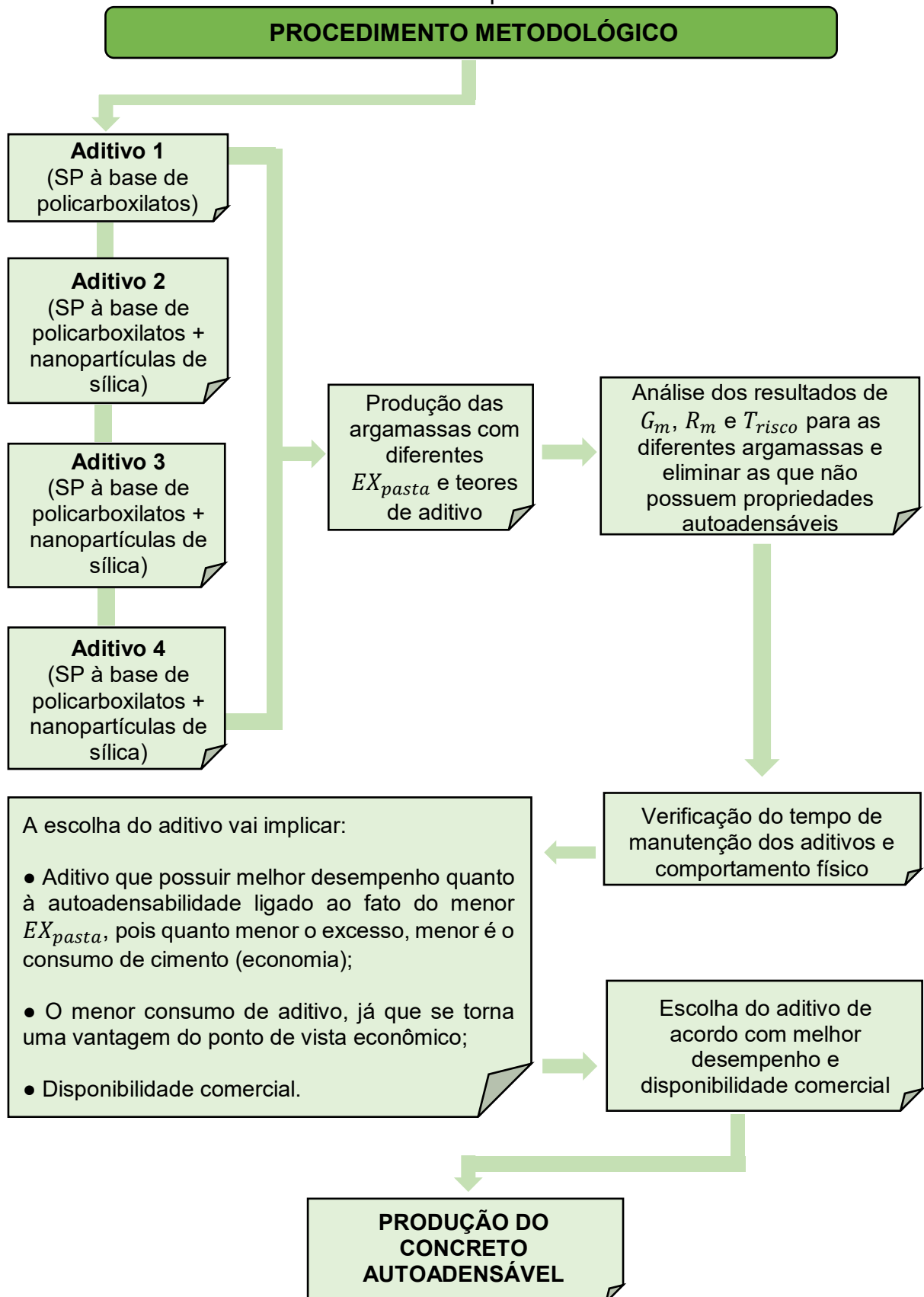
Figura 27 - Etapas para realização dos traços das argamassas



Fonte: O autor.

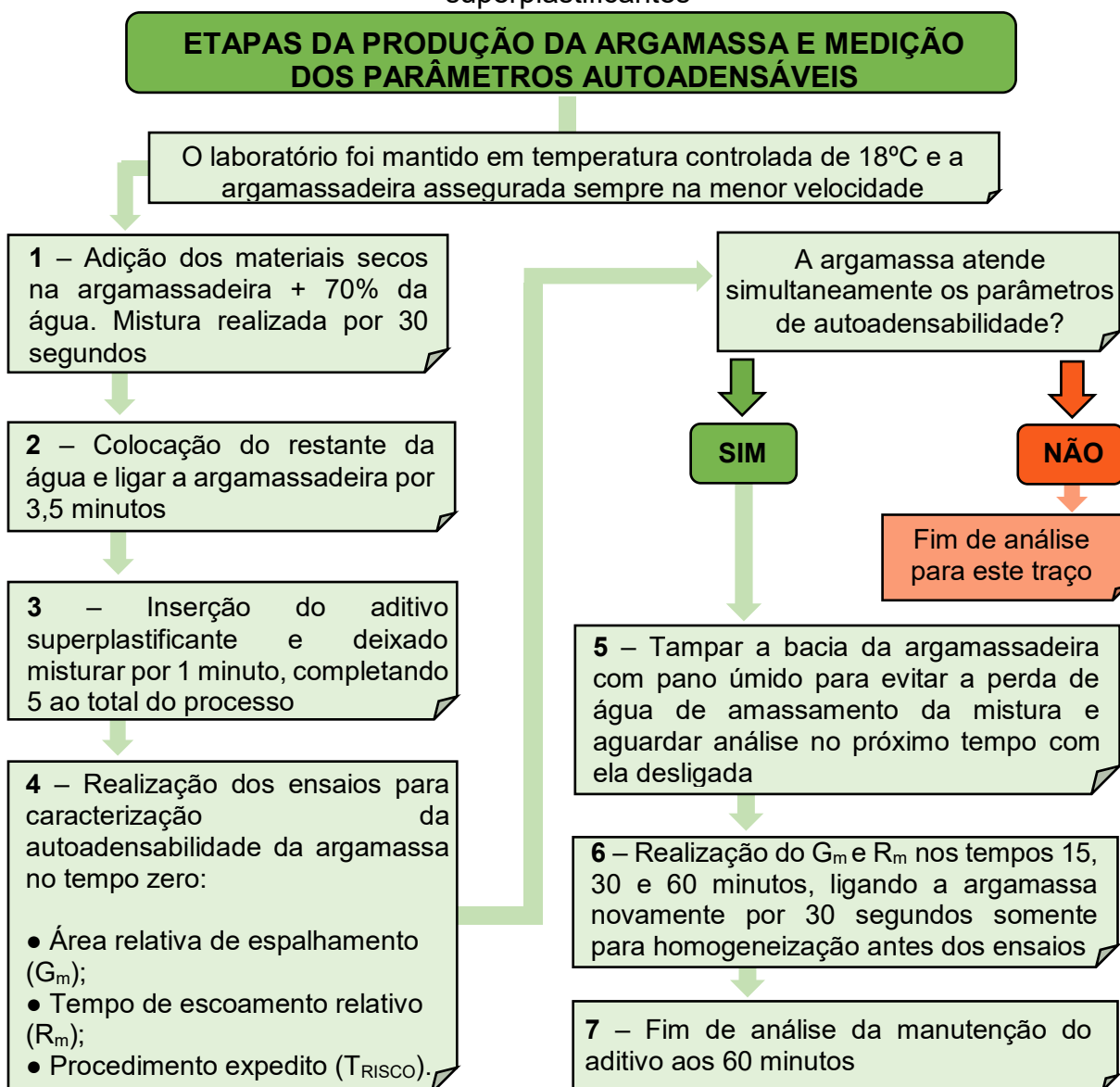
Após a realização destes ensaios, que possibilitaram conferir a autoadensabilidade da argamassa com os diferentes excessos de pasta em relação ao volume de vazios do agregado miúdo, foi feita uma análise de qual excesso de pasta vinculado à porcentagem de aditivo que fornecerá uma melhor argamassa tomando como base suas características de autoadensabilidade, consumo de cimento e porcentagem de SP, que vão interferir no gasto final da produção do concreto, com intuito de ser escolhida e levada para a próxima etapa de estudo. A Figura 28 menciona o processo de escolha do aditivo superplastificante à base de policarboxilatos para estudo em concreto e cabe ressaltar que o aditivo à base de lignossulfonato já será utilizado em conjunto com algum SP que será escolhido nesta etapa mencionada na Figura 28.

Figura 28 - Fluxograma do procedimento de escolha do aditivo superplastificante a ser estudado na etapa de concretos



Outro estudo pertinente à fase de argamassa se dá em torno da análise da manutenção dos aditivos químicos com o intuito de avaliar o tempo de ação de um superplastificante na composição cimentícia e definir limites para a inserção do polifuncional à base de lignossulfonato com intuito de utilizar na fase de concreto. O fluxograma da Figura 29 exemplifica o que foi citado.

Figura 29 - Fluxograma do procedimento de definição da manutenção dos aditivos superplastificantes

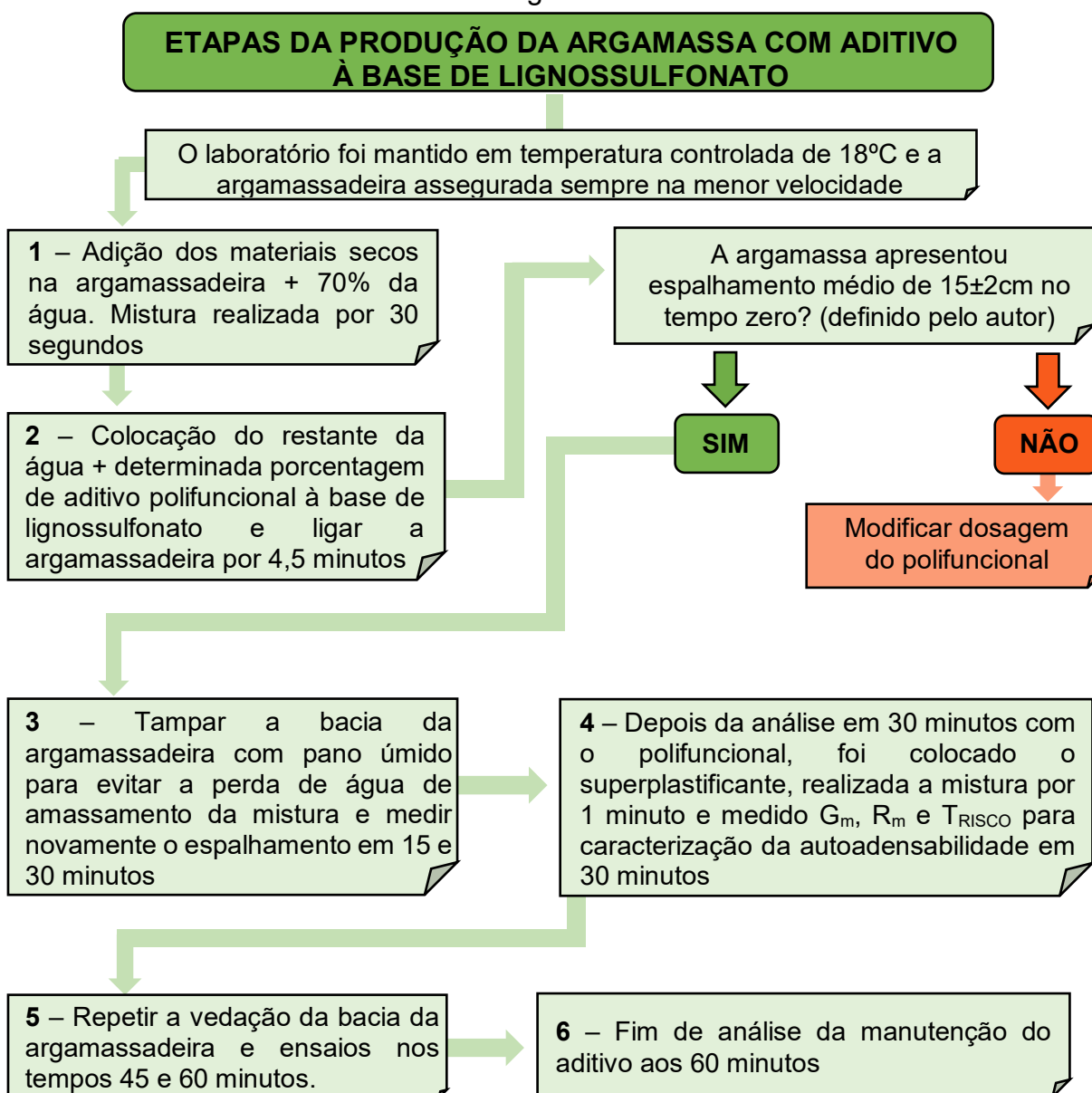


Fonte: O autor.

No fluxograma da Figura 29, pode ser visualizado que a partir da produção da argamassa, iniciam-se os ensaios de caracterização da sua autoadensabilidade, onde no tempo 0min, 15min, 30min e 60min são feitas leituras dos ensaios para analisar a perda de tais propriedades. Cabe mencionar que os 60

minutos foram definidos de acordo com o autor, uma vez que o estudo tem base em uma concreiteira há 38 km da cidade em estudo, o que diz ser um tempo razoável para transporte do material cimentício. Sendo assim, o aditivo à base de lignossulfonato será adicionado inicialmente na mistura com o intuito de conferir consistência e definir o momento estratégico de inserção do SP. Tal momento é aquele que vai permitir o concreto sair da central e chegar em obra com características satisfatórias de autoadensabilidade, sem que haja perda das mesmas com o tempo, até que seja lançado. Esta etapa mencionada é ilustrada na Figura 30.

Figura 30 – Etapas da produção de argamassa com uso do aditivo polifuncional à base de lignossulfonato

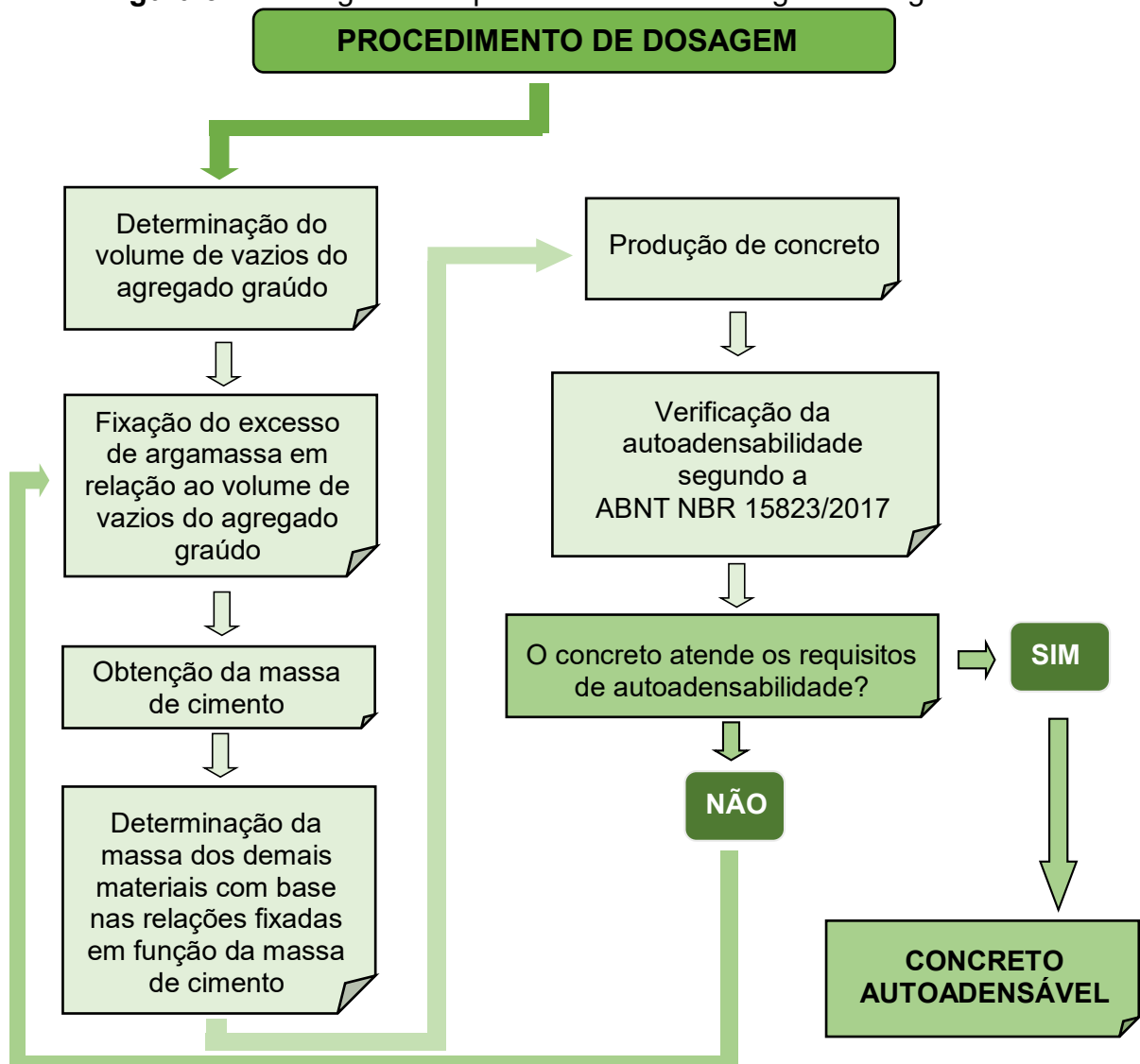


Fonte: O autor.

O espalhamento inicial com aditivo polifuncional à base de lignossulfonato proposto, conforme mostra a Figura 30, foi definido pelo autor com intuito de garantir uma consistência inicial para aumentar o tempo de manutenção do superplastificante e garantir um concreto autoadensável até o último tempo analisado.

3.4.1.3 Etapa 3 – Concretos

Figura 31 - Fluxograma do procedimento de dosagem da argamassa



Fonte: Adaptado de Porto (2020).

Nesta etapa, como validação do processo de dosagem de Porto (2020), explica-se que a produção de concretos ocorre de maneira semelhante à etapa de argamassas, uma vez que é determinado o excesso de argamassa (EX_{arg}), de acordo com o esqueleto granular do agregado graúdo, de forma que apresente

características satisfatórias de autoadensabilidade.

O consumo de argamassa é determinado como sendo o volume necessário para preencher os vazios do agregado graúdo e excedê-los de tal forma que atinja propriedades autoadensáveis.

A partir da obtenção da massa de cimento, cálculo proposto por Porto (2020) e disponibilizado no Apêndice B, as quantidades dos demais materiais foram determinadas com base nas relações fixadas. Toma-se como valor fixo a porcentagem de aditivo à base de lignossulfonato a ser utilizado na mistura, de acordo com os limites propostos pelo fabricante e testados na etapa de argamassa. Com o intuito de se verificar se o EX_{arg} em relação ao volume de vazios do agregado graúdo, alcançando as características satisfatórias de autoadensabilidade, os ensaios da Tabela 19 são realizados.

Tabela 19 - Etapas para realização do procedimento expedito

Ensaio	Método
<i>Slump flow test</i>	ABNT NBR 15823/2:2017
T_{500}	ABNT NBR 15823/2:2017
Índice de estabilidade visual	ABNT NBR 15823/2:2017
Anel J	ABNT NBR 15823/3:2017
Funil V	ABNT NBR 15823/5:2017
Caixa L	ABNT NBR 15823/4:2017
Análise da segregação estática	Nepomuceno, Pereira de Oliveira e Pereira (2018)

Fonte: O autor.

O planejamento experimental está apresentado na Tabela 20, onde foram moldados corpos de prova para a verificação da resistência à compressão do concreto produzido.

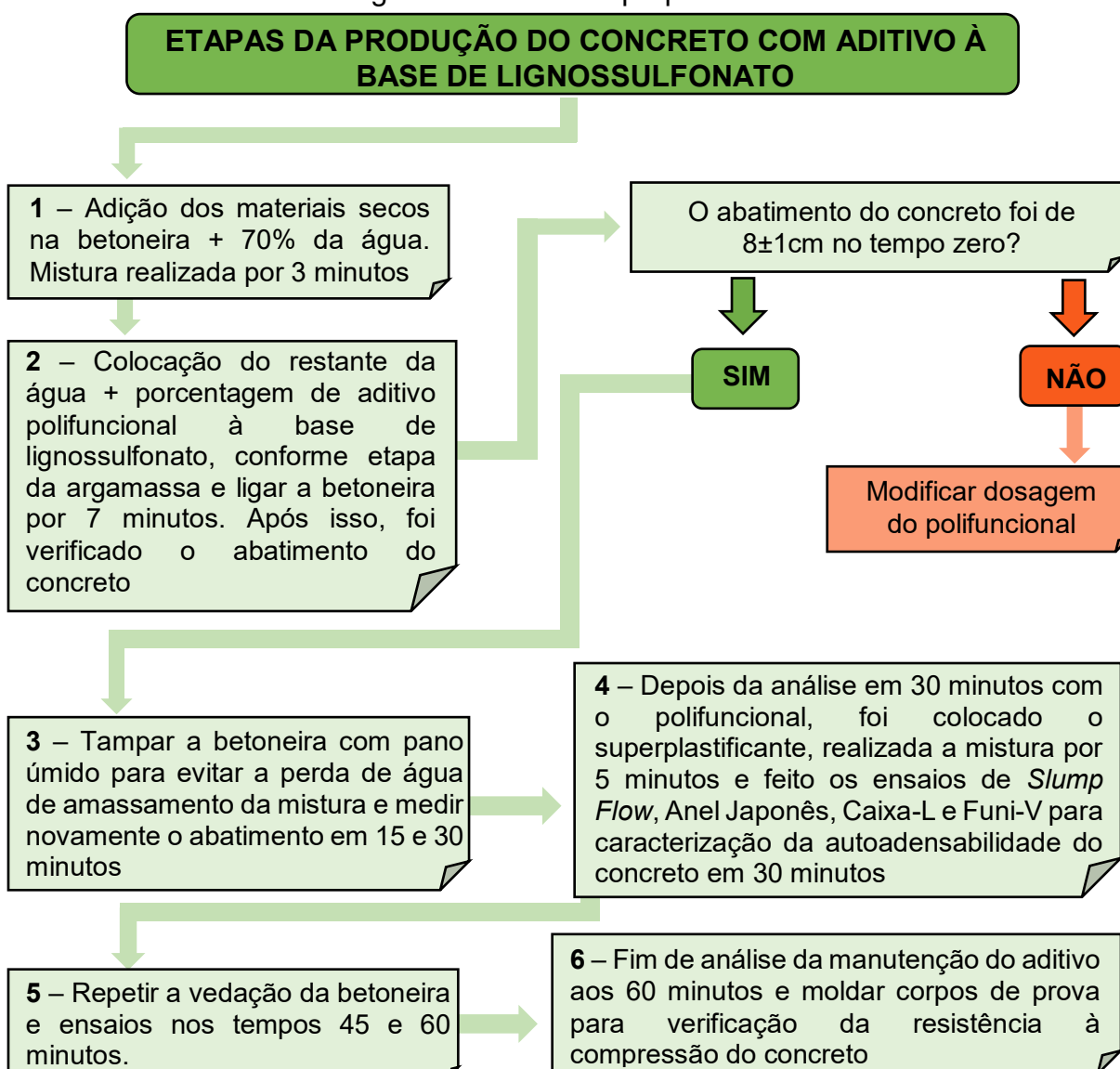
Tabela 20 - Planejamento experimental para verificação do estado endurecido do concreto autoadensável

Ensaio	Dimensão dos CP's (mm)	Nº de CP's	Idades a serem analisadas (dias)	Normas
Resistência à compressão	100x200	6	7/14	ABNT NBR 5739:2019

Fonte: O autor.

Após o concreto atingir características satisfatórias nos ensaios de caracterização da autoadensabilidade, o procedimento tem continuidade com a manutenção da consistência, medindo, portanto, as características autoadensáveis do concreto no tempo 0min, 15min, 30min e 60min, exatamente como no procedimento de argamassas, só que agora tendo a betoneira como equipamento de mistura. Este método pode ser verificado na Figura 32.

Figura 32 – Etapas da produção do concreto com uso do aditivo polifuncional à base de lignossulfonato + superplastificante



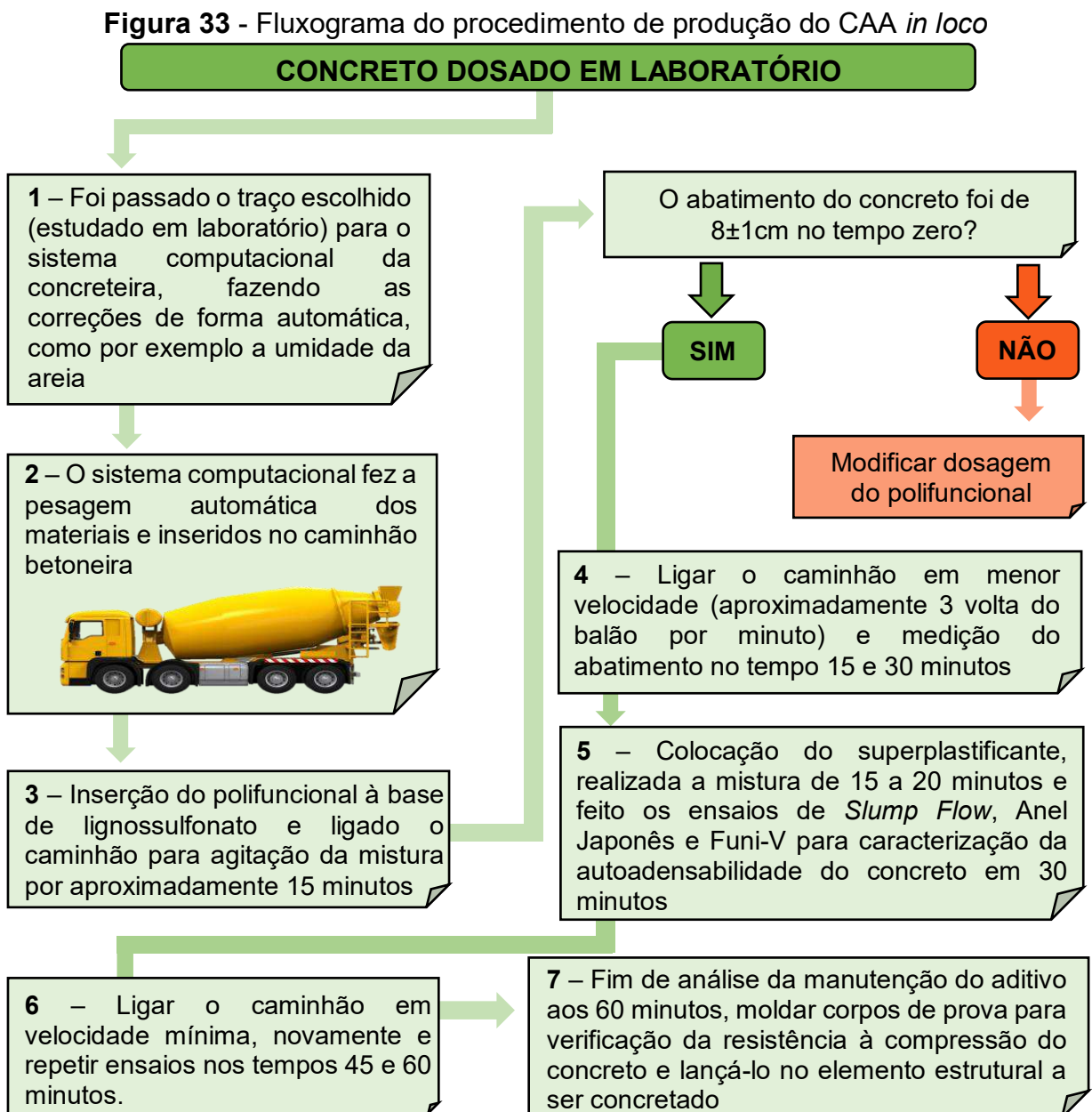
Fonte: O autor.

Em virtude do tempo de ação do aditivo superplastificante ser rápido, o intuito inicial é, então, a produção do concreto com um aditivo à base de lignossulfonato com o intuito de garantir um abatimento de 8±1 centímetros, gerando

uma consistência logo no começo da mistura (sendo este o objetivo da inserção deste aditivo) de modo que se defina o momento ideal para inserção posterior do superplastificante, garantindo um CAA com características satisfatórias e com boa qualidade ao chegar em obra. Este processo é tomado como base nos tempos de ação dos aditivos estudados nas argamassas, sendo considerados e refeitos para a etapa de produção do concreto.

3.4.2 Verificação da autoadensabilidade do concreto *in loco*

A etapa de verificação *in loco* se dá a partir da produção do concreto na concreteira e pode ser observado no fluxograma da Figura 33.



Fonte: O autor.

Assume-se, como mostra a Figura 33, que a partir da escolha do traço ideal do concreto segundo a sua autoadensabilidade, em estudos feitos em laboratório, realizar-se-á a transferência de tecnologia com a produção do CAA dentro da central de concreto, utilizando-se das definições estudadas para tempos de inserção e manutenção dos aditivos químicos. Sendo assim, o concreto será analisado de acordo com o tempo de transporte, que poderá interferir na suas propriedades autoadensáveis.

Dessa maneira, os resultados e discussões do procedimento metodológico podem ser visualizados no capítulo 4.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo estão apresentados os resultados para a defesa deste documento e discussões acerca da manutenção de aditivos químicos para produção do concreto autoadensável em laboratório com sua posterior transferência de tecnologia e validação de dosagem na central de concreto, incluindo análises do transporte e lançamento do produto final em placas pré-moldadas.

Ainda são mencionadas as adaptações realizadas *in loco* em relação às medições quanto ao tempo de manutenção dos aditivos, uma vez que seus teores podem ser modificados conforme é solicitado na central de concreto.

Encontra-se neste capítulo também a validação do procedimento de dosagem de Porto (2020) divididos em três etapas, e por fim, a verificação da resistência à compressão dos concretos estudados.

4.1 ESTUDO EM PASTA – ETAPA 1

Verificou-se a atuação do aditivo superplastificante sobre a mistura ao produzir pastas com diferentes teores de aditivos com o objetivo de definir o ponto de saturação dos aditivos. Dessa forma, o consumo de materiais pode ser visualizado na Tabela 21, onde o volume final foi de 1,8 L. O termo “pasta” acompanha um número (que significa o valor ordinal de pasta realizada) seguida de um decimal (que diz a porcentagem de aditivo adicionada em relação à massa de cimento).

Tabela 21 - Pastas cimentícias e seus respectivos consumos

	Amostra	CP (g)	Água (mL)	SP (mL)
Aditivo 1 (à base de policarboxilato)	Pasta1_0,2	1422	568,8	2,84
	Pasta2_0,4	1422	568,8	5,69
	Pasta3_0,6	1422	568,8	8,53
	Pasta4_0,8	1422	568,8	11,38
	Pasta5_1,0	1422	568,8	14,22
Aditivo 2 (à base de policarboxilato + nanopartículas de sílica)	Pasta6_0,7	1422	568,8	9,95
	Pasta7_1,0	1422	568,8	14,22
	Pasta8_1,3	1422	568,8	18,49
	Pasta9_1,6	1422	568,8	22,75
Aditivo 3 (à base de policarboxilato + nanopartículas de sílica)	Pasta10_0,7	1422	568,8	9,95
	Pasta11_1,0	1422	568,8	14,22
	Pasta12_1,3	1422	568,8	18,49
	Pasta13_1,6	1422	568,8	22,75

*Continua

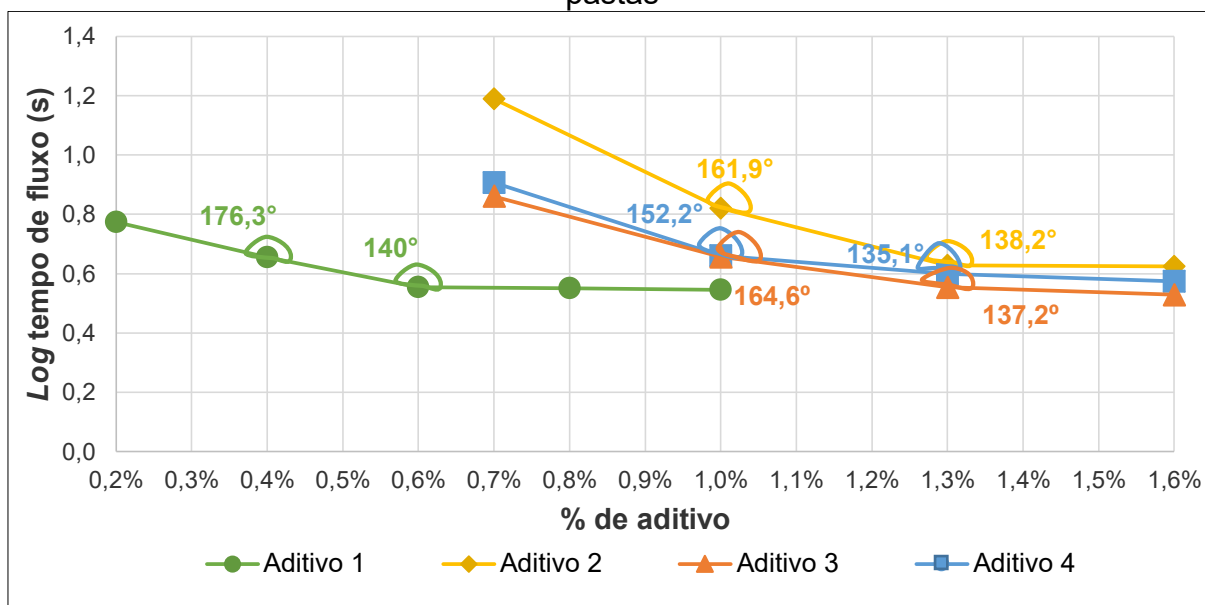
Tabela 22 – Pastas cimentícias e seus respectivos consumos

*Continuação

Aditivo 4 (à base de policarboxilato + nanopartículas de sílica)	Pasta14_0,7	1422	568,8	9,95
	Pasta15_1,0	1422	568,8	14,22
	Pasta16_1,3	1422	568,8	18,49
	Pasta17_1,6	1422	568,8	22,75

Fonte: O autor.

Após a realização das pastas, foram medidos os tempos de fluxo. Na Figura 34 é possível visualizar o gráfico da função logarítmica do tempo de fluxo em função do teor de aditivo superplastificante incorporado nas pastas.

Figura 34 - Relação de log do tempo de escoamento pelo teor de aditivo SP das pastas

Fonte: O autor.

Constatou-se que o Aditivo 1 foi o único com ponto de saturação distante dos outros três, sendo ele inferior e o que pode gerar um material final mais econômico dentre os aditivos existentes. As curvas dos Aditivos 2, 3 e 4 tiveram a mesma tendência de comportamento, com porcentagens de adição de aditivo muito semelhantes, comportamento verificado por diversos autores ao estudar ponto de saturação em pastas cimentícias (AGULLÓ et al., 1999; CALMON et al., 2013; CAMÕES, 2005; GOMES, GETU E AGULLÓ, 2003; MONTEIRO, PITANGUEIRA E WOLENSKI, 2012; PIOVEZAM, MELEIRO e IZA, 2008; SILVA, GOMES e MORAIS, 2019).

Em se tratando da determinação do ponto de saturação das pastas produzidas, na Tabela 22 é possível visualizar os ângulos internos das curvas da Figura 34 segundo o método de Gomes, Gettu e Agulló (2003).

Tabela 22 - Ângulos internos das curvas de tempo de fluidez para determinação do ponto de saturação dos aditivos superplastificantes

	Pastas	Ângulo (°)
Aditivo 1 (à base de policarboxilato)	Pasta2_0,4	176,3
	Pasta3_0,6	140,0
Aditivo 2 (à base de policarboxilato + nanopartículas de sílica)	Pasta7_1,0	161,9
	Pasta8_1,3	138,2
Aditivo 3 (à base de policarboxilato + nanopartículas de sílica)	Pasta11_1,0	152,2
	Pasta12_1,3	135,1
Aditivo 4 (à base de policarboxilato + nanopartículas de sílica)	Pasta15_1,0	164,6
	Pasta16_1,3	137,2

Fonte: O autor.

A utilização de 0,3% de aditivo sobre a massa de cimento está abaixo do limite proposto por Gomes, Gettu, Agulló (2003) enquanto que a utilização de 0,6% é a porcentagem limite inferior citada pelos autores. Portanto, para o Aditivo 1, a porcentagem de 0,6% de aditivo foi a adotada, se enquadrando nas demarcações bibliográficas. Para os Aditivos 2, 3 e 4 o ponto de saturação adotado girou em torno dos 1,3% de aditivo.

Foi possível, então, observar que os resultados de tempo de escoamento apresentaram tendências semelhantes quando sendo do mesmo fabricante, indicando que, assim como ocorre nos ensaios em concretos autoadensáveis no Funil V, a medida do tempo de escoamento em fluxo confinado tem relação com a viscosidade do material. Na próxima seção, apresenta-se o estudo em argamassa produzidas com base no teor de aditivo SP obtido nessa etapa.

4.1.1 Considerações parciais das pastas

Com relação ao estudo em pasta, foi possível notar os pontos de saturação dos aditivos químicos para posterior estudo em argamassa. Por mais que se encontre um PS ideal nesta etapa, tomou-se esse valor como referência, para que em posterior produção de argamassas, observasse de fato a ação que aquele teor teria nos materiais cimentícios, sendo necessário, na grande maioria, reduzir a porcentagem quando comparada ao PS.

4.2 ESTUDO EM ARGAMASSA – ETAPA 2

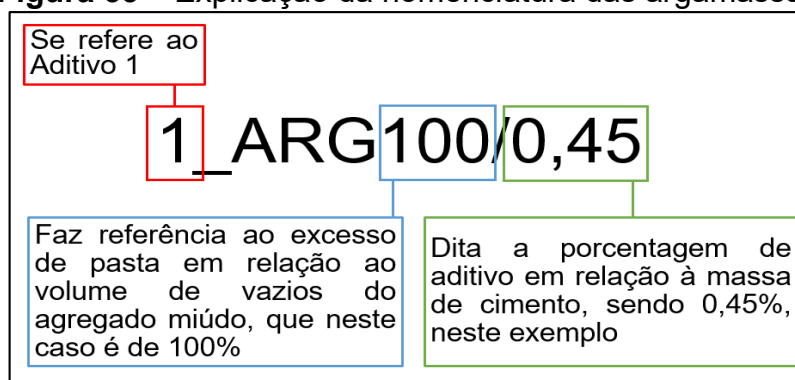
Utilizando-se da sequência proposta de dosagem apresentada no item 3.4.1.2 foi realizada a produção das argamassas com diferentes EX_{pasta} em relação ao volume de vazios do agregado miúdo e teores de aditivos SP, com o intuito de analisar o melhor cenário de estudo a ser levado à Etapa 3 - concreto e realizar, posteriormente, a transferência de tecnologia.

Os cálculos de dosagem encontram-se no Apêndice A, que especifica para diferentes EX_{pasta} e teores de aditivos, o procedimento adotado para realização dos traços estudados nesta etapa.

As argamassas foram produzidas com relação água/cimentícios de 0,40, teor de aditivo superplastificante de variando sobre a massa de cimento.

Na Tabela 23 é possível visualizar o consumo de materiais por m^3 de todas as argamassas produzidas e a Figura 35 explica a nomenclatura das mesmas.

Figura 35 – Explicação da nomenclatura das argamassas



Fonte: O autor.

Tabela 23 - Consumo de materiais por m^3 de argamassa

	Amostra	EX_{pasta} (%)	Teor aditivo (%)	$\frac{V_{AM}}{V_{ARG}}$	CP (kg)	AM (Kg)	Água (L)	SP (L)
Aditivo 1	1_ARG100/0,45	100%	0,45	41%	801,2	1078,4	320,5	3,60
	1_ARG100/0,30	100%	0,30	41%	801,2	1078,4	320,5	2,40
	1_ARG100/0,20	100%	0,20	41%	801,2	1078,4	320,5	1,60
	1_ARG100/0,15	100%	0,15	41%	801,2	1078,4	320,5	1,20
	1_ARG90/0,30	90%	0,30	42%	784,29	1111,2	313,72	2,35
	1_ARG90/0,25	90%	0,25	42%	784,29	1111,2	313,72	1,96
	1_ARG90/0,20	90%	0,20	42%	784,29	1111,2	313,72	1,57
	1_ARG90/0,15	90%	0,15	42%	784,29	1111,2	313,72	1,18
	1_ARG80/0,30	80%	0,30	43,5%	766,33	1146,1	306,53	2,30

*Continua

Tabela 23 – Consumo de materiais por m³ de argamassa

*Continuação

	Amostra	EX_{pasta} (%)	Teor aditivo (%)	$\frac{V_{AM}}{V_{ARG}}$	CP (kg)	AM (Kg)	Água (L)	SP (L)
Aditivo 1	1_ARG80/0,20	80%	0,20	43,5%	766,33	1146,1	306,53	1,53
	1_ARG80/0,15	80%	0,15	43,5%	766,33	1146,1	306,53	1,15
	1_ARG80/0,10	80%	0,10	43,5%	766,33	1146,1	306,53	0,76
Aditivo 2	2_ARG100/1,20	100%	1,20	41%	801,2	1078,4	320,5	9,61
	2_ARG100/1,10	100%	1,10	41%	801,2	1078,4	320,5	8,81
	2_ARG100/1,00	100%	1,00	41%	801,2	1078,4	320,5	8,01
	2_ARG90/1,20	90%	1,20	42%	784,29	1111,2	313,72	9,41
	2_ARG90/1,10	90%	1,10	42%	784,29	1111,2	313,72	8,63
	2_ARG90/1,00	90%	1,00	42%	784,29	1111,2	313,72	7,84
	2_ARG80/1,20	80%	1,20	43,5%	766,33	1146,1	306,53	9,20
	2_ARG80/1,10	80%	1,10	43,5%	766,33	1146,1	306,53	8,43
	2_ARG80/1,00	80%	1,00	43,5%	766,33	1146,1	306,53	7,66
Aditivo 3	3_ARG100/1,20	100%	1,20	41%	801,2	1078,4	320,5	9,61
	3_ARG100/1,00	100%	1,00	41%	801,2	1078,4	320,5	8,01
	3_ARG100/0,80	100%	0,80	41%	801,2	1078,4	320,5	6,41
	3_ARG100/0,70	100%	0,70	41%	801,2	1078,4	320,5	5,61
	3_ARG100/0,60	100%	0,60	41%	801,2	1078,4	320,5	4,81
	3_ARG90/0,90	90%	0,90	42%	784,29	1111,2	313,72	7,06
	3_ARG90/0,80	90%	0,80	42%	784,29	1111,2	313,72	6,27
	3_ARG90/0,70	90%	0,70	42%	784,29	1111,2	313,72	5,49
	3_ARG80/1,00	80%	1,00	43,5%	766,33	1146,1	306,53	7,66
	3_ARG80/0,90	80%	0,90	43,5%	766,33	1146,1	306,53	6,90
	3_ARG80/0,80	80%	0,80	43,5%	766,33	1146,1	306,53	6,13
Aditivo 4	4_ARG100/0,90	100%	0,90	41%	801,2	1078,4	320,5	7,21
	4_ARG100/0,80	100%	0,80	41%	801,2	1078,4	320,5	6,41
	4_ARG100/0,70	100%	0,70	41%	801,2	1078,4	320,5	5,61
	4_ARG90/0,90	90%	0,90	42%	784,29	1111,2	313,72	7,06
	4_ARG90/0,80	90%	0,80	42%	784,29	1111,2	313,72	6,27
	4_ARG90/0,70	90%	0,70	42%	784,29	1111,2	313,72	5,49
	4_ARG80/1,00	80%	1,00	43,50%	766,33	1146,1	306,53	7,66
	4_ARG80/0,90	80%	0,90	43,50%	766,33	1146,1	306,53	6,90
	4_ARG80/0,80	80%	0,80	43,50%	766,33	1146,1	306,53	6,13

Fonte: O autor.

Teores inferiores aos encontrados para ponto de saturação dos aditivos foram utilizados, uma vez que para cada aditivo foi testado o seu PS e feito reduções para que se começasse a encontrar resultados satisfatórios para

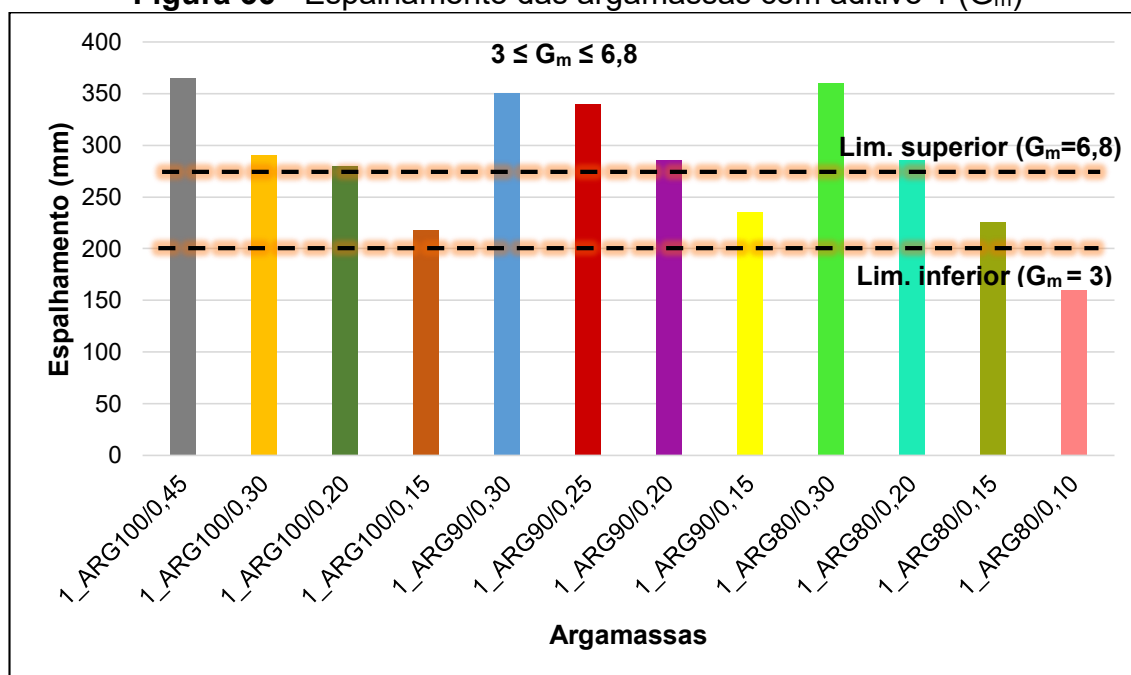
autoadensabilidade de argamassas. Isso se justifica, como Melo e Morcelli (2017) mencionam, em virtude do ponto de saturação ser o teor máximo de aditivo capaz de promover aumento da fluidez, servindo como base para produção de argamassas, uma vez que teores inferiores ao PS podem ser utilizados para atingir propriedades desejadas. Tal diminuição de porcentagem do aditivo foi necessária, às vezes, em virtude de ser feita a produção de uma determinada argamassa com adição do aditivo com a quantidade encontrada no ensaio do PS e ela acabou superando os limites de abertura no espalhamento. Então, esta propriedade serviu como uma base pra um pressuposto inicial de adição, onde o mesmo era testado e caso a argamassa espalhasse mais que o limite, era reduzida a porcentagem do aditivo para que se encontrasse um espalhamento considerado pertinente às propriedades autoadensáveis da argamassa. Por isso, a tabela menciona teores inferiores aos obtidos no PS, que serviu como uma partida inicial de teores a serem utilizados.

4.2.1 Avaliação da autoadensabilidade

As argamassas foram inicialmente avaliadas de acordo com o espalhamento pelo tronco de cone e o tempo de fluxo pelo Funil V, ambos ensaios realizados no estado fresco. A seguir, serão apresentados os resultados das argamassas estudadas com os quatro aditivos.

4.2.1.1 Aditivo 1

Um total de 12 (doze) argamassas foram produzidas com o Aditivo 1. Os resultados pertinentes ao espalhamento das mesmas feitas com este aditivo estão apresentados na Figura 36.

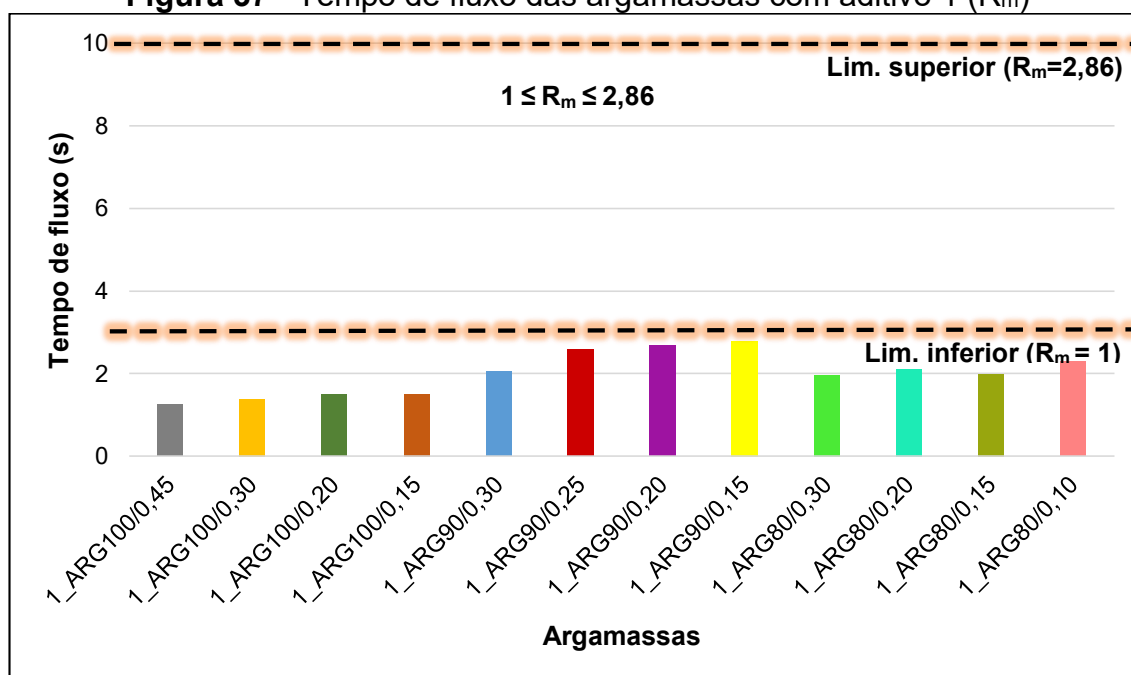
Figura 36 - Espalhamento das argamassas com aditivo 1 (G_m)

Fonte: O autor.

Pode-se observar na Figura 36 que somente 3 argamassas apresentaram espalhamento dentro do proposto por Melo (2005), onde diz que $3 \leq G_m \leq 6,8$. A argamassa 1_ARG100/0,15 apresentou espalhamento de 217,5 mm obtendo um $G_m = 3,73$; a 1_ARG90/0,15 obteve espalhamento foi igual a 235 mm e seu $G_m = 4,52$; e por fim a 1_ARG80/0,15 que apresentou um espalhamento de 225mm e G_m igual a 4,06. As demais argamassas não citadas, obtiveram resultados inferiores ou superiores aos limites propostos. Isso significa que não se atingiu um espalhamento ideal para caracterizá-las, segundo tal parâmetro, como autoadensável.

Estes resultados são indicativos de que, somente 3 argamassas apresentaram fluidez pertinentes à caracterização de autoadensável, para espalhamento. São elas que vão servir de base para a produção do concreto, uma vez que são responsáveis por definir a coesão da mistura ao unir os agregados graúdos (KHOTBEHSARA et al., 2015).

A Figura 37, apresenta os resultados dos tempos de fluxo das argamassas produzidas com o Aditivo 1.

Figura 37 - Tempo de fluxo das argamassas com aditivo 1 (R_m)

Fonte: O autor.

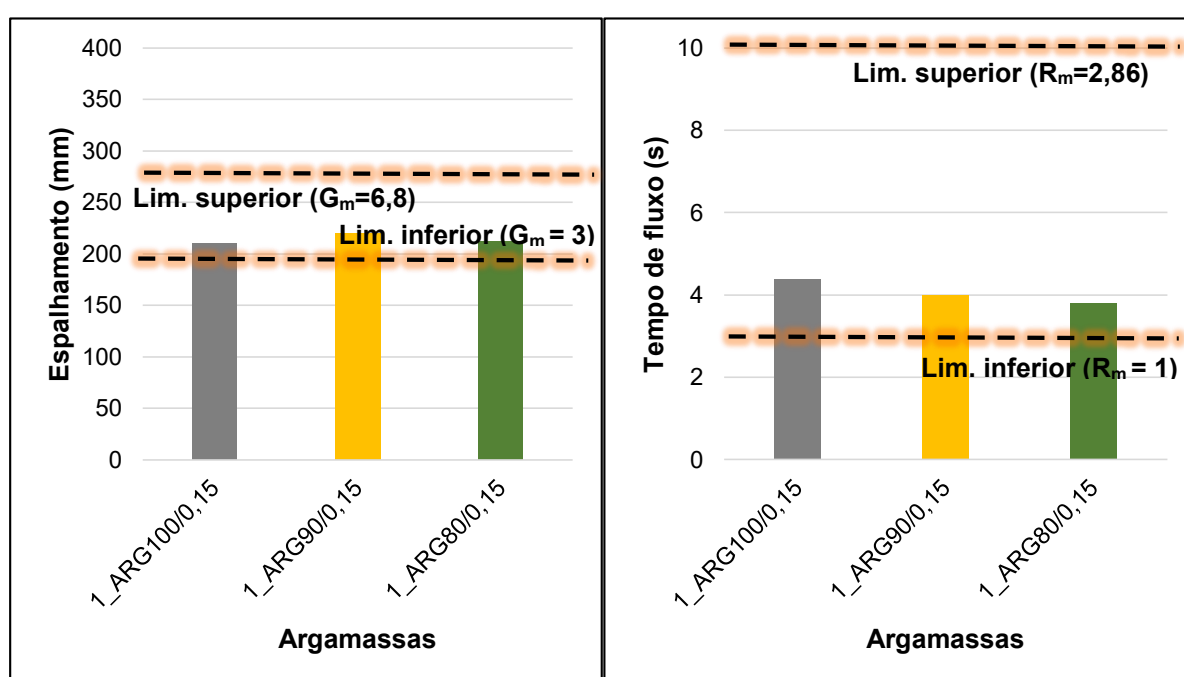
Observa-se na Figura 37 que nenhuma argamassa produzida com o aditivo 1 atingiu valores relativos ao tempo de fluxo que se enquadrasse dentro dos limites propostos para tempo de escoamento relativo. Isto indica a falta de viscosidade da mistura, que conforme menciona Cruz (2021), a existência de uma maior quantidade de finos inertes conferem uma maior viscosidade às argamassas. Isso pode ser atingido com a alteração no tipo de cimento ou com a adição/substituição de uma adição mineral, uma vez que assim os vazios se preenchem de forma mais significativa, causando uma melhor fluidez da argamassa autoadensável (TOILLIER, 2017).

Para as argamassas que obtiveram espalhamento pertinente aos limites para caracterizá-las como autoadensáveis (1_ARG100/0,15 | 1_ARG90/0,15 | 1_ARG80/0,15), o procedimento expedito foi realizado e aprovado para todas, onde nenhuma destas apresentou sinais de segregação ou exsudação. Para as mesmas, discutiu-se ainda acerca do incremento de alguma adição mineral (AM) cuja presença contribui para o aumento da viscosidade e, em segundo plano, para o aumento da fluidez.

Desta forma, foram realizados ensaios com adição de pó de basalto, ofertado pela concreteira em estudo, com intuito de corrigir a viscosidade da argamassa e possibilitar então um adequação quando ao tempo de escoamento. Para

tanto, as argamassas foram refeitas, com adição mineral nas porcentagens de 4, 5, 6, 7 e 8% em relação à massa de cimento para análises acerca do seu espalhamento e tempo de escoamento. Foram analisadas a 1_ARG100/0,15 | 1_ARG90/0,15 | 1_ARG80/0,15 e os resultados apontaram para uma adição ideal de 7% de pó de basalto. Dados quanto ao novo espalhamento e tempo de escoamento se encontram na Figura 38.

Figura 38 – Espalhamento (G_m) e tempo de fluxo (R_m) das argamassas com aditivo 1 e pó de basalto, em adição à massa de cimento de 7%



Fonte: O autor.

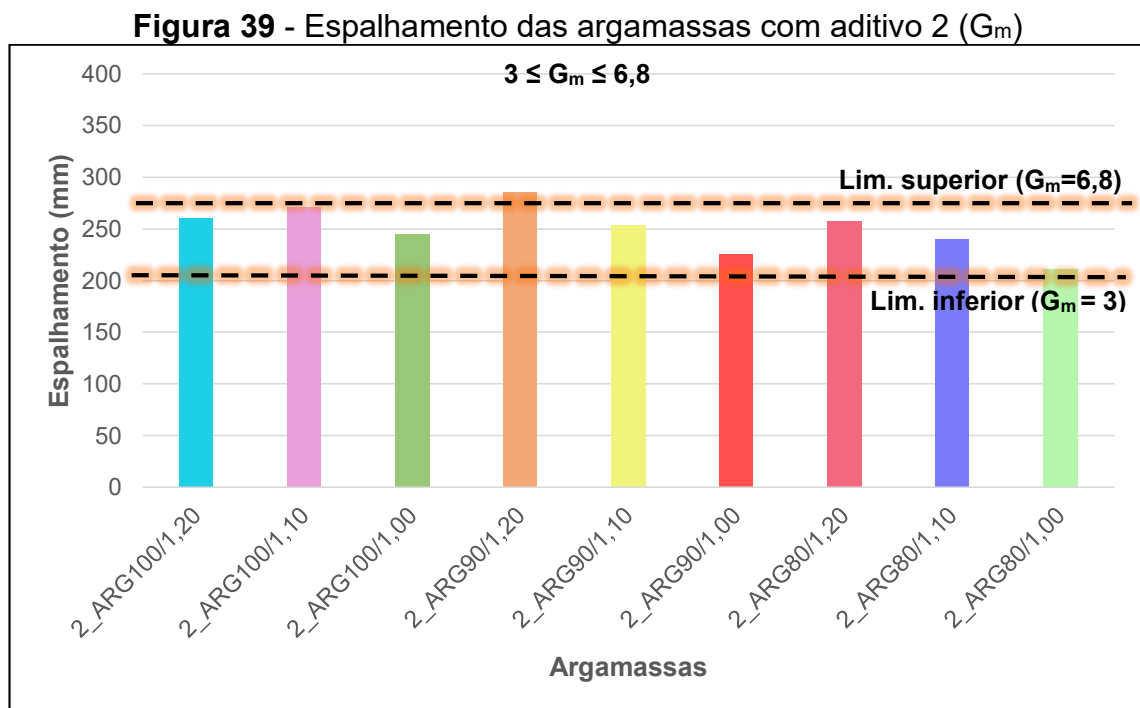
Conforme é possível observar, as argamassas tiveram modificação de viscosidade, alterando levemente o espalhamento quando comparado à produção sem a utilização de adição mineral, estando ainda dentro dos limites de autoadensabilidade segundo Melo (2005). O tempo de fluxo aumentou, de acordo com a elevação da característica de viscosidade, fator evidenciado com o incremento do pó de basalto e tal alteração é justificada por Cruz (2021) como mencionado na revisão.

Obtendo o requisito de viscosidade maior que a existente, através de adições com maior superfície específica, melhora-se a distribuição granulométrica dos sólidos da mistura, obtendo um maior controle no tempo de escoamento para o ensaio

do Funil-V (MORAES, 2010).

4.2.1.2 Aditivo 2

Um total de 9 (nove) argamassas foram produzidas pelo aditivo 2. Os resultados pertinentes ao espalhamento das mesmas feitas com este aditivo estão apresentados na Figura 39.

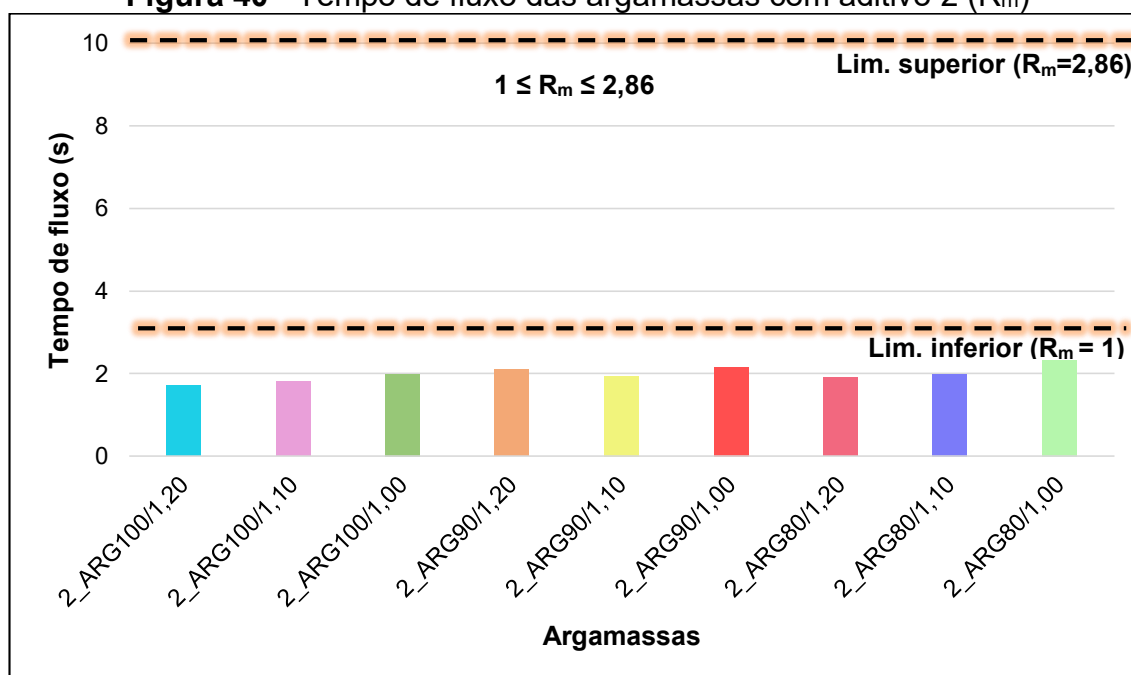


Fonte: O autor.

Observa-se na Figura 39 que somente a 2_ARG90/1,20 não apresentou espalhamento dentro da faixa limite para caracterizá-la como autoadensável, segundo o limite proposto por Melo (2005). Isso indica que ela apresentou fluidez superior à desejada, podendo estar relacionada ao teor de aditivo utilizado.

Quanto ao procedimento expedito, todas apresentaram comportamento ideal, não apresentando sinais de segregação nem exsudação.

Na Figura 40, estão apresentados os resultados dos tempos de fluxo das argamassas produzidas com o aditivo 2.

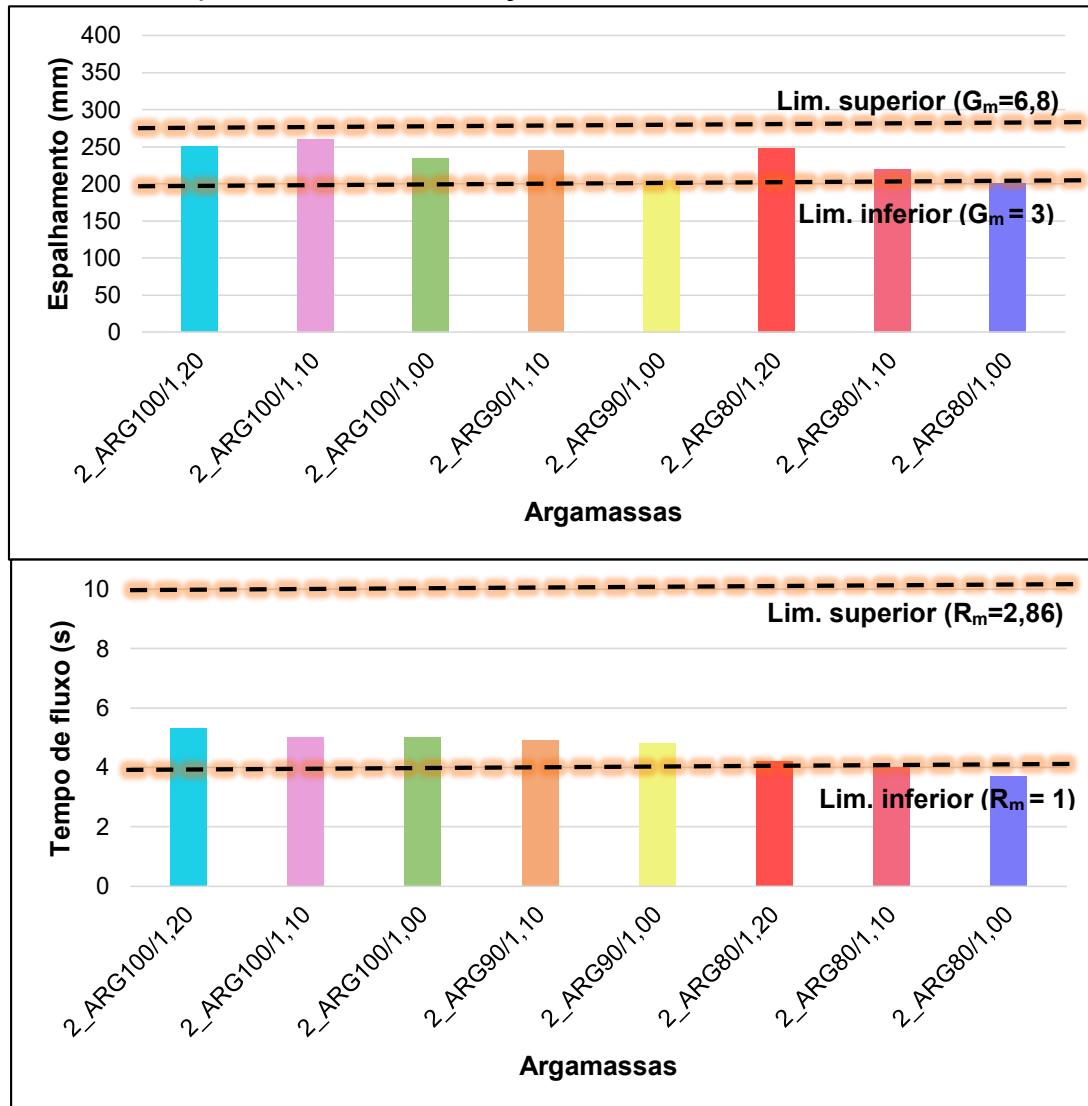
Figura 40 - Tempo de fluxo das argamassas com aditivo 2 (R_m)

Fonte: O autor.

O comportamento das argamassas produzidas com o aditivo 2 quanto ao tempo de fluxo apresentou um fluxo muito rápido de escoamento, mesmo obtendo um bom desempenho nos ensaios de espalhamento. Uma proposta de solução, foi de, assim como mencionada para o primeiro aditivo de estudo, a utilização de adições, já que estes tem a característica de adsorver grande quantidade de água, quando comparadas com o cimento, o que irá reduzir a água livre da mistura, promovendo desta forma o aumento da viscosidade e da estabilidade (KHAYAT et al., 2004).

Assim como no primeiro aditivo, foi feito um ajuste no espalhamento e tempo de escoamento destas argamassas com a adição do pó de basalto. Foram testadas algumas adições, partindo de 7% (parâmetro que forneceram dados pertinentes à autoadensabilidade para argamassas feitas com o aditivo 1) até 16%, porcentagem que resultou em valores dentro do limite proposto por Melo (2005). A Figura 41 apresenta estes resultados, com novos espalhamentos e tempo de escoamento corrigido. Todas elas se enquadraram dentro dos limites explicando-se mais uma vez o poder da adição em relação à viscosidade da argamassa autoadensável, proposto por Cruz (2021).

Figura 41 - Espalhamento (G_m) e tempo de fluxo (R_m) das argamassas com aditivo 2 e pó de basalto, em adição à massa de cimento de 16%



Fonte: O autor.

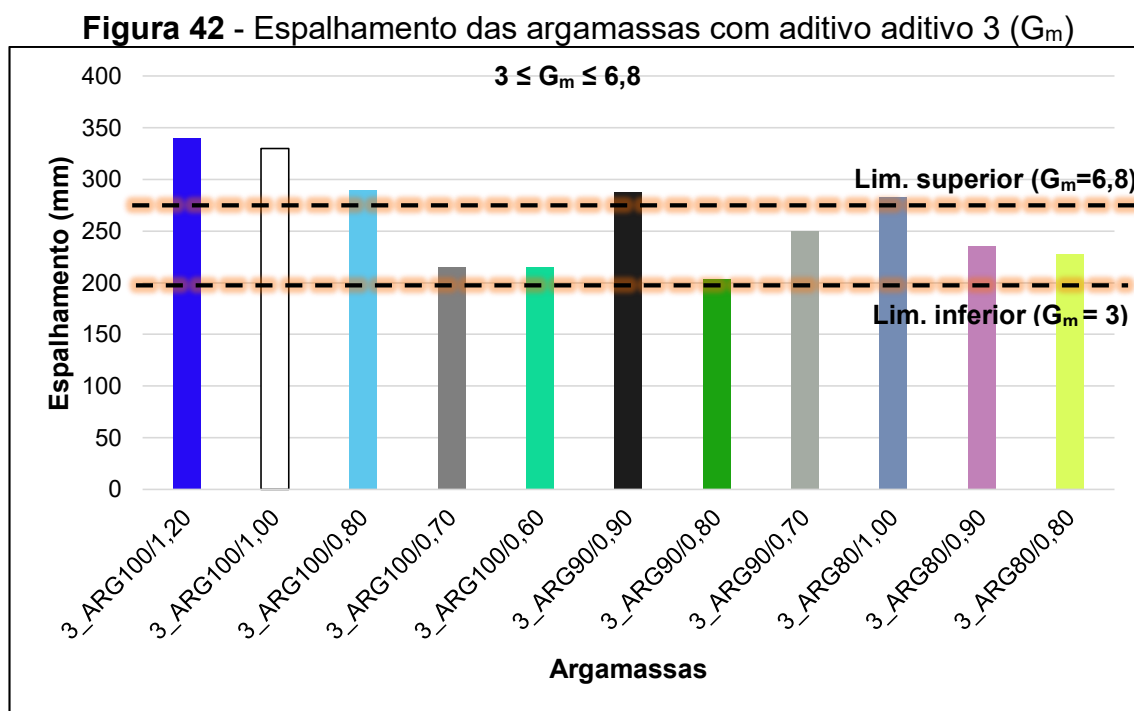
Cabe ressaltar, que por mais que as argamassas perderam, mais uma vez, alguns centímetros de espalhamento, ainda estiveram dentro dos limites propostos por Melo (2005), com exceção da 2_ARG80/1,00, e todas elas, para tempo relativo de escoamento, se enquadraram como autoadensáveis pelo aumento da viscosidade.

4.2.1.3 Aditivo 3

Foram produzidas 11 (onze) argamassas com este aditivo, como já mencionado na Tabela 23 com os diferentes excessos de pasta e teores de aditivos e

os feitos os ensaios de caracterização para verificar a obtenção de resultados satisfatórios ou não quanto à autoadensabilidade.

Podem-se observar os resultados quanto ao espalhamento da argamassa realizada com este aditivo na Figura 42.



Através da Figura 42, verifica-se que as argamassas 3_ARG100/0,70, 3_ARG100/0,6, 3_ARG90/0,80, 3_ARG90/0,70, 3_ARG80/0,90 e 3_ARG80/0,80 apresentaram espalhamento dentro dos limites impostos por Melo (2005) e podem, somente segundo este parâmetro, serem caracterizadas como autoadensáveis.

Quanto ao procedimento expedido, todas as argamassas produzidas apresentaram comportamento satisfatório, sem a presença de segregação e/ou exsudação, com exceção da 3_ARG100/0,6, que como mostra a Figura 43, ao ser passada a espátula fazendo um risco no centro do material, o mesmo não retorna à posição inicial, sendo portanto desconsiderada do estudo (PORTO *et al.*, 2019).

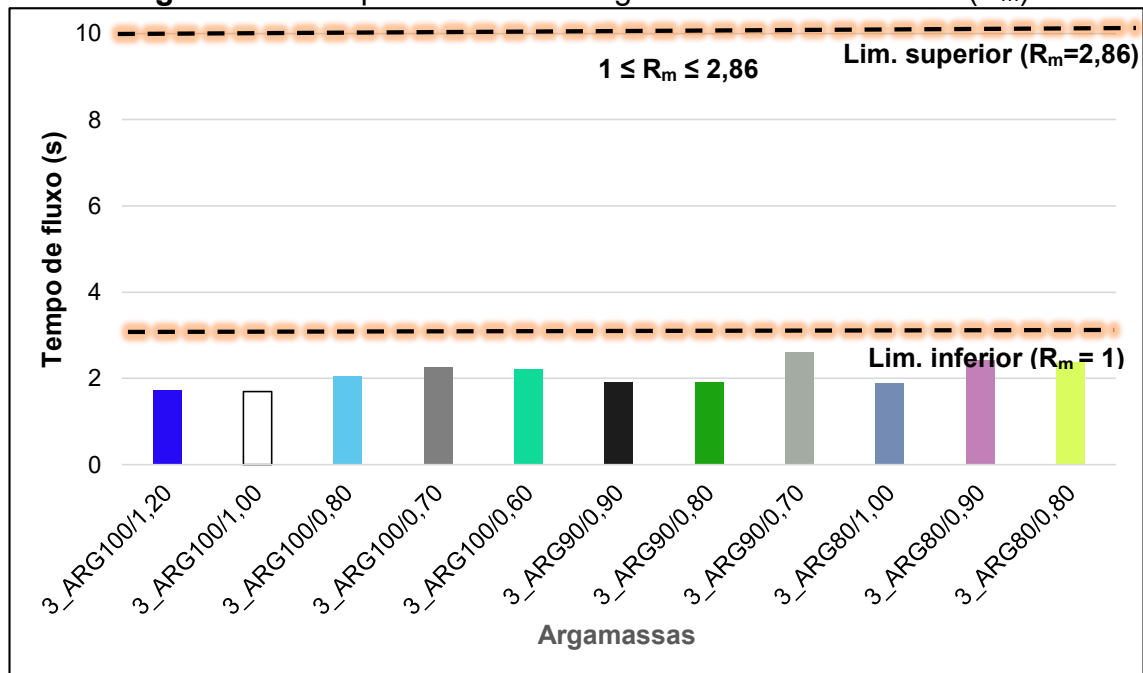
Figura 43 - T_{risco} na argamassa 3_ARG100/0,6



Fonte: O autor.

Apresentam-se na Figura 44, os resultados referentes ao tempo de fluxo da argamassa realizada com o aditivo 3.

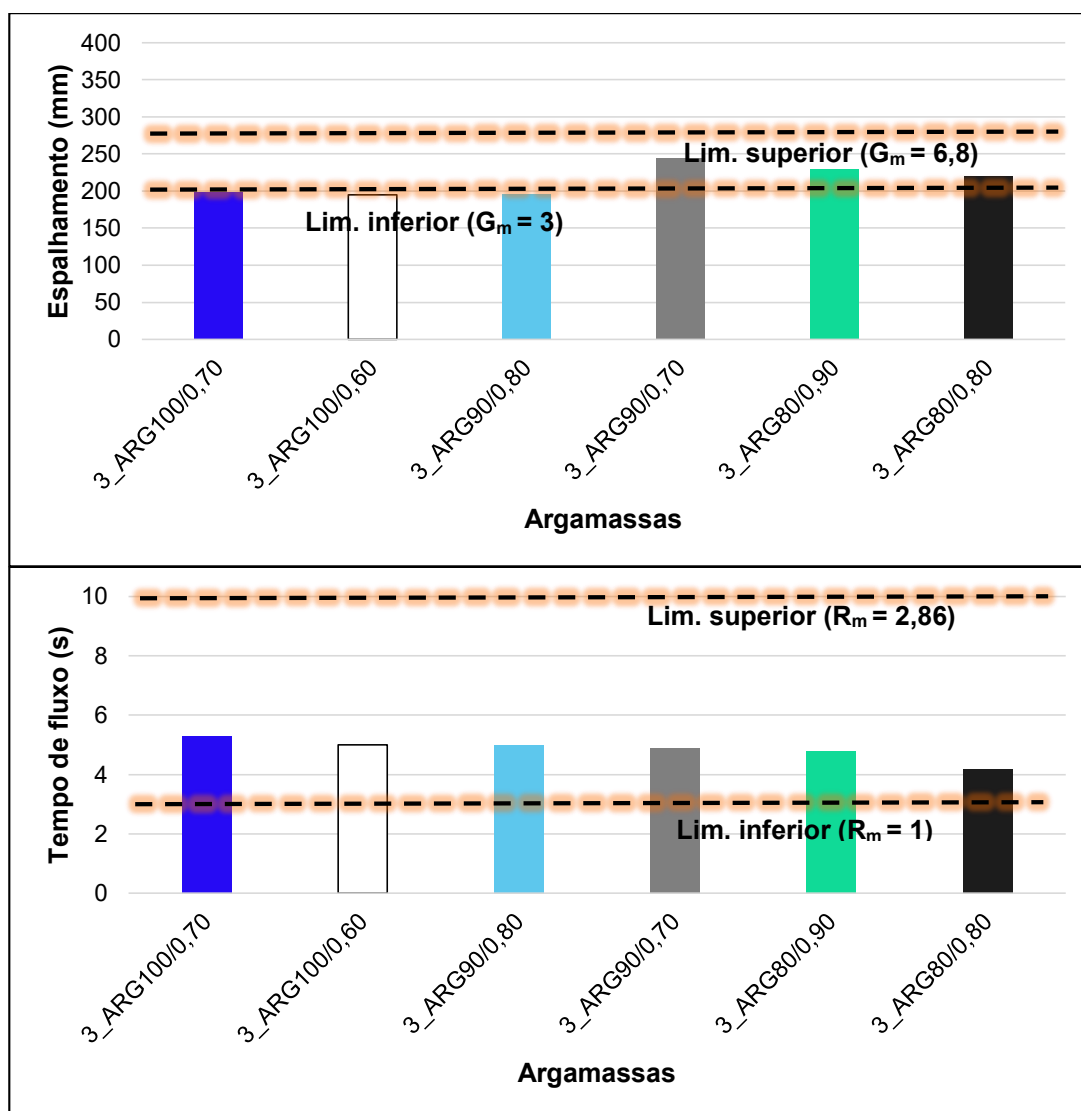
Figura 44 - Tempo de fluxo das argamassas com aditivo 3 (R_m)



Fonte: O autor.

Mais uma vez, o tempo de escoamento relativo para todas as argamassas produzidas são inferiores ao limite inicial para caracterização autoadensável. Assim como para as outras, o pó de basalto entra como um material cujo objetivo é conferir viscosidade à mistura. Os resultados quanto esta alteração se encontram na Figura 45 e a adição também foi de 16% em relação à massa de cimento.

Figura 45 - Espalhamento (G_m) e tempo de fluxo (R_m) das argamassas com aditivo 3 e adição mineral de 16% em relação à massa de cimento



Fonte: O autor.

A Figura 45 mostra que das argamassas que anteriormente possuíam espalhamento ideal quanto à autoadensabilidade na etapa sem a utilização de adição, aqui com tal incremento, somente a 3_ARG90/0,70; 3_ARG80/0,90 e 3_ARG80/0,80 obtiveram espalhamento dentro dos limites propostos para Melo (2005). Quanto ao tempo relativo de escoamento, todas apresentaram tempos de fluxo dentro dos parâmetros. Contudo, para efeito de análises para o tempo de manutenção do aditivo e estudo em concreto, considerou-se a 3_ARG90/0,70; 3_ARG80/0,90 e 3_ARG80/0,80 que respeitam simultaneamente os parâmetros de G_m e R_m .

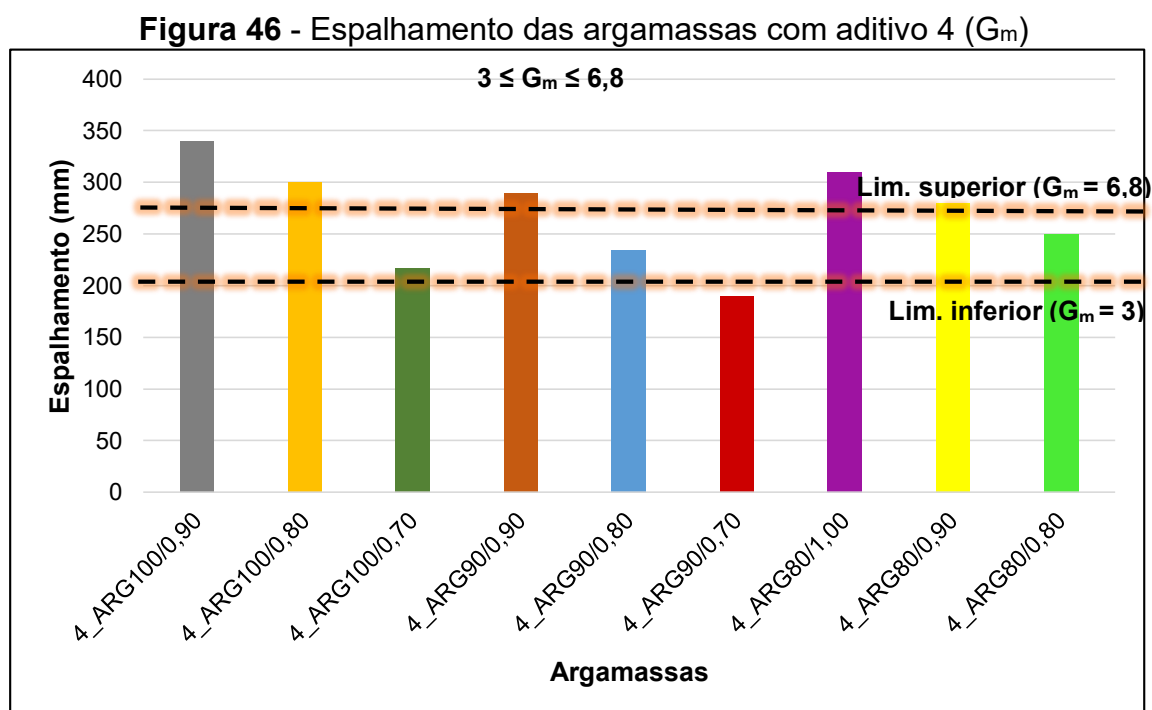
Infere-se sobre este aditivo, que o incremento da adição mineral, ao conferir viscosidade e corrigir o tempo de fluxo das argamassas, acaba por espalhar

menos, quando submetidas ao ensaio de área relativa de espalhamento, já que ao unir melhor os componentes da mistura, um retardo no tempo de escoamento acontece. Isso é verificado nas argamassas 3_ARG100/0,70; 3_ARG100/0,60 e 3_ARG90/0,80, que quando sem a adição mineral, tiveram espalhamentos superiores aos limites de Melo (2005) e na sua presença, ao corrigir a viscosidade, apresentou G_m inferior ao proposto. Pode-se dizer, que a modificação no tipo de cimento com maior blaine, ajustaria tanto G_m quanto R_m .

4.2.1.4 Aditivo 4

Foram produzidas 9 (nove) argamassas com este aditivo, como já foi mencionado na Tabela 24 com os diferentes excessos de pasta e teores de aditivos e os feitos os ensaios de caracterização para verificar a obtenção de resultados satisfatórios ou não quanto à autoadensabilidade.

Pode-se observar os resultados quanto ao espalhamento da argamassa realizada com este aditivo na Figura 46.



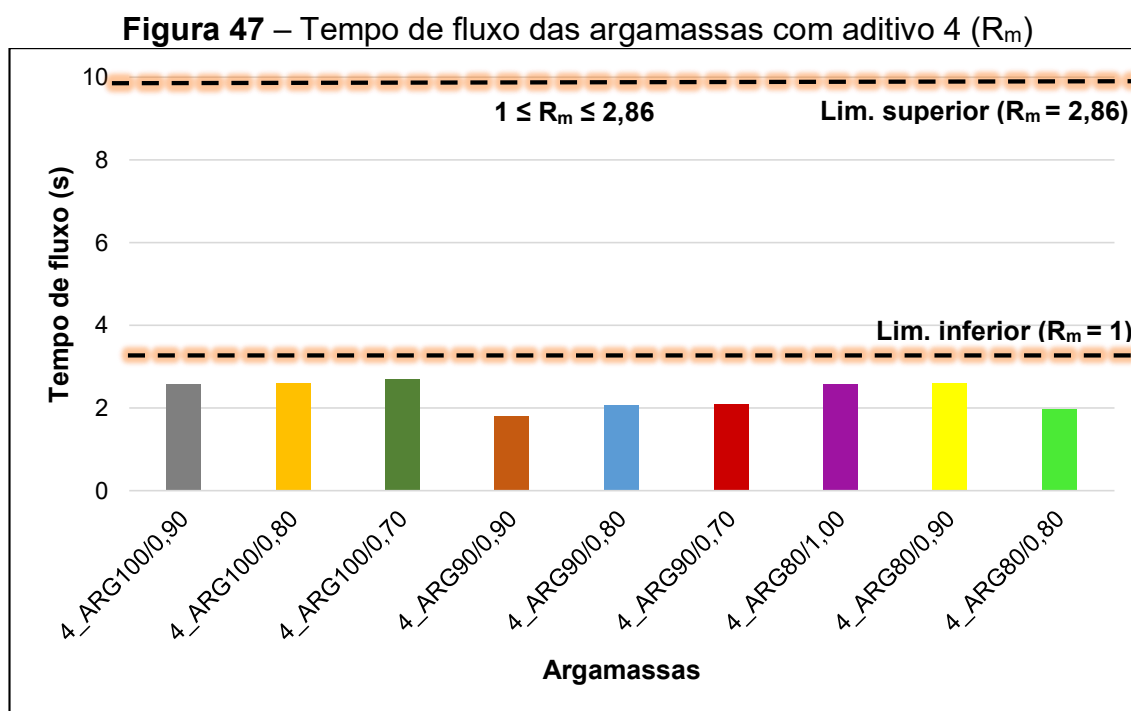
Fonte: O autor.

Através da Figura 46, verifica-se que as argamassas 4_ARG100/0,70; 4_ARG90/0,80 e 4_ARG80/0,80 apresentaram espalhamento dentro dos limites

impostos por Melo (2005) e podem, somente segundo este parâmetro, serem caracterizadas como autoadensáveis.

Quanto ao procedimento expedido, a 4_ARG100/0,70 não retornou de forma perfeita para o formato original ao ser riscada com a espátula. Portanto para estudo em concreto, a 4_ARG90/0,80 e 4_ARG80/0,80 são consideradas.

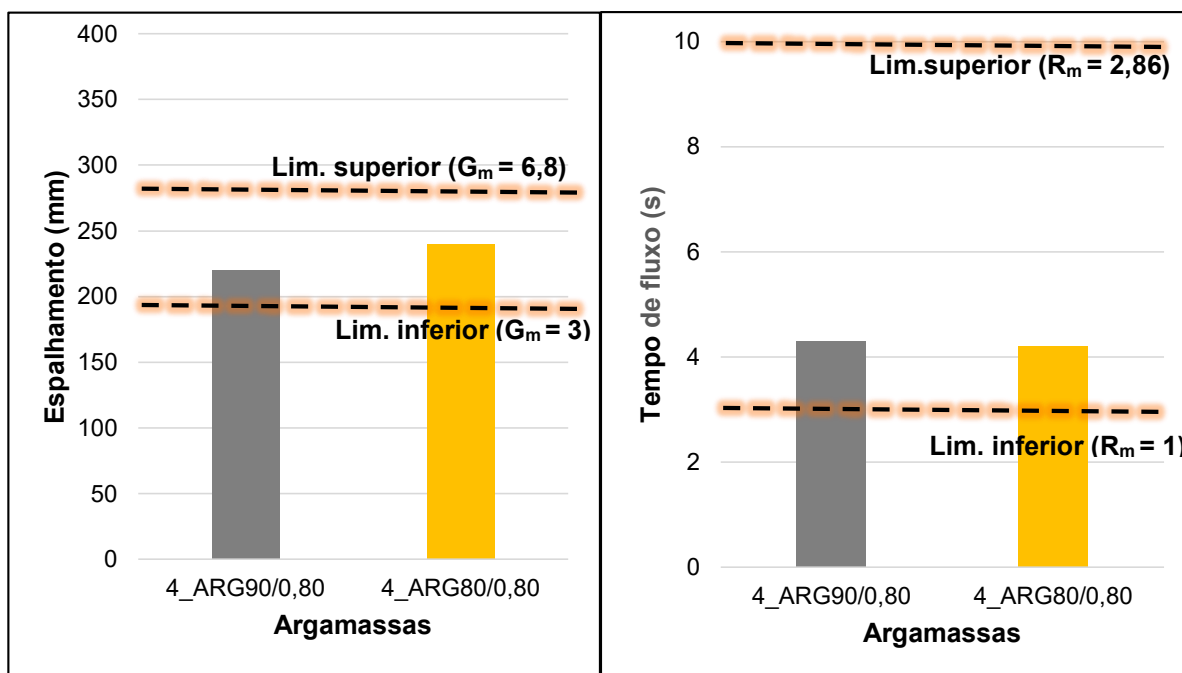
Apresentam-se na Figura 47, os resultados referentes ao tempo de fluxo da argamassa realizada com o aditivo 4.



Fonte: O autor.

Assume-se para o aditivo 4 que o tempo de escoamento relativo para todas as argamassas produzidas se encontram inferior ao limite proposto por Melo (2005), assim como para os outros aditivos. Isso indica, mais uma vez, que falta viscosidade na mistura, o pode ser alcançada com uma adição mineral. Por ser um aditivo de mesma base química do 2 e 3 e ainda fornecido pelo mesmo fabricante, foi testada tal adição na mesma porcentagem de 16% e os resultados quanto ao novo espalhamento e tempo de fluxo corrigidos com o pó de basalto se encontram na Figura 48.

Figura 48 - Espalhamento (G_m) e tempo de fluxo (R_m) das argamassas com aditivo 4 e pó de basalto, em adição de 16% em relação à massa de cimento



Fonte: O autor.

Percebe-se pela Figura 48 que o espalhamento das argamassas é um pouco menor quando comparado com àquele quando não tem adição, justamente devido ao aumento de viscosidade da mistura, que corrige o tempo de fluxo das duas argamassas, estando dentro dos limites propostos por Melo (2005).

4.2.2 Tempo de manutenção dos aditivos químicos nas argamassas

O tempo de manutenção dos aditivos químicos foi um parâmetro analisado para as argamassas que possuíssem valores de G_m e R_m dentro dos limites autoadensáveis. Tais argamassas estão listadas na Tabela 24 com suas respectivas áreas relativas de espalhamento.

Tabela 24 - Argamassas com o tempo de ação dos aditivos analisado

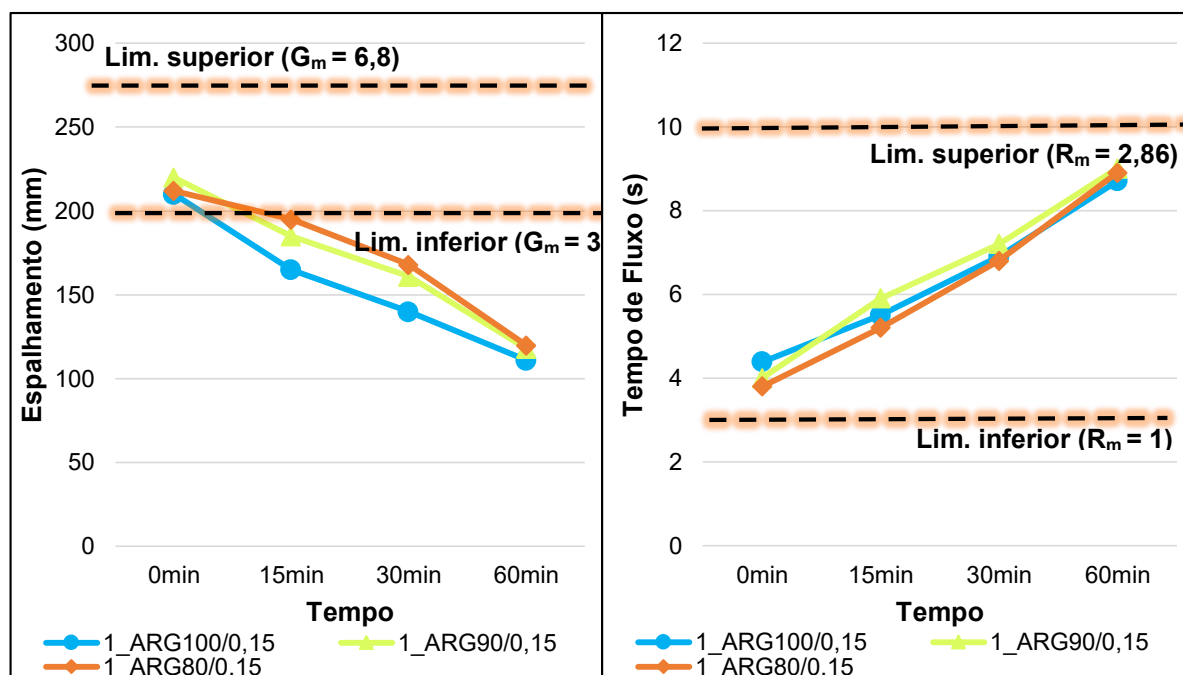
	Nº de argamassas	Argamassa	G _m	R _m	Limite proposto (Melo, 2005)
Aditivo 1	1	1_ARG100/0,15	3,41	2,27	
	2	1_ARG90/0,15	3,84	2,50	
	3	1_ARG80/0,15	3,49	2,63	
Aditivo 2	4	2_ARG100/1,20	5,25	1,89	
	5	2_ARG100/1,10	5,76	2,00	
	6	2_ARG100/1,00	4,52	2,00	
	7	2_ARG90/1,10	5,00	2,04	
	8	2_ARG90/1,00	3,20	2,08	$3 \leq G_m \leq 6,8$
	9	2_ARG80/1,20	5,15	2,38	
	10	2_ARG80/1,10	3,84	2,50	
Aditivo 3	11	3_ARG90/0,7	5,00	2,04	$1 \leq R_m \leq 2,86$
	12	3_ARG80/0,9	4,29	2,08	
	13	3_ARG80/0,8	3,84	2,38	
Aditivo 4	14	4_ARG90/0,8	3,84	2,32	
	15	4_ARG80/0,8	4,76	2,38	

Fonte: O autor.

São 15 (quinze) argamassas analisadas quanto ao tempo de manutenção do aditivo químico ao longo de 60 (sessenta) minutos. A partir do que foi citado, apresentar-se-ão os resultados dos tempos de manutenção dos aditivos para ambos parâmetros de espalhamento e tempo de fluxo.

A Figura 49 apresenta os resultados quanto ao tempo de ação do Aditivo 1, relacionando os tempos 0min, 15min, 30min e 60min com o espalhamento e tempo de fluxo e seus limites inferiores e superiores para análise de sua autoadensabilidade com o decorrer do tempo.

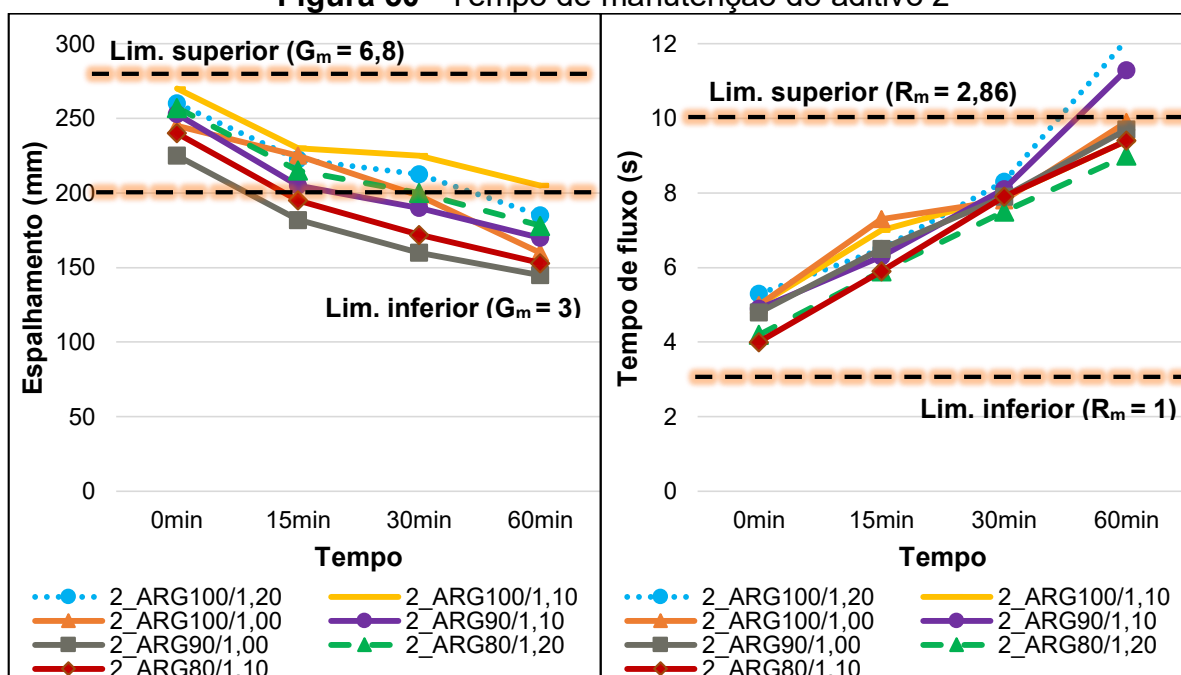
Figura 49 - Tempo de manutenção do aditivo 1



Fonte: O autor.

Infer-se através da Figura 49 que no tempo 0min as três argamassas possuíram espalhamento caracterizados como autoadensáveis, segundo Melo (2005) e aos 15min tal característica é perdida. Portanto, para correção do tempo de manutenção, um aditivo polifuncional à base de lignossulfonato deverá ser introduzido no tempo inicial da produção com o intuito de garantir consistência inicial e mais adiante adicionar um aditivo à base de policarboxilato para obter um espalhamento característico de um material autoadensável até o final do tempo estudado (JALALI, *et al.*, 2016). Em se tratando do tempo de fluxo, todas as argamassas tiveram R_m dentro dos limites propostos por Melo (2005) até os 60 minutos.

Figura 50 - Tempo de manutenção do aditivo 2

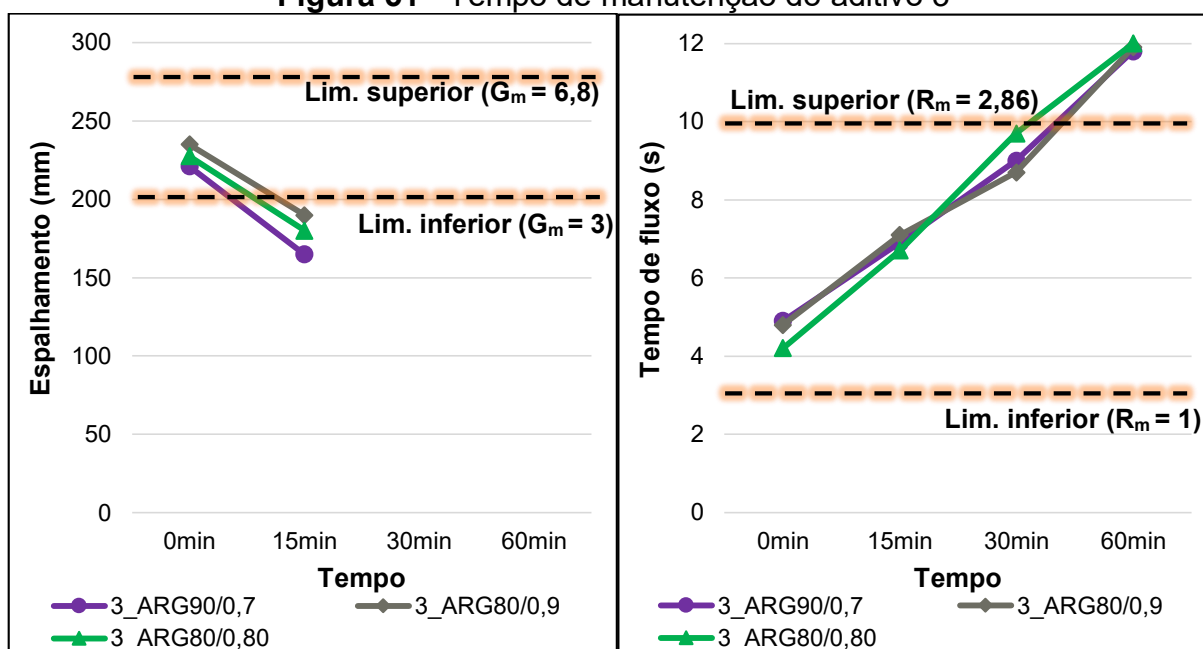


Fonte: O autor.

Encontra-se na Figura 50 os dados dos resultados do tempo de manutenção do Aditivo 2 ao longo dos 60min avaliados. Percebe-se que a 2_ARG100/1,20 e 2_ARG80/1,20 possuem características autoadensáveis até os 30min; a 2_ARG100/1,00 e 2_ARG90/1,10 até os 15min; a 2_ARG90/1,00 e 2_ARG100/1,10 até somente o tempo 0min; e por fim, a 2_ARG100/1,20 com características autoadensáveis para espalhamento até os 60min. Para o tempo relativo de escoamento, com exceção da 2_ARG100/1,20 e 2_ARG90/1,10 que possuíram valores acima do limite em 60 minutos, todas as outras tiveram tempos de fluxo dentro dos limites desde os 0 até 60min de análise. Analisa-se que a consistência da argamassa está sendo perdida ao longo do tempo e uma correção na manutenção do aditivo deve ser feita para corrigir tal perda (TOILLIER, 2017).

A Figura 51 apresenta os resultados pertinentes ao Aditivo 3, com a mesma disposição das outras, relacionando os tempos 0min, 15min, 30min e 60min com o espalhamento e seus limites, de forma que se analise suas características ao longo do tempo.

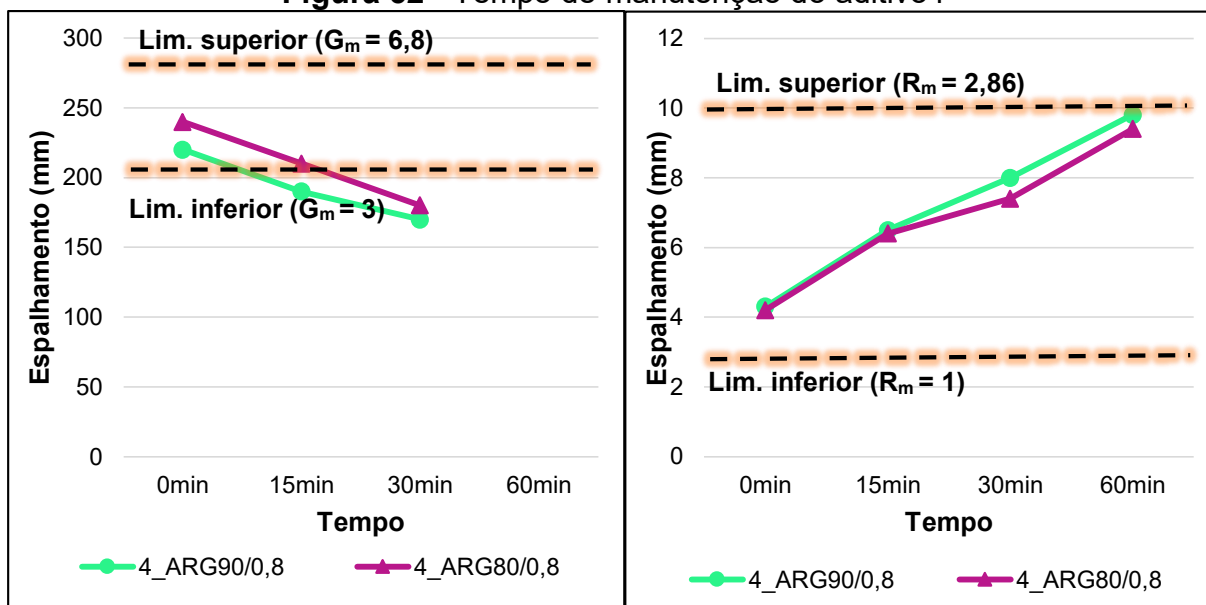
Figura 51 - Tempo de manutenção do aditivo 3



Fonte: O autor.

Pode-se observar que todas as argamassas possuem características autoadensáveis para espalhamento somente no tempo 0min, perdendo tais propriedades a partir 15min. Quanto ao tempo de fluxo, todas se mantêm autoadensável, segundo limites impostos por Melo (2005) até os 30 minutos, chegando a 1 hora com tempo acima de limite. Cita-se, mais uma vez, a necessidade de garantir uma consistência inicial com a utilização de um polifuncional à base de lignossulfonato com o intuito de melhor a manutenção do SP e aumentar o tempo em que a argamassa se mantêm autoadensável (JALALI, *et al.*, 2016).

Figura 52 - Tempo de manutenção do aditivo4



Fonte: O autor.

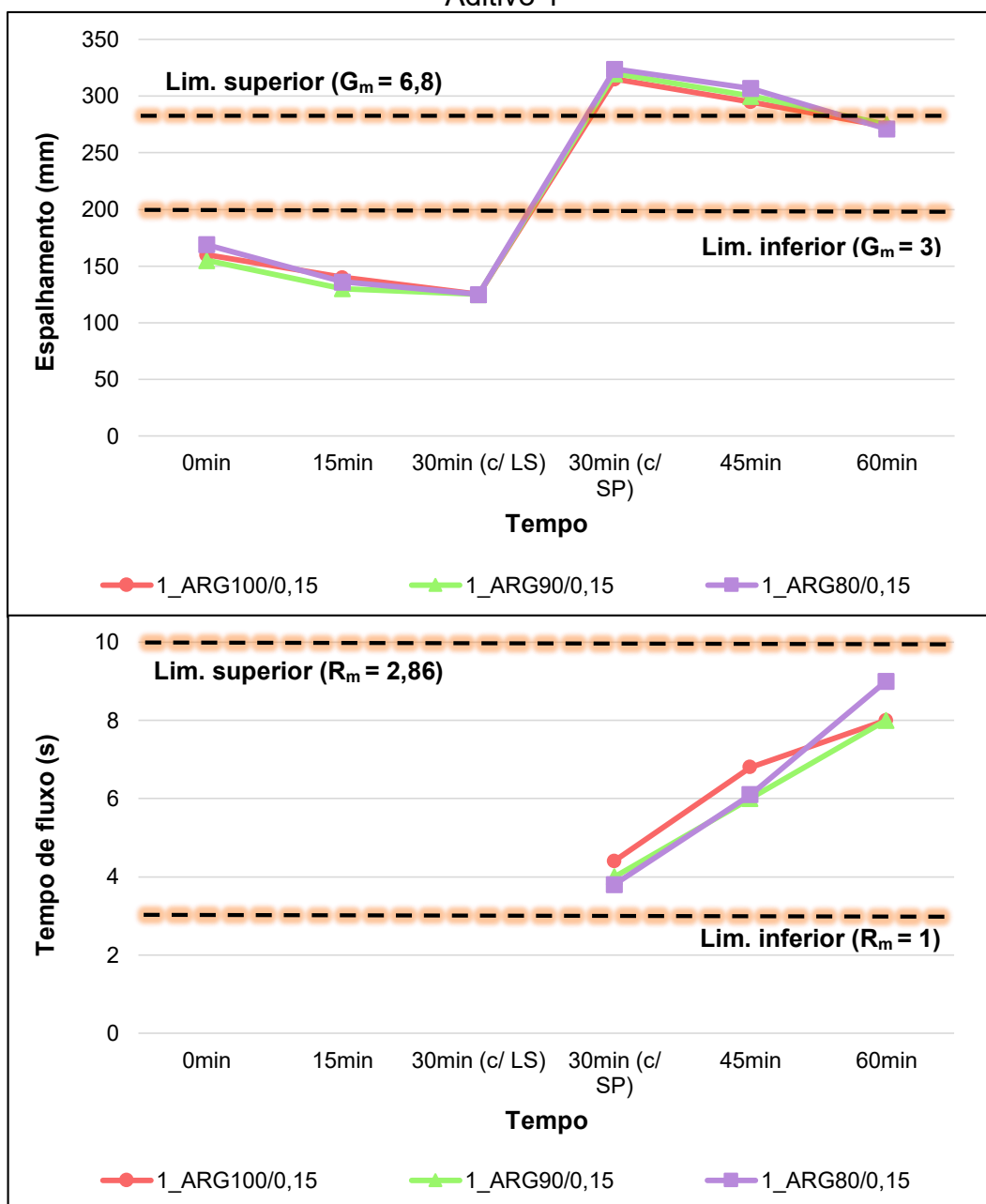
Observa-se, segundo a Figura 52, que todas as argamassas possuem características autoadensáveis para o parâmetro de espalhamento nos tempo 0min ao passo que a 4_ARG80/0,8 se mantém até os 15min e a 4_ARG90/0,8 perde tal propriedade já em 15min. Para o tempo relativo de escoamento, todas apresentaram, em todos os tempo, valores dentro dos limites impostos por Melo (2005) quando à aturoadensabilidade.

De modo geral, essa perda de propriedade com o tempo da manutenção de todos os aditivos estudados, para todas as argamassas produzidas e os diferentes aditivos superplastificantes se justificam em virtude da hidratação que ocorre no cimento. Jalali, *et al.*, (2016) afirmam que ao ocorrer liberação de calor, a eficiência dos superplastificantes é perdida visto que durante a hidratação do cimento, parte das moléculas dos SP's são retidas pelo produto de hidratação. Os SP's tem a função de evitar a reaglomeração das partículas de cimento e para isso ocorrer, moléculas de SP's precisam estar disponíveis para envolver as superfícies das partículas de cimento. Uma vez que tais moléculas são retidas, com a hidratação que ocorre no decorrer do tempo, a eficácia do aditivo diminui e a trabalhabilidade da mistura também reduz rapidamente.

4.2.3 Ajustes no tempo de manutenção dos aditivos químicos nas argamassas

Nesta etapa, realizou-se o estudo da inserção do aditivo à base de lignossulfonato nas misturas caracterizadas como autoadensáveis, com posterior colocação do superplastificante à base de policarboxilato com o intuito de obtenção final de um produto autoadensável. Dita-se importante que o lignossulfonato foi adicionado em 0,8% em relação à massa de cimento das argamassas, para os testes em todos os aditivos, conforme sugerido pelo fabricante.

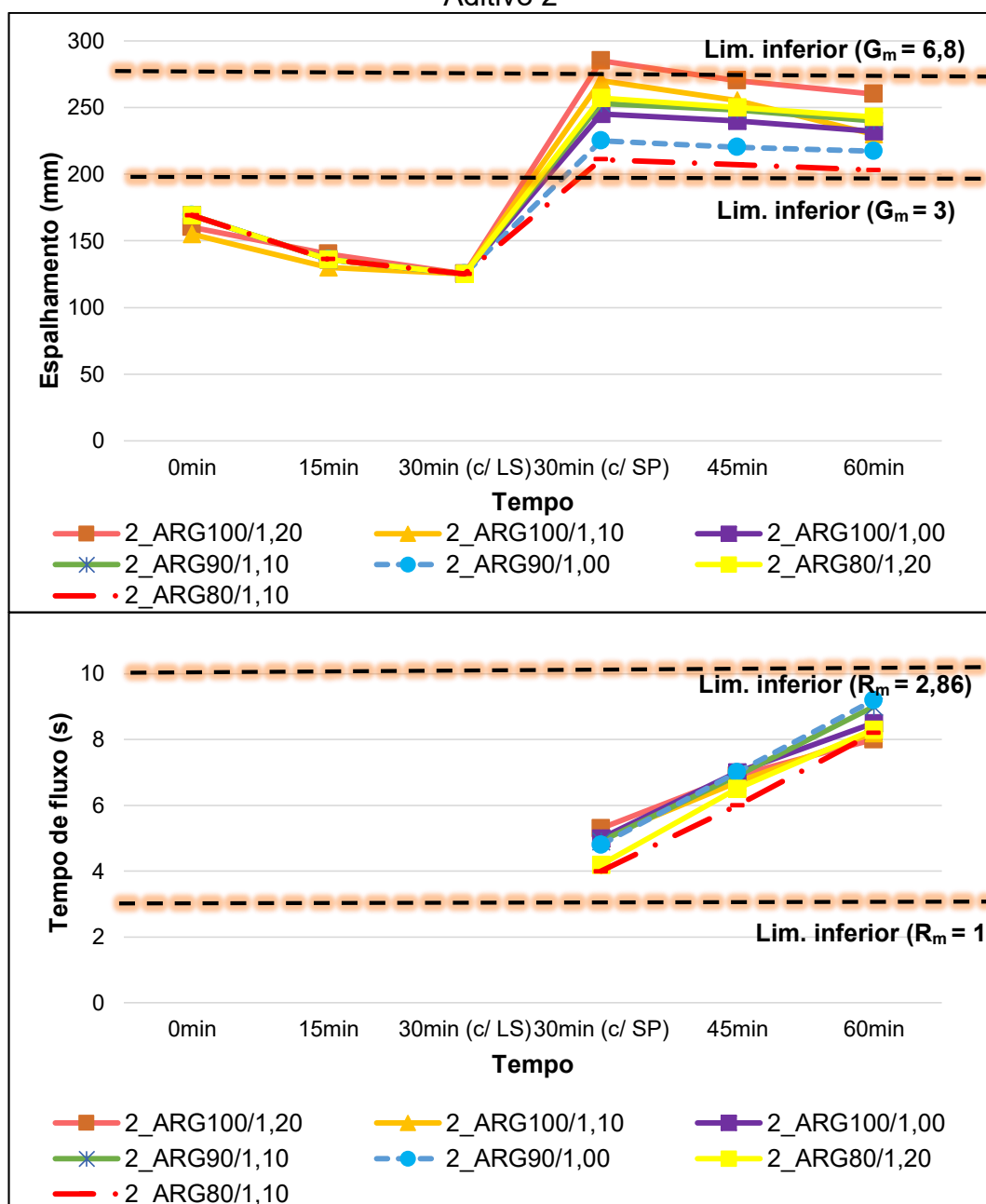
Figura 53 – Ajuste no tempo de manutenção das argamassas produzidas com o Aditivo 1



Fonte: O autor.

Percebe-se de acordo com a Figura 53, então, que todas as argamassas possuem o um comportamento extremamente parecido, a partir do pressuposto que aplicado o aditivo à base de lignossulfonato, seu espalhamento inicial fica em torno de 15/16 cm, passando 13cm, em média, no tempo 15min e 12,5cm aos 30min. Neste último tempo é aplicado então o aditivo 1, superplastificante à base de policarboxilato, em diferentes porcentagens conforme as três amostras ilustradas na figura, elevando o espalhamento para uma média de 32 cm e terminando aos 60 minutos de mistura, com espalhamento médio de 27,3 cm, o que gera uma área relativa de espalhamento de $G_m = 6,45$ garantindo a autoadensabilidade da argamassa em tempo final, segundo seu espalhamento, dentro dos limites propostos por Melo (2005). Quanto ao tempo de escoamento, nos tempos 0 a 30 minutos não tem-se valores já que o concreto, sendo convencional, não possui fluidez para escoar no Funil-V, mas a partir da colocação do superplastificante até os 60 minutos de análises, possui espalhamento dentro dos limites impostos por Melo (2005).

Figura 54 – Ajuste no tempo de manutenção das argamassas produzidas com o Aditivo 2

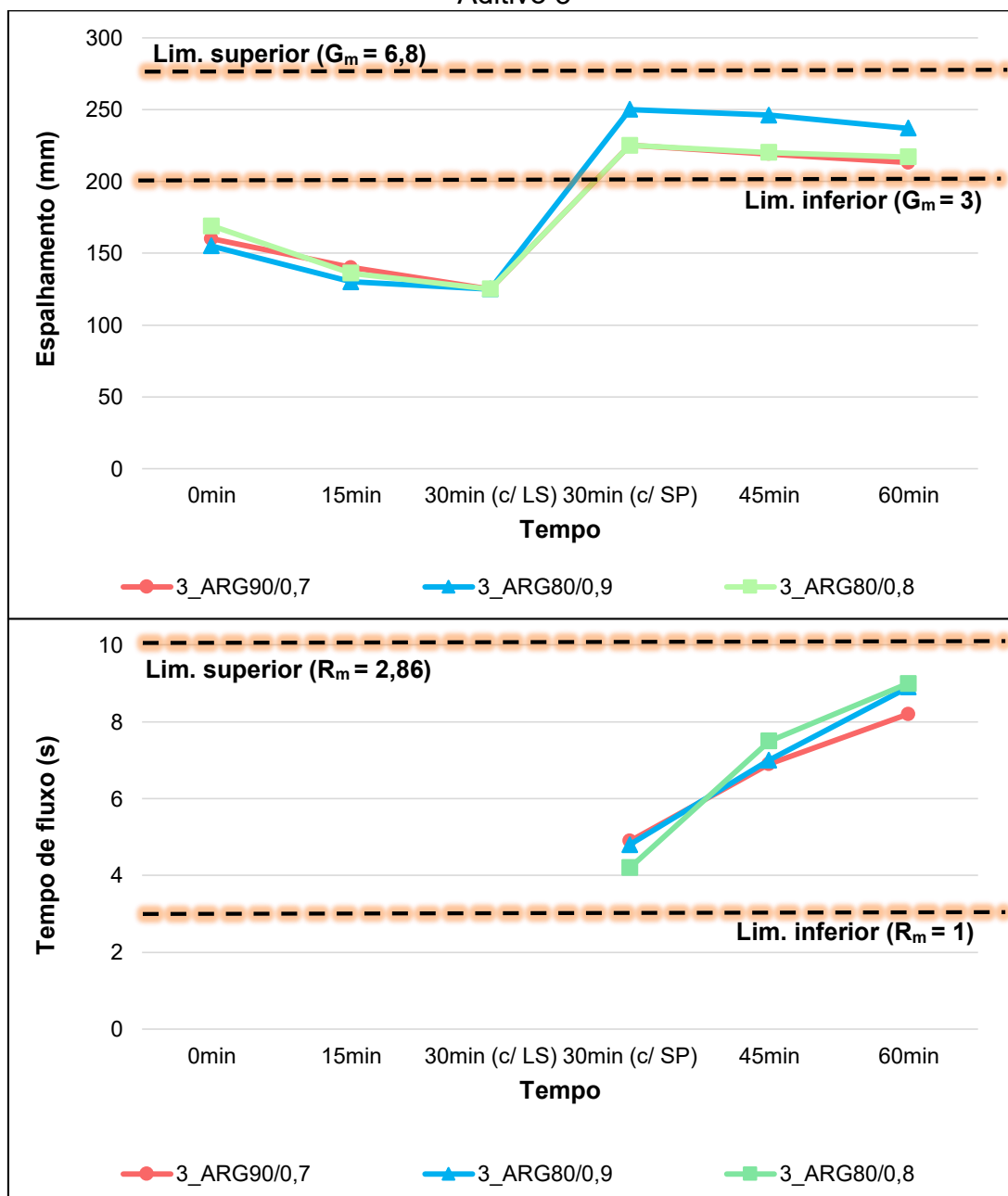


Fonte: O autor.

Inferre-se à cerca do aditivo 2, que todas as argamassas possuem um comportamento parecido e observa-se que quanto maior o excesso de pasta em relação ao volume de vazios do agregado graúdo, maior é a perda das propriedades. Com a colocação do lignossulfonato as amostras possuem espalhamentos entre 150 e 200 mm. Analisando os parâmetros, conclui-se que tanto para espalhamento, quanto para o tempo de fluxo, todas as argamassas possuem valores dentro dos

limites de Melo (2005) para caracterizá-las como autoadensável em todos os tempos analisados desde a inserção do superplastificante à base de poliarboxilato.

Figura 55 – Ajuste no tempo de manutenção das argamassas produzidas com o Aditivo 3

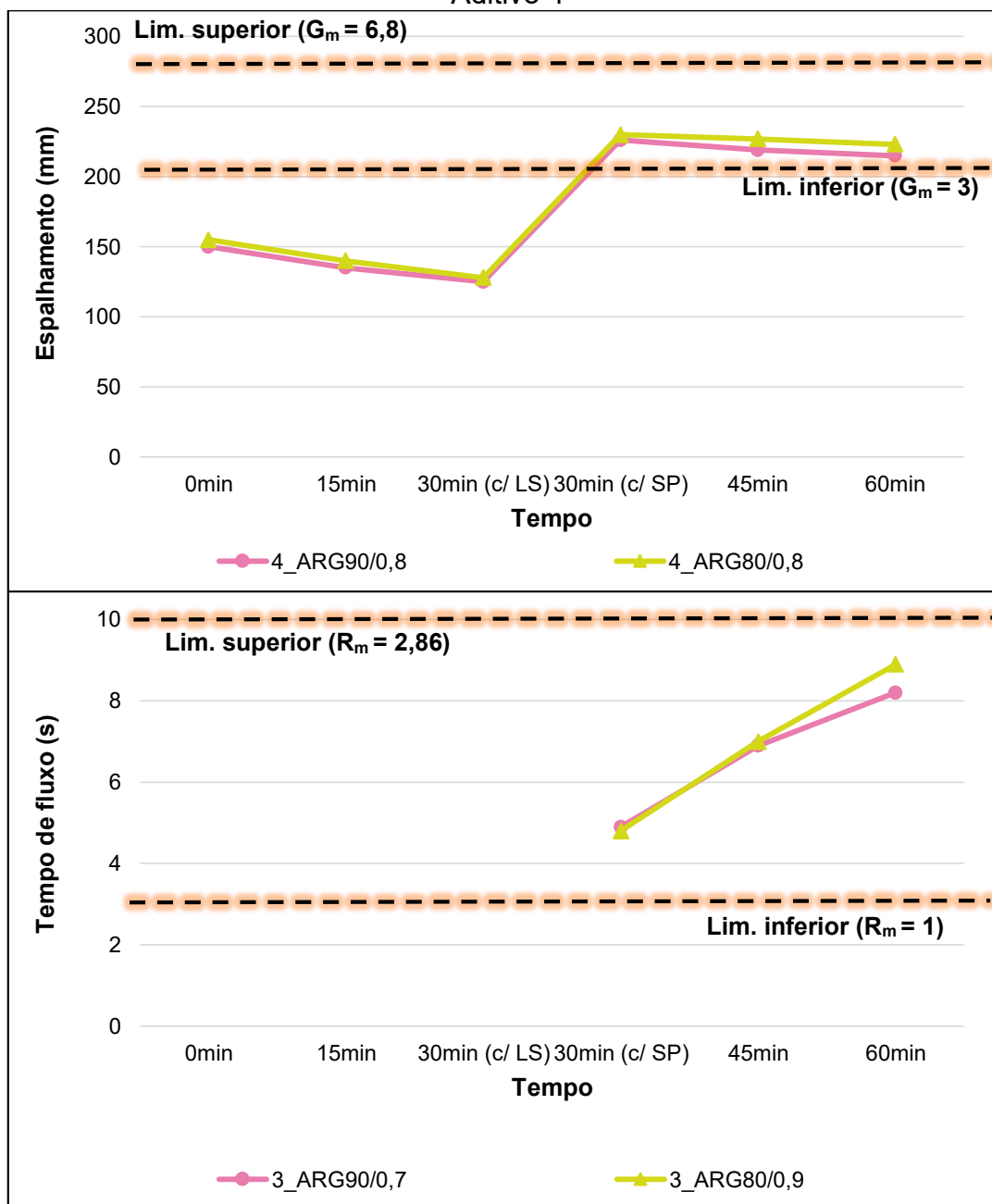


Fonte: O autor.

Infer-se à cerca do aditivo 3, conforme Figura 55, que todas as argamassas possuem propriedades autoadensáveis, segundo parâmetros de Melo (2005), em todos os tempos desde a implementação do SP, tanto para o parâmetro de espalhamento, quanto para tempo de fluxo. Mais uma vez se confirma que as

argamassas produzidas com adição mineral conferiu viscosidade à mistura (CRUZ, 2021), mantendo um bom fluxo ao longo do tempo analisado.

Figura 56 – Ajuste no tempo de manutenção das argamassas produzidas com o Aditivo 4



Fonte: O autor.

Por fim, conforme a Figura 56, observa-se o comportamento das argamassas produzidas com o aditivo 4, que se assemelha muito ao do aditivo 3, com valores de espalhamentos e tempos de fluxos dentro dos limites propostos por Melo (2005) desde a inserção do aditivo superplastificante até os 60 minutos, tempo final

analisado.

4.2.4 Considerações parciais das argamassas

É possível dizer que quanto à consistência da argamassa, que os aditivos com nanopartículas de sílica quando comparados ao somente com base de policarboxilatos, não possuíram características suficientes para corrigir a viscosidade da argamassa (propriedade que foi retificada com a adição de pó de basalto) e apresentar um tempo de fluxo dentro dos limites impostos por Melo (2005). Portanto, do ponto de vista do estado fresco, as argamassas produzidas com os diferentes aditivos obtiveram comportamento semelhantes perante G_m e R_m .

Pode-se dizer que a função de conferir viscosidade atribuída ao pó de basalto, como mencionada por Cruz (2021), adição mineral utilizada, foi atingida e a correção no tempo de manutenção dos aditivos, de forma geral, também, uma vez que se obteve uma maior trabalhabilidade num maior intervalo de tempo.

No estudo de argamassa, pode-se observar sua produção com diferentes excessos de pasta em relação ao volume de vazios do agregado miúdo e teores de aditivo para que se observe a ação do mesmo na mistura. Em se tratando deste estudo, a 1_ARG80/0,15 e 2_ARG80/1,10 obtém um resultado interessante a partir do teor de aditivo utilizado (0,15% e 1,10%, respectivamente) e o excesso de pasta de 80% visto que, um menor EX_{pasta} gera uma redução no consumo de cimento e o SP em baixo teor resulta num produto cimentício mais barato.

Por fim, explica-se como a presença do aditivo polifuncional à base de lignossulfonato, aliado ao superplastificante com policarboxilato aumentou sua manutenção, permitindo uma argamassa com consistência e características autoadensáveis num maior intervalo de tempo, uma vez que, como mencionam Jalali, *et. al.*, (2016), os lignossulfonatos retardam a pega e enrijecimento dos produtos gerados na hidratação do cimento e os policarboxilatos ao retardarem a hidratação do cimento, induzindo a formação de uma camada que envolve os grãos, impede o contato das partículas com a água, causando dissolução das mesmas. Portanto, quando alinhadas tais propriedades, foi possível a obtenção de uma argamassa autoadensável no período de sessenta minutos analisados.

4.3 ESTUDO EM CONCRETO – ETAPA 3

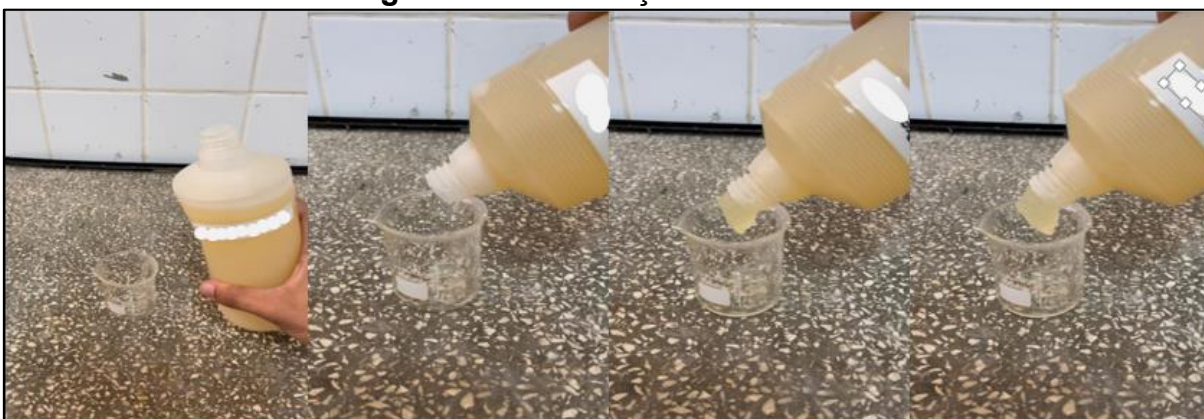
Nesta etapa, avaliou-se o excesso de argamassa (*EXarg*) sobre o volume de vazios do agregado graúdo para que fosse possível alcançar características satisfatórias de autoadensabilidade e determinar a propriedade de resistência à compressão no estado endurecido. Dois dos aditivos que estavam em estudo, sendo eles o 3 e o 4, passaram por um processo de gelificação entre a etapa da argamassa e concreto estudada e este processo pode ser visto na Figura 57 e 58, respectivamente.

Figura 57 – Gelificação do aditivo 3



Fonte: O autor.

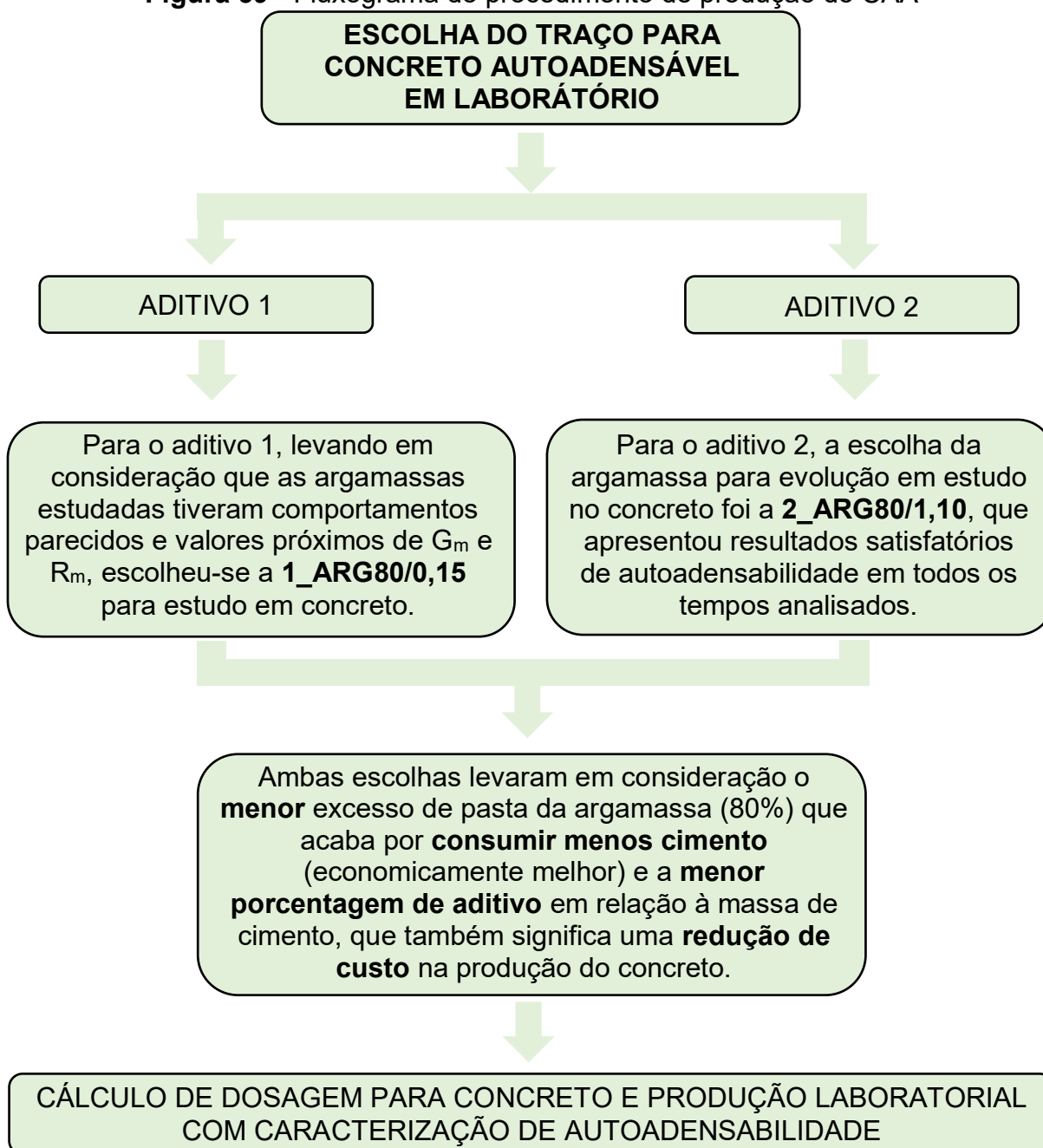
Figura 58 – Gelificação do aditivo 4



Fonte: O autor.

Em virtude do processo ocorrido, os dois aditivos não puderam ser testados em laboratório na etapa de concreto, restando o aditivo 1 e 2. A Figura 57 apresenta um fluxograma da escolha do traço de argamassa estudada com suas justificativas.

Figura 59 - Fluxograma do procedimento de produção do CAA



Fonte: O autor.

Nesta etapa, ainda, cabe ressaltar que houve escassez do cimento CP II F-40 e a concreteira o substituiu pelo CP V-ARI. Sendo assim, destaca-se que o CP II F-40 possui blaine superior a $2.600 \text{ cm}^2/\text{g}$, o CP V-ARI supera $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$, segundo o fabricante. Desta forma, o novo cimento fornecido apresenta-se mais fino, o que pode alterar o tempo de fluxo do concreto autoadensável. Portanto, nesta etapa de produção de concreto, optou-se por um teste inicial utilizando da mesma dosagem escolhida em argamassa, porém sem a utilização do pó de basalto, assumindo que a

maior finura do CP V-ARI pudesse corrigir a viscosidade da mistura.

A partir dos cálculos de dosagem, apresenta-se a Tabela 25 com os consumos dos materiais para produção de 1 metro cúbico de concreto.

Tabela 25 - Consumo de materiais por m³ de concreto


Amostra	EX_{arg} (%)	Teor aditivo (%)	CP (kg)	AM (Kg)	AG (Kg)		Água (L)	LS (L)	SP (L)	
Aditivo 1	1_CONC 80/0,15	80%	0,15	475,46	708,69	1126,18		190,18	3,80	0,71
						Brita 0 (40%)	Brita 1 (60%)			
						450,472	675,71			
Aditivo 2	2_CONC 80/1,10	80%	1,10	473,68	706,05	1121,98		189,47	3,79	5,21
						Brita 0 (40%)	Brita 1 (60%)			
						448,792	673,19			

Fonte: O autor.

4.3.1 Produção do concreto autoadensável - Aditivo 1

A produção do concreto se deu conforme mencionado na metodologia e o resultado para abatimento se encontra na Tabela 26.

Tabela 26 - Abatimento do concreto somente com a presença do lignossulfonato




Tempo (minutos)	Abatimento (cm)	Ilustração t=0min
0	7,9	
15	8	
30	8,5	

Fonte: O autor.

A Tabela 27 apresenta os resultados do concreto quanto à caracterização da sua autoadensabilidade a partir dos 30 minutos quando colocado o

aditivo superplastificante à base de policarboxilato. Ressalta-se que foi necessário um ajuste no teor de superplastificante, indo de 0,15% para 0,35% em relação à massa de cimento para atendimento das propriedades no tempo zero. Portanto, a nomenclatura utilizada passa a ser 1_CONC80/0,35.


Tabela 27 – Resultados de caracterização quanto à autoadensabilidade do concreto– Aditivo 1

	Tempo	Resultados	Limites Normativos (ABNT NBR 15823-1/2017)	Ilustração t=0min
Slump-Flow (T ₅₀₀ em segundos)	30min	2,11	$2 \leq T_{500} < 6$	
	45min	2,16		
	60min	2,19		
Slump-Flow (espalhamento em cm)	30min	62	$55 < D < 85$	
	45min	60		
	60min	59		
Funil-V (tempo de fluxo em segundos)	30min	3,59	$t \leq 8$	
	45min	4,11		
	60min	4,89		
Anel-J (espalhamento em cm)	30min	59 -> P _J =3cm	$0 < P_J < 5$ P _J = é definido como a diferença do espalhamento do slump flow com o do anel J	
	45min	57 -> P _J =3cm		
	60min	55-> P _J =4cm		

*Continua

Tabela 27 – Resultados de caracterização quanto à autoadensabilidade do concreto– Aditivo 1

*Continuação

	Tempo	Resultados	Limites Normativos (ABNT NBR 15823-1/2017)	Ilustração t=0min
				
Caixa-L (H ₁ e H ₂ em cm)	30min	$\frac{H_1 = 6,5}{H_2 = 5,9}$	H ₂ /H ₁ = 0,91	
	45min	$\frac{H_1 = 6,0}{H_2 = 5,0}$	H ₂ /H ₁ = 0,83	H ₂ /H ₁ ≥ 0,8
	60min	$\frac{H_1 = 5,8}{H_2 = 4,7}$	H ₂ /H ₁ = 0,81	

Fonte: O autor.

O termo P_J para limite imposto do ensaio do anel J significa que a diferença de espalhamento do Slump Flow para este ensaio não deve exceder 5 centímetros, que é o que de fato acontece para o aditivo 1, uma vez que a diferença maior acontece em 60 minutos de análise, com 4 cm, estando ainda dentro do proposto pela NBR 15823-1 (2017).

Para o aditivo 1, tem-se um excelente desempenho quanto aos parâmetros autoadensáveis. Ao iniciar a produção do concreto, atingiu-se com 10 minutos de mistura, em betoneira comum de laboratório, um *Slump* de 7,9 cm, com o aditivo à base de lignossulfonato, estando dentro do proposto na metodologia de atingir 8±1 centímetros de abatimento, se mantendo dentro do esperado ainda em 30 minutos. Admite-se um bom desempenho deste aditivo quanto à sua manutenção (TOILLIER, 2017), uma vez que a diferença de abatimento do concreto em trinta minutos foi de apenas 0,6 cm. A partir da inserção do aditivo superplastificante à base de policarboxilato, observa-se no tempo desde o tempo 30min de produção do concreto até os 60min que todos os parâmetros ensaiados para caracterização da autoadensabilidade do concreto estão dentro dos limites impostos pela norma NBR ABNT 15823-1 (2017). Além disso, não houve presença de segregação ou exsudação em nenhum dos concretos produzidos. Portanto, houve a validação da manutenção

da autoadensabilidade para este traço de concreto ao longo dos 60 minutos analisados, mantendo as propriedades do CAA até o tempo final estudado.


Ainda sobre a NBR ABNT 15823-1 (2017), é importante mencionar a classe que este concreto se enquadra. Quanto ao espalhamento, é definido com SF 1, sendo ideal para aplicação em estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura e embutidos, cuja concretagem é realizada a partir do ponto mais alto, com deslocamento livre, como por exemplo em lajes, estacas e certas fundações profundas.

Outro fator pertinente à pesquisa e importante a ser ressaltado foi a não utilização do pó de basalto na produção do concreto, uma vez que, por motivos de disponibilidade na região, passou-se a utilizar o CPV-ARI e não o CP II F-40 como na fase de argamassa. Em virtude de seu blaine superar pelo menos 400 cm²/g em relação ao cimento utilizado em argamassa, assumiu-se a maior finura que possibilitou uma viscosidade de forma natural, ou seja, sem a necessidade da inserção de uma adição mineral.

4.3.2 Produção do concreto autoadensável – Aditivo 2

A produção do concreto se deu conforme mencionado na metodologia e o resultado para abatimento se encontra na Tabela 28.




Tabela 28 - Abatimento do concreto somente com a presença do lignossulfonato

Tempo (minutos)	Abatimento (cm)	Ilustração t=0min
0	8,5	
15	8,2	
30	7,8	

Fonte: O autor.

Após 10 minutos de mistura da composição, com a medição do abatimento do concreto, foi identificado 8,5 cm no tempo zero, 8,2 cm em 15 minutos e no último tempo antes da inserção do superplastificante, aos 30 minutos, um *slump* de 7,8 cm. A partir disso, o policarboxilato foi colocado na mistura e a Tabela 29 apresenta os resultados do concreto quanto à caracterização da sua autoadensabilidade a partir dos 30 minutos.


Tabela 29 – Resultados de caracterização quanto à autoadensabilidade do concreto– Aditivo 2

	Tempo	Resultados	Limites Normativos (ABNT NBR 15823-1/2017)	Ilustração t=0min
Slump-Flow (T ₅₀₀ em segundos)	30min	2,40	$2 \leq T_{500} < 6$	
	45min	2,38		
	60min	2,25		
Slump-Flow (espalhamento em cm)	30min	67	$55 < D < 85$	
	45min	65		
	60min	64		
Funil-V (tempo de fluxo em segundos)	30min	4,11	$t \leq 8$	
	45min	4,97		
	60min	5,18		
Anel-J (espalhamento em cm)	30min	64,5 -> P _J =2,5cm	$0 < P_J < 5$ P _J é definido como a diferença do espalhamento do slump flow com o do anel J	
	45min	63,0 -> P _J =2cm		
	60min	61,6 -> P _J =2,4cm		

*Continua

Tabela 29 – Resultados de caracterização quanto à autoadensabilidade do concreto– Aditivo 2

*Continuação

	Tempo	Resultados	Limites Normativos (ABNT NBR 15823-1/2017)	Ilustração t=0min
				
Caixa-L (H ₁ e H ₂ em cm)	30min	$\frac{H_1 = 6,9}{H_2 = 6,3}$	H ₂ /H ₁ = 0,91	
	45min	$\frac{H_1 = 6,5}{H_2 = 5,5}$	H ₂ /H ₁ = 0,84	H ₂ /H ₁ ≥ 0,8
	60min	$\frac{H_1 = 5,9}{H_2 = 5,0}$	H ₂ /H ₁ = 0,84	

Fonte: O autor.

Como mencionado, para o aditivo 2, foi atingido o abatimento desejado com dez minutos de mistura se mantendo muito bem até trinta minutos desde sua produção inicial. Souza, Morcelli e Morais (2017) explicam que quando camadas de moléculas de água dipolares circundam as partículas hidrofóbicas de cimento, elas acabam que evitando a floculação das mesmas e uma boa dispersão acontece. Portanto, ao inserir um lignossulfonato, uma maior trabalhabilidade é atingida num maior intervalo de tempo.

Em se tratando de características autoadensáveis, o concreto produzido com aditivo 2 apresentou resultados bastante satisfatórios em relação aos limites impostos pela NBR 15823-1 (2017). Desde a inserção do aditivo superplastificante à base de policarboxilato, que no caso do aditivo 2, tem ainda partículas de nanosílica, até o último tempo de análise, em 60 minutos, propriedades pertinentes ao CAA foram atingidas para todos os ensaios e os resultados podem ser vistos na Tabela 29. É importante salientar que a perda de propriedade ao longo do tempo não foi significativa e pode-se, então, assumir que o citado por Jalali, *et al* (2016), se fez válido também nessa pesquisa, já que combinando aditivos à base de lignossulfonatos com policarboxilatos, consegue-se ter um maior tempo na manutenção da autoadensabilidade do concreto. Explica-se isso uma vez que a presença do lignossulfonato age dispersando partículas coloidais, onde suas moléculas se ligam a

essas partículas existentes em suspensão, gerando cargas negativas as mesmas, o que acaba por gerar um efeito repulsivo entre as partículas, conforme explicado na Figura 12, o que ajuda na manutenção da consistência do concreto (SOUZA, MORCELLI, MORAIS, 2017). Aliada a essa propriedade, entra a função do superplastificante à base de policarboxilato, agindo a retardar a pega e o enrijecimento dos produtos gerados na hidratação do cimento, mantendo um concreto com maior consistência, trabalhabilidade e características autoadensáveis desejadas num maior intervalo de tempo.

4.3.3 Propriedade mecânica de resistência à compressão do concreto

A Tabela 30 apresenta os resultados das resistências à compressão dos corpos de prova analisados para os dois aditivos.

Tabela 30 – Resistência à compressão dos concretos

CONCRETOS							
1_CONC80/0,35				2_CONC80/1,10			
7 dias		14 dias		7 dias		14 dias	
Resistência à Compressão (MPa)	38,7	f _{ck} médio 41,8	43,1	f _{ck} médio 47,83	50,6	f _{ck} médio 51,3	55,9
	39,3		47,7		51,3		56,7
	47,4		52,7		51,9		58,7

Fonte: O autor.

De acordo com a ABNT NBR 5739 (2018), o resultado do ensaio de resistência à compressão pode ser verificado por meio da avaliação do coeficiente de variação do ensaio, o qual é determinado através da relação entre o desvio-padrão da amostra e o valor médio de resistência à compressão. Em função do valor obtido, o ensaio pode ser classificado em excelente ($cv_e \leq 3,0\%$), muito bom ($3,0\% < cv_e \leq 4,0\%$), bom ($4,0\% < cv_e \leq 5,0\%$), razoável ($5,0\% < cv_e \leq 6,0\%$) e deficiente ($cv_e > 6,0\%$).

Aos 14 dias o 1_CONC80/0,35 atingiu uma resistência média de 46,37 MPa e o 2_CONC80/1,10 a marca de 57,10 MPa. O coeficiente de variação do ensaio para o concreto produzido com aditivo 1 foi de $cv_e = 3,92$, caracterizando o ensaio como muito bom. Já para o concreto com o aditivo 2, obteve-se um $cv_e = 1,17$, apontando o ensaio como excelente.

É importante mencionar que a maior resistência do concreto produzido com o aditivo 2, em relação ao 1, se dá em virtude de possuir em sua composição química partículas de nanosílica. Campos Neto e Geyer (2019) afirmam que, por se tratar de um material muito fino, a sua presença aumenta a resistência à compressão e reduz a permeabilidade total do concreto endurecido. Outra justificativa é explicada através da atividade pozolânica do material, que segundo Mehta e Monteiro (2014), a incorporação de materiais pozolânicos em argamassas e concretos trazem melhoria na trabalhabilidade, durabilidade à fissuração térmica e ao ataque químico e produção de concretos de alta resistência e desempenho.

4.3.4 Transferência de tecnologia e produção do CAA *in loco*

Na etapa da transferência de tecnologia da produção do concreto estudado em laboratório para a central e posteriormente aplicação, houve uma certa limitação quanto à escolha do aditivo. Por se tratar de um material utilizado em uma escala muito maior que em laboratório, a quantidade existente do aditivo 2 era pequena e em virtude da logística de recebê-lo em Londrina a tempo dos estudos *in loco* ser dificultada, não foi possível avançar com o estudo na concreteira. Portanto, na concreteira foi estudado somente o aditivo 1, disponível pela própria empresa onde foi produzido o CAA. O consumo é apresentado na Tabela 31.

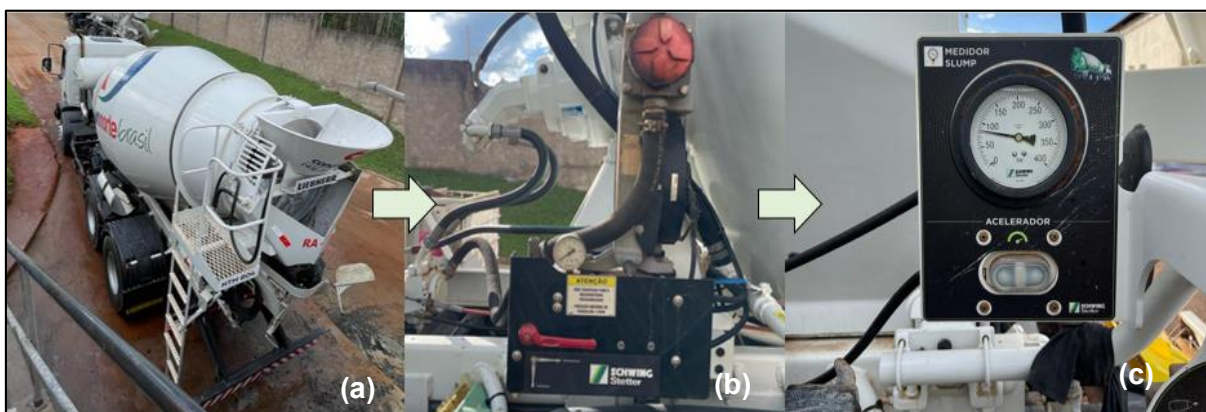
Tabela 31 - Consumo de materiais por m³ de concreto produzido *in loco*

Amostra	<i>EX_{arg}</i> (%)	Teor aditivo (%)	CP (kg)	AM (Kg)	AG (Kg)	Água (L)	LS (L)	SP (L)		
Aditivo 1	1_CONC 80/0,15	80%	0,35	475,46	708,69	1126,18		190,18	3,80	1,66
						Brita 0	Brita 1			
						(40%)	(60%)			
						450,472	675,71			

Fonte: O autor.

Algumas adversidades aconteceram nesta etapa de transferência e adequações foram realizadas conforme detalhado nos resultados. É importante mencionar ainda que o caminhão betoneira utilizado foi o RA-12 e foi produzido um volume de 2,5 metros cúbicos. Apresenta-se a Figura 60 com as premissas fixadas no caminhão para obter um abatimento de 8 ± 1 cm.

Figura 60 – Preparo do caminhão betoneira para alcançar abatimento de $8\pm 1\text{cm}$



Fonte: O autor.

Apresenta-se, conforme a Figura 60, os dados para o controle do abatimento do concreto. O caminhão betoneira indicado em (a) deve ser ligado com motor em frequência de 1500 rpm, conforme indica (b). Esse valor é mostrado no painel do caminhão para o motorista e o mesmo consegue controlar tal frequência, que por sua vez, é direcionada para um redutor, indicado em (c), que por sua vez, automaticamente se estabelece em torno de aproximadamente 1000 bar. Este sistema, neste caminhão em específico, foi o passado pelo motorista, que com sua experiência, indicou ser o ideal para atingir um abatimento de $8\pm 1\text{ cm}$.

Ao ser colocado todos os materiais na cuba do caminhão, incluindo o aditivo à base de lignossulfonato, a mistura permaneceu nessa frequência citada por 15 minutos. Neste tempo, sob condições já mencionadas, atingiu-se o abatimento representado pela Figura 61.

Figura 61 – 1º abatimento do concreto analisado

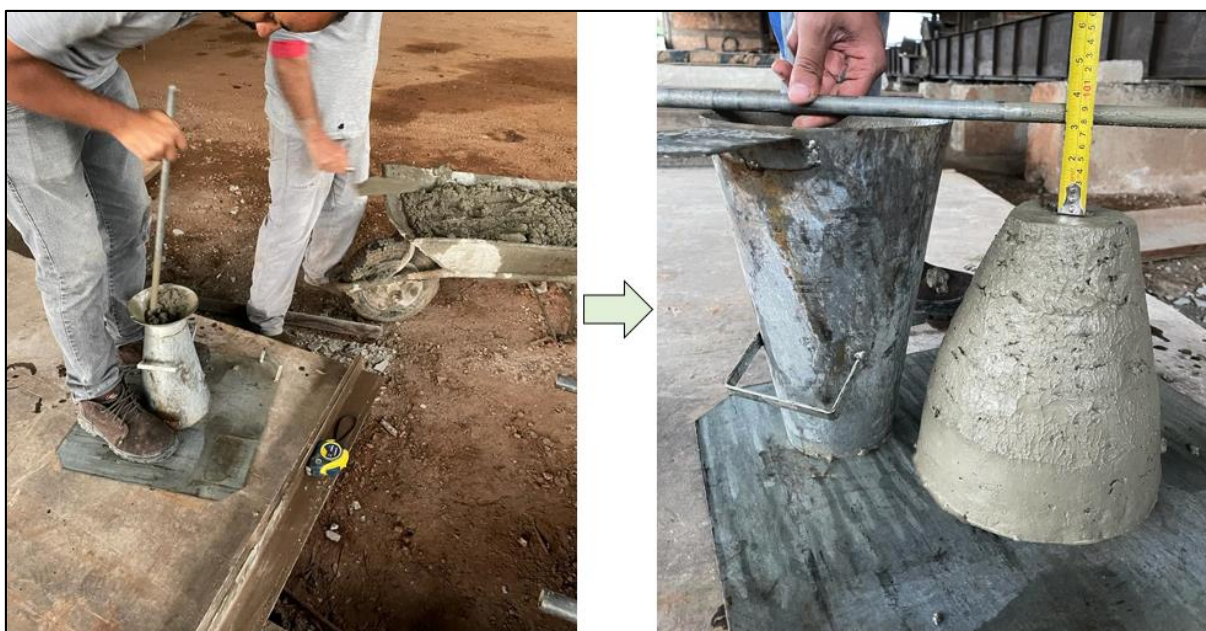


Fonte: O autor.

O concreto, neste tempo, atingiu um abatimento de 7 (sete) centímetros, estando dentro do que se esperava na pesquisa.

Após tal ensaio, o caminhão reduziu a sua frequência, para 3 voltas do balão por minuto, quando antes eram 16 voltas. Então, saiu da concreteira até onde seria lançado, em uma empresa de pré-moldados. Um imprevisto aconteceu e o concreto precisou ser levado a distância aproximada de 25 km. Ao chegar à empresa de pré-moldado, o caminhão retornou para sua frequência original por 5 minutos, suficiente para homogeneizar bem a mistura e seu abatimento foi novamente medido. Na Figura 62 encontra-se o resultado.

Figura 62 – 2º abatimento do concreto analisado



Fonte: O autor.

Este abatimento foi realizado 01h:40min desde a produção inicial do concreto e o resultado do abatimento foi 8 centímetros e aqui se reforça ainda mais a validação o que é afirmado por Souza, Morcelli e Moraes (2017), que além de aumentar a fluidez do concreto, o aditivo à base de lignossulfonato mantêm uma boa trabalhabilidade ao longo do tempo.

Foi então inserido o aditivo superplastificante à base de policarboxilato na mistura e mantido a frequência do balão de 16 voltas por minuto, agitando por 15 minutos. Sendo assim, os ensaios de caracterização do concreto autoadensável foram realizados apenas em um tempo, tendo em vista o horário que o caminhão betoneira tinha saído da concreteira e por norma precisava lançar o

produto final. Encontram-se na Figura 63, 64 e 65 a caracterização do CAA pelos ensaios de *slump flow*, anel japonês e funil-V, respectivamente.

Figura 63 – Ensaio de *slump flow in loco*



Fonte: O autor.

O espalhamento médio do concreto resultou em 64,5 centímetros, uma vez que a NBR 15823-1 (2017) especifica que deve estar entre 55 e 85 centímetros. Para este parâmetro, o concreto foi aprovado.

Figura 64 – Ensaio de anel japonês *in loco*



Fonte: O autor.

O espalhamento médio, no ensaio do anel-J resultou em 64 centímetros, resultando numa desigualdade de somente 0,5 centímetros para o ensaios do *slump flow*. Conforme estabelece a norma, esta diferença deve ser de máximo 5 cm. Portanto, o concreto atendeu, para este ensaio, parâmetro autoadensável.

Figura 65 – Ensaio de funil-V *in loco*



Fonte: O autor.

Para o funil-V, cujo parâmetro medido é o tempo de fluxo do concreto, o mesmo obteve 3,98 segundos, ao passo que a norma estabelece um valor limite de 8s. Para este ensaio, o concreto foi considerado autoadensável.

Verifica-se, portanto, que o concreto estudado *in loco* é autoadensável e suas propriedades foram mantidas, desde a presença do lignossulfonato, que proporcionou uma boa trabalhabilidade num intervalo de tempo de quase 120 minutos e o superplastificante conferiu, por fim, todos os parâmetros autoadensáveis para o produto final.

Este concreto foi lançado em peças pré-moldadas de postes, com comprimento de 9 metros para iluminação pública, conforme ilustrado na Figura 66, no estado fresco e na Figura 67, no estado endurecido.

Figura 66 – Pré-moldado de concreto no estado fresco

Fonte: O autor.

O QR Code incluso na Figura 66 te direciona automaticamente para o vídeo que mostra o início do lançamento do concreto na placa pré-moldada do poste. Infere-se, à cerca do seu adensamento, que ele possui as características consideradas de um concreto autoadensável, com capacidade fluir com facilidade dentro das formas, passando pelas armaduras e preenchendo os espaços sob o efeito de seu próprio peso, sem o uso de equipamento de vibração (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015).

Figura 67 – Pré-moldado de concreto no estado endurecido

Fonte: O autor.

Infere-se, sobre o pré-moldado, que as características autoadensáveis foram atendidas e a qualidade final das peças é incomparável ao concreto convencional, uma vez que apresenta um melhor acabamento superficial.

Para este concreto foram moldados 10 corpos de prova para serem rompidos nas idades de 12, 18 , 48 e 72 horas, 7 e 28 dias. Os resultados se encontram na tabela 32.

Tabela 32 – Resistência à compressão do concreto produzido *in loco*

	Tempo	Resistência à Compressão (MPa)		
		Corpo de Prova	Média	cve
1_CONC80/0,35	12 horas	5,46	5,30	0,16
		5,14		
	18 horas	12,14	11,57	0,57
		11,00		
	48 horas	34,70	34,97	0,265
		35,23		
	72 horas	43,41	43,32	0,095
		43,22		
	7 dias	46,80	47,01	0,205
		47,21		
	28 dias	54,92	52,38	2,54
		49,84		

Fonte: O autor.

De acordo com a ABNT NBR 5739 (2018), o resultado do ensaio de resistência à compressão pode ser verificado por meio da avaliação do coeficiente de variação do ensaio, o qual é determinado através da relação entre o desvio-padrão da amostra e o valor médio de resistência à compressão, como mencionado nos concretos produzidos em laboratório. Em função do valor obtido, o ensaio pode ser classificado em excelente ($cve \leq 3,0\%$), muito bom ($3,0\% < cve \leq 4,0\%$), bom ($4,0\% < cve \leq 5,0\%$), razoável ($5,0\% < cve \leq 6,0\%$) e deficiente ($cve > 6,0\%$).

Aos 7 dias o concreto 1_CONC80/0,35 atingiu uma resistência média de 47,01 MPa com coeficiente de variação do ensaio $cve = 0,205$, caracterizando o ensaio como excelente. Ressalta-se ainda, que aos 28 dias, o concreto atingiu uma resistência média à compressão de 52,38 MPa e ensaio sendo excelente, uma vez que seu cve é inferior a 3.

4.3.5 Considerações parciais do concreto

Existe uma boa compatibilidade entre o aditivo à base de lignossulfonato e o policarboxilato, uma vez que quando feitos os concretos e argamassas, a combinação dos dois manteve uma boa trabalhabilidade da mistura ao longo dos sessenta minutos analisados, mesmo sendo de marcas diferentes. Menciona-se que o aditivo 1, com sua porcentagem de adição, foi o que esteve mais próximo do limite proposto por Melo (2005).

Inferre-se que a utilização do CPV-ARI, por sua maior finura (Blaine > 3000cm²/g), corrigiu a viscosidade do concreto autoadensável, sem a necessidade de uma adição mineral, como em argamassas. Mehta e Monteiro (2008), citam os cimentos com finura superior a 3000cm²/g sendo os mais indicados para a produção do CAA, visto que possuem maior quantidade de partículas em contato com a água e mais próximas umas das outras, minimizando choque e através disso, reduzindo a tensão de escoamento, aumentando a viscosidade e melhorando a coesão das misturas.

Pode-se dizer que foi atingido o estudo da manutenção de aditivos em laboratório, uma vez que para dois tipos de aditivos policarboxilatos aliados ao uso do com base de lignossulfonatos permitiu caracterizar o concreto como autoadensável ao final dos 60 minutos analisados.

Afirma-se ainda, que a transferência de tecnologia do concreto foi atingida com êxito, desde a colocação do traço estudo em laboratório no sistema computacional da concreteira, com as dosagens automáticas computador – silo já corrigindo parâmetros como o teor de umidade da areia, lançados no caminhão betoneira, atingido um abatimento de 8 cm ainda na central e também depois de 01h:40min, quando chegado na empresa de pré-moldados, com posterior inserção do superplastificante, realização dos ensaios de caracterização de autoadensabilidade e lançamento nas placas pré-moldadas.

Foi possível atingir o estudo da manutenção dos aditivos, mantendo a consistência do concreto e suas características autoadensáveis por até 120 minutos, como mencionada sua produção na central de concreto e transportado para lançamento nas peças pré-moldadas. Este tempo está de acordo com a ABNT NBR 8212 (2021), uma vez estabelece um transporte permitido de até 120 minutos e o produto lançado final em até 150 minutos.

Menciona-se ainda, o efeito da combinação aditivo superplastificante à base de policarboxilato + polifuncional com base de lignossulfonatos, o principal causador na consistência inicial do concreto e por mantê-lo autoadensável no período de 120 minutos *in loco*. Isso se justifica em virtude do polifuncional conferir uma boa fluidez ao concreto, em virtude da explicação dada sobre a Figura 12, sobre a ação eletrostática sobre os grãos de cimento. Aliado a essa propriedade conferida por tal aditivo, se vinculado a um policarboxilato éster, permite-se aumentar ainda mais o tempo de consistência do concreto, já que os PCE's agem de forma a retardar a hidratação do cimento, já que ao induzir a formação de uma camada que envolve os grãos, ela impede o contato das partículas com a água e, causando a dissolução das mesmas. O grau com o qual aditivos compostos por policarboxilatos 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 (JALALI, et al, 2016).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho buscou avaliar o tempo de manutenção de aditivos químicos para a produção de concreto autoadensável, considerando sua estabilidade e consistência com o tempo, além da realização de ensaios que confirmem sua autoadensabilidade, permitindo sua execução de forma que as propriedades se mantenham ao longo do seu transporte da concreteira à obra, considerando cada particularidade dos materiais e garantindo a qualidade do produto final.

Ressalta-se a importância de estudos que saiam do meio técnico/científico e sejam aplicados, uma vez que mesmo tendo um planejamento experimental, imprevistos podem acontecer (como o caso da pesquisa) e soluções devem ser conhecidas e tomadas.

O tempo de manutenção dos aditivos químicos foi ajustado em laboratório para 60 minutos e quando lançado em obra, contabilizou-se até 120 minutos. Entendeu-se então, a importância e como um aditivo polifuncional à base de lignossulfonato pode conferir consistência, retardando produtos da hidratação do cimento e, quando aliado ao policarboxilato éster, consegue alongar ainda mais as propriedades no estado fresco do cimento, mantendo-o, neste caso do estudo, um maior tempo autoadensável.

Para os aditivos superplastificantes estudados, encontrou-se uma diferença nítida no estado endurecido do concreto, uma vez que os com base de policarboxilatos éster + nanopartículas de sílica, apresentou uma maior resistência à compressão, assim como afirmam Campos Neto e Geyer (2019), que por sua finura, preenchem melhor os vazios dos agregados mantendo uma maior coesão entre as partículas, aumentando a resistência do concreto.

Quanto aos diferentes tipos de excessos de pasta/argamassa, para o método de dosagem validado, que tem fundamento a relação matriz cimentícia/vazios do esqueleto granular, afirma-se que o mais viável, dentre o que foi estudado, é aquela argamassa/concreto que possuiu menor excesso, uma vez que impacta diretamente no consumo de cimento, reduzindo sua utilização e tornando o produto final mais atrativo economicamente.

Por fim, a transferência em escala real de tecnologia da produção de um concreto autoadensável produzido em laboratório para um volume de 2,5m³ na concreteira, transportado e lançado em placas pré-moldadas foi atingida em êxito,

uma vez que foi possível trabalhar a manutenção dos aditivos, manter o abatimento do concreto em torno de 8 cm por mais de uma hora e meia e controlar a autoadensabilidade do concreto para lançamento nas placas. A capacidade de se autonivelar é considerada a sua grande vantagem, pois será menor a intervenção humana após a sua aplicação, o que, obviamente, garante um acabamento muito superior ao que permitiria o concreto convencional, como pôde ser observado nos postes moldados.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O concreto autoadensável ainda possui lacunas do conhecimento a serem preenchidas. Dentre elas destacam-se:

- Validação do procedimento de dosagem proposto de forma a se utilizar agregados diferentes, como por exemplo, areia de britagem, que contém em sua composição parcela de pó de basalto (para a região norte do Paraná) sendo uma adição mineral que em substituição ao cimento, pode reduzir o seu consumo por m³;
- Identificação de valores ideais de *EX_{past}* e *EX_{arg}* para obtenção de características de autoadensabilidade;
- Avaliar a dosagem e possíveis formas de substituição, que favorecem a redução no consumo de cimento;
- Verificar o comportamento do concreto autoadensável frente à alta pressão do bombeamento, quando considerada a manutenção da trabalhabilidade dos aditivos químicos.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AGULLÓ, L.; TORALLES-CARBONARI, B.; GETTU, R.; AGUADO, A. Fluidity of cement pastes with mineral admixtures and superplasticizer: A study based on the Marsh cone test. **Materials and Structures**, v. 32, p.479-485, set. 1999.

AÏTICIN, P.C. et al. **Superplasticizers: how day work and why occasionally don't**. Conc. International, 1994,45- 52, 1994.

ALMEIDA FILHO, F. M. **Contribuição ao estudo da aderência entre barras de aço e concretos autoadensáveis**. 2006. 310 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

ALMEIDA, V. L. D., EVARISTO, W. F. O. **Avaliação da influência do aditivo modificador de viscosidade nas propriedades do concreto autoadensável**. 2017. 85 p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Distrito Federal. 2017.

ALMONDES, Gabriel Otaviano. **Estudo do efeito da substituição parcial da areia natural por areia de britagem nas propriedades do concreto auto adensável**. 2018. 114 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário Filadélfia - UniFil, Londrina, 2018.

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.

ARAÚJO, J. G. **Influência de adições minerais pozolânicas e de finos de pedra nas propriedades mecânicas e na microestrutura do concreto autoadensável**. 2007. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30**: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

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

_____. **NBR NM 46**: Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

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

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

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

_____. **NBR 5739:** Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 7211:** Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 7212:** Concreto dosado em central – Preparo, fornecimento e controle. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 8522:** Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 11578:** Cimento Portland Composto. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 11768:** Aditivos químicos para concreto de Cimento Portland. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 15823-1:** Concreto Autoadensável – Classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 15823-2:** Concreto Autoadensável – Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 15823-3:** Concreto Autoadensável – Determinação da habilidade passante – Método do Anel J. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 15823-4:** Concreto Autoadensável – Determinação da habilidade passante – Método da caixa L e da caixa U. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 15823-5:** Concreto Autoadensável – Determinação da viscosidade – Método do Funil V. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 15823-6:** Concreto Autoadensável – Determinação da resistência à segregação - Métodos da coluna de segregação e da peneira. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 15900-1:** Água para amassamento de concretos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.

ASSUNÇÃO, J. W. **Concreto Leve Autoadensável:** Influência da argila expandida no processo de dosagem e nas propriedades do concreto. 2016. 226 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: **ASTM C494/C494M-08:** Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, ASTM International, 2017.

_____. **ASTM C1610/C 1610 M-10**: Standard test method for static segregation of self-consolidating concrete using column technique, ASTM International, 2017.

_____. **ASTM C1611/C1611M-05**: Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete. ASTM International, 2017.

BANFILL, P.F.G. **The British society of rheology**. Great Britain at the University Press, Cambridge, USA, 1991.

BARLUENGA, G.; GIMÉNEZ, M.; RODRÍGUEZ, A.; RIO, O. **Quality Control Parameters for on-site evaluation of pumped Self-Compacting Concrete**. *Construction And Building Materials*, Madrid, Espanha, v. 154, n. 139, p. 1112-1120, 15 nov. 2017.

BOUVET, A.; GHORBEL, E.; BENNACER, R.. The mini-conical slump flow test: Analysis and numerical study. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 40, n. 10, p.1517-1523, out. 2010.

BRETAS, R. E.; D'AVILA, M. A. **Reologia de Polímeros Fundidos**. São Carlos: EdUFRSCAR, 2000.

CABRAL, A.E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. São Carlos-SP, 2007. 280p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

CALMON, J. L.; TRISTÃO, F. A.; GIACOMETTI, M.; MENEGUELLI, M.; MORATTI, M.; TEIXEIRA, J. E. S. L. Effects of BOF steel slag and other cementitious materials on the rheological properties of self-compacting cement pastes. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 40, p.1046-1053, mar. 2013.

CAMÕES, A. Influência do superplastificante nos parâmetros reológicos do betão fresco. **Engenharia Civil**, v. 5, p.29-43, 2005.

CAMPOS NETO, T. F.; GEYER, A. L. B.. Efeitos do uso de aditivo com nanosílica na consistência e resistência mecânica do concreto. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.**, São Paulo , v. 12, n. 2, p. 371-385, Apr. 2019 .

CASTRO, A. L. de; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. A influência do tipo de cimento no desempenho de concretos avançados formulados a partir do método de dosagem computacional. **Cerâmica**, v. 57, n. 341, p. 10-21, 2011.

CAVALCANTI, D. J. D. H. **Contribuição ao estudo de propriedades do concreto auto-adensável visando sua aplicação em elementos estruturais**. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Alagoas. Maceió, p. 140. 2006.

COSTA, Ada Catarina Soares de Sena; CABRAL, Antonio Eduardo Bezerra. **Estudo comparativo entre o concreto autoadensável e o concreto convencional vibrado em obra vertical**. *Ambiente Construído* 19 (2019): 289-301.

CRUZ, Indiele Daros da. **A SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DA AREIA NATURAL PELO PÓ DE PEDRA NA PRODUÇÃO DO CONCRETO**. 2021. 24 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Paranaense – Unipar, Guaíra, 2021.

De Larrard, F. and Sedran, T. Mixture-Proportioning of High-Performance Concrete. **Cement and Concrete Research**, 32, 1699-1704 (2002).

DOMONE, P. L.; JIN, Jz. Properties of mortar for self-compacting concrete. In: **Proceedings of the 1st international RILEM symposium on self-compacting concrete**. 1999. p. 109-120.

DOMONE, P.L. **Self-compacting concrete: an analyses of 11 years of cases studies**. In: *Cement & Concrete Composites*, n- 28, p. 197-208, 2006.

EFFTING, Carmeane ; FOLGUERAS, Marilena V. ; GÜTHS, Saulo ; MENDES, Gabriela A. . **Mechanical and thermal properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agent**. *CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS* , v. 57, p. 190-197, 2014.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – CEN.. **EN 12350-8: Testing fresh concrete - Part 8: Self-compacting concrete - Slump-flow test**. Slovakia, 2019.

_____. **EN 12350-9: Testing fresh concrete - Part 9: Self-compacting concrete - V-funnel test**. Slovakia, 2019.

_____. **EN 12350-10: Testing fresh concrete - Part 10: Self-compacting concrete - L box test**. Slovakia, 2019.

_____. **EN 12350-12: Testing fresh concrete - Part 12: Self-compacting concrete - J-ring test**. Slovakia, 2019.

EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS - EFNARC. **The European Guidelines for self-compacting concrete: specification, production and use**. May, 2005.

FARIA, R. **Solução fluida**. Revista Técnica n° 132, 2008. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/132/artigo286483-2.aspx>>. Acesso em: 30 dez. 2020.

FRACALOSSO, R. A. R. **Aditivos à base de policarboxilatos: influência nos tempos de pega e na manutenção de abatimento em pastas de cimento Portland**. 2011. 68 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

FRANCZAK, C. C. M.; PREVEDELLO, F. Z. R. **Estudo comparativo entre dois tipos de aditivos para um mesmo traço de concreto auto-adensável**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Concreto) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, p. 71. 2012.

FREITAS JR., José de Almeida. **Aditivos e adições minerais para concreto**. Apresentação de slides – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

GOLASZEWSKI, J., SZWABOWSKI, J. Influence of superplasticizers on rheological behaviour of fresh cement mortars, **Cement and Concrete Research**, Volume 34, Issue 2, February 2004, Pages 235-248.

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

GOMES, P. C. C.; GETTU, R.; AGULLÓ, L. Uma nova metodologia para obtenção de concretos auto-adensáveis de alta resistência com aditivos minerais. **V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto**, p. 1-14, 2003.

GOMES, Paulo. C. C. **Optimization and characterization of high-strength selfcompacting concrete**. 2002. 139f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)- Escola Técnica Superior D'Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, 2002.

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

GUNNELIUS, K.R.; et. al. Rheological characterization of cement pastes with functional filler particles. **Cement and Concrete Research**, v. 65, p.1-7, nov. 2014.

HARTMANN, C. T. **Avaliação de aditivos superplastificantes à base de policarboxilatos destinados a concretos de cimento Portland**. 2002. 210 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

HU, C., LARRARD F., SEDRAN, T., et al., “Validation of BTRHEOM, the new rheometer for soft-to fluid concrete”, **Materials Structures**, v. 29, pp. 620–631, 1996.

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

JALALI, Said, *et. al.* 2016, Pernambuco. **Pesquisa do Tempo de Trabalhabilidade de Concreto Autoadensável através de Ensaios em Pastas**. Pernambuco: Luso, 2016. 10 p.

KALETA, A.; GRZESZCZYK, S. The Influence of Chosen Factors on the Rheological Properties of Cement Paste. **Procedia Engineering**, v. 108, p.568-574, 2015.

KARAHAN, O. et al. **Fresh, Mechanical, Transport and Durability Properties of**

Self-Consolidating Rubberized Concrete. ACI Materials Journal, v. 109, 213. 2012.

KHOTBEHSARA, M. M.; EHSAN, M. YAZDI, M. A.; SARKER, P.; RANJBAR, M. M. Effect of nano-CuO and fly ash on the properties of self-compacting mortar. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 758-766, 2015.

KLEIN, N. S. **Influência da substituição da areia natural pela areia de britagem no comportamento do concreto auto-adensável.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) - Universidade Estadual de Londrina. Londrina, p. 179. 2008.

KOVLER, K. ROUSSEL, N. Properties of fresh and hardened concrete. **Cement and Concret Research**, vol. 41, 2011, P.775-792.

KWAN, A.K.H., WONG, H.H.C. Packing Density of Cementitious Materials: Part 2—Packing and Flow of OPC + PFA + CSF. **Materials and Structures**, 41, 773-784, 2008.

KWAN, A. K. H.; WONG, H. H. C. Effects of packing density, excess water and solid surface area on flowability of cement paste. **Advances in Cement Research**, v. 20, n. 1, p.1-11, jan. 2008.

LEITE, F. C. M. **Influência do tipo de adição mineral e da dimensão máxima do agregado graúdo no comportamento do concreto auto-adensável.** Dissertação (Pós-graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento) - Universidade Estadual de Londrina. Londrina, p. 188. 2007.

LI, J.; CHEN, Y.; WAN, C. A mix-design method for lightweight aggregate selfcompacting concrete based on packing and mortar film thickness theories. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 621-634, 2017.

MA, B.; WANG, H. Rheological properties of self-compacting concrete paste containing chemical admixtures. **Journal of Wuhan University of Technology mater. Sci. Ed.**, v. 28, n. 2, p.291-297, abr. 2013.

MAILVAGANAM, N.P **Factors influencing slump loss in flowingconcrete.** In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SUPERPLASTICIZERS IN CONCRETE, 1., 1979, Ottawa, Canada. Papers... Detroit: American Concrete Instituto, 1979. p.389-403. (ACI Special Publication, 62).

MANUEL, P. J. M. **Estudo da influência do teor de argamassa no desempenho de concretos auto-adensáveis.** 2005. 178 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2005.

MARTIN, J. F. M. Aditivos para Concreto. In: ISAIA, G. C (Ed.) **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.** São Paulo: IBRACON, 2005. P. 381-397. V. 1.

MATOS, P. R. de; OLIVEIRA, A. L.; PELISSER, F. PRUDÊNCIA JR.; L. R. Rheological behavior of Portland cement pastes and self-compacting concretes

containing porcelain polishing residue. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 175, p.508-518, jun. 2018.

MANUEL, P. J. M. **Estudo da influência do teor de argamassa no desempenho de concretos auto-adensáveis**. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 177. 2005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: PINI, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Microestrutura, Propriedade e Materiais** - 2ª Edição. Ed.: IBRACON. ISBN.:978-85-98576213. Português, p. 751, 2014.

MELO, Augusto Passos Funchal de; MORCELLI, Claudia Petronilho Ribeiro. **Avaliação da resistência mecânica em pasta cimentícia com adição de plastificante incorporador de ar**. 2017. 4 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Mogi das Cruzes, Mogi das Cruzes, 2017.

MELO, K.A. **Contribuição à dosagem de concreto autoadensável com adição de fíler calcário**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFSC – Florianópolis – SC, (2005).

MENDES, M.; BAUER, E.; SILVA, F. **Avaliação dos parâmetro de autoadensibilidade e de reologia do concreto autoadensável**. Revista Matéria, Brasília, v. 22, n. 4, 2017.

MILA, M. Aditivos polifuncionais para concreto: Redução de água e muitas vantagens na obra. **ConstruQuemical**, Guarulhos, nº. 15, julho, 2014.

MONTEIRO, A. B.; PITANGUEIRA, R.; WOLENSKI, A. R. V. Determinação do teor ótimo de aditivos superplastificantes em pastas de cimento através do ensaio de cone de Marsh. In: **CBC - CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO**, 54., 2012, Maceió. Anais do 54º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2012. Ibracon - Instituto Brasileiro de Concreto, p. 1 – 15, 2012.

MONTE, R.; FIGUEIREDO, A. D. de. **Avaliação de métodos de ensaio de fluidez em pastas de cimento com aditivos superplastificantes**. São Paulo: Escola Politécnica Usp, 14p., 2008.

MONTEIRO, A. B.; PITANGUEIRA, R.; WOLENSKI, A. R. V. Determinação do teor ótimo de aditivos superplastificantes em pastas de cimento através do ensaio de cone de Marsh. In: **CBC - CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO**, 54., 2012, Maceió. Anais do 54º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2012. Ibracon - Instituto Brasileiro de Concreto, p. 1 – 15, 2012

NEPOMUCENO, M. C. S.; PEREIRA-DE-OLIVEIRA, L. A.; PEREIRA, S. F. Mix design of structural lightweight self-compacting concrete incorporating coarse lightweight expanded clay aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 166, p.373-385, mar. 2018

NEPOMUCENO, M.; OLIVEIRA, L. Parameters for self-compacting concrete mortar phase. **Special Publication**, v. 253, p. 323-340, 2008.

NEPOMUCENO, M.; OLIVEIRA, L.; LOPES, S. R. Methodology for mix design of the mortar phase of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders. **Construction and Building Materials**, v. 26, n. 1, p. 317-326, 2012.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do concreto**. 2 ed. São Paulo: Pini, 1997.

NUNES, S. C. B. **Betão auto-compactável: Tecnologia e propriedades**. 2001. 198 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Estruturas de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Portugal, 2001.

NURUDDIN, M. F.; DEMIE, S.; SHFIQ, N. **Effect of mix composition on workability and compressive strength of self-compacting geopolymer concrete**. Artigo - Universiti Teknologi Petronas.. Tronoh, Malasya. 2011.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. **In: Journal of Advanced Concrete Technology**, Vol. 1, n. 1, p. 5-15, 2003.

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

OKAMURA, H. **Self-compacting High-performance concrete**. In: Concrete International, v.19, n.7, p. 50-54, Julho 1997.

OLIVEIRA, L. A. R. D. **Verificação do método de dosagem mais eficiente para o parâmetro e categoria analisados**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 128. 2012.

PAREDES, Daniel Cesar Antunes; BRONHOLO, Juliano Henrique. **Efeitos da temperatura da água de amassamento na resistência do concreto**. 2013. 46 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Concreto, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

PAULA, M. O. D. **Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland**. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, p. 76. 2006.

PEREIRA, T. A. D. C. **Concreto auto-adensável, de alta resistência, com baixo consumo de cimento Portland e com adições de fibras de lã de rocha ou poliamida**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos, p. 282. 2010.

PIOVEZAM, I. A. R.; MELEIRO, L. P.; ISA, M. M. Influência da adição no comportamento reológico da pasta autoadensável de alto desempenho. **Acta Scientiarum**. Technology, v.30, n.2, p.155-159, 2008.

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.

PLANK, J.; SACHSENHAUSER, B. Experimental Determination of the Effective Anionic Charge Density of Polycarboxylate Superplasticizers in Cement Pore Solution. **Cement and Concrete Research**, v. 39, p. 1-5, 2009.

POLESELLO, Eduardo *et al.* Efeito da mistura prolongada com a manutenção do abatimento através da utilização de aditivo superplastificante sobre o calor de hidratação. **Ibracon**, Bonito - Ms, v. 57, out. 2015.

PORTO, M. F.; COFANI, F. S.; SILVA, L. F.; MORELLI, F. D.; TORALLES, B. M. Procedimento expedito para verificação da autoadensabilidade em argamassas. In: **CBC - CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO**, 2019, Fortaleza. Anais do 61º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2019. Ibracon - Instituto Brasileiro de Concreto, 2019.

PORTO, M. F. **Procedimento de dosagem para concreto leve autoadensável (CLAA) a partir da relação matriz cimentícia/vazios do esqueleto granular**. 2020. 183f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2020.

PRUSSE, M. L. **Características, vantagens e aplicações do concreto autoadensável**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Regional de Blumenau. Blumenau, p. 59. 2010.

REIS, J. F. A. **Determinação de Parâmetros Reológicos de Concretos Através do Ensaio de Abatimento de Tronco de Cone Modificado**: Estudo de Caso. 2008. 179 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Unesp, Ilha Solteira, 2008.

REPETTE, Wellington L. Concreto Autoadensável. In: ISAIA, Geraldo C. (Ed). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 2, p. 1768 – 1806.

ROJAS, C.; CINCOTTO, M. A. Influência da estrutura molecular dos policarboxilatos na hidratação do cimento Portland. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 3, p. 267-283, jul./set. 2013.

ROUSSEL, N., STAQUET, S., SCHWARZENTRUBER, L.D. et al. **SCC casting prediction for the realization of prototype VHPC-precambered composite beams**. Mater Struct 40, 877–887 (2007). <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9190-0>.

SAHMARAN, M.; CHRISTIANTO, H. A.; YAMAN, İ. Ö. The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars. **Cement and concrete composites**, v. 28, n. 5, p. 432-440, 2006.

SANTOS, A.C. Parapinski dos. **Caracterización de las propiedades del hormigón autocompactante asociadas al esqueleto granular**. Tese doctoral, UPC, Departament d'Enginyeria de la Construcció, 2010. ISBN 9788469370650.

SANTOS, F. N.; SOUSA, S. R. G.; BOMBARD, A. J. F.; VIEIRA, S. L. Rheological study of cement paste with metakaolin and/or limestone filler using Mixture Design of Experiments. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 143, p.92-103, jul. 2017.

SBRIGHI NETO, Claudio. Agregados naturais, britados e artificiais para concreto. In: PASSUELLO, Alexandra et al (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Geraldo C. Isaia, 2011. Cap. 7. p. 233-260.

SHIMOSAKA, Tobias Jun. **Influência do teor de diferentes tipos de fibras de aço em concretos autoadensáveis**. 2017. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2017.

SILVA, O. F. da; GOMES, P. C. C.; MORAIS, K. A. M. Analytical method for determining the saturation point of superplasticizers in cement pastes using the Marsh cone. **Cerâmica**, [s.l.], v. 65, n. 374, p. 252-260, jun. 2019.

SKARENDAHL, Á.; PETERSSON, O. "Self-Compacting Concrete", State-of-Art report of RILEM Committee 174-SCC, Report 23, **RILEM Publications**, 2001.

SOUZA, Gabriel Rodrigues de; MORCELLI, Claudia Petronilho Ribeiro; MORAIS, Douglas. **Influência da adição de aditivo plastificante a base lignosulfonato no tempo de pega e manutenção do abatimento em matrizes cimentícias**. 2017. 4 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Mogi das Cruzes, Mogi das Cruzes, 2017.

TOILLIER, Helena Carolina. **Estudo do desempenho de aditivos de manutenção de trabalhabilidade no concreto**. Trabalho de conclusão de curso, Universidade de Santa Cruz do Sul. 2017.

TORALLES-CARBONARI, B. M. **Estúdio parametrico de variables y components relativos a la dosificación de hormigón de altas prestaciones**. Tese de doutorado, Universitat Politècnica de Catalunya. 1996.

TUTIKIAN, B.F; MANUEL P.J; MANUSERO, A.B; DAL MOLIN, D.C; Produção de estrutura de concreto armado com o concreto auto-adensável. In: **Comunidade da Construção**, Porto Alegre. Ação nº1, 2007.

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

TUTIKIAN, B. F. e DAL MOLIN, D.C. **Concreto Autoadensável**. 2. ed. São Paulo: 144 p. Pini, 2015.

UCHIKAWA, H.; HANEHARA, S.; SAWAKI, D. 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.

WALLEVIK, J. E. **Relationship between the Bingham parameters and slump**, Cement and Concrete Research, Volume 36, Issue 7, July 2006, Pages 1214-1221.

WINNEFELD, F. et al. 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, 2007. **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.

YUNG, W. H.; YUNG, L. C.; HUA, L. H. **A study of the durability properties of waste tire rubber applied to selfcompacting concrete**. Construction and Building Materials, v. 41, p. 665–672, 2013.

ZHANG, L. C.; ZHANG, A. L. Effect of Mineral Admixtures on Rheological Properties of Cement Paste. **Advanced Materials Research**, v. 936, p.1409-1413, jun. 2014.

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

APÊNDICES

APÊNDICE A - DESENVOLVIMENTO DO CÁLCULO DO CONSUMO DE CIMENTO PARA DOSAGEM DE ARGAMASSAS

Com o intuito de que seja determinado o volume de vazios do agregado miúdo, a Equação 4 deve ser utilizada, tomando como condição básica que o volume de argamassa a ser produzido é igual ao volume de agregado miúdo.

$$V_{arg} = V_{am}$$

$$V_{Vam} = V_{arg} \times I_{Vam} \quad (4)$$

Onde:

V_{arg} é o volume de argamassa a ser produzido em m³;

V_{am} é o volume de agregado miúdo considerado inicial em m³;

V_{Vam} é o volume de vazios do agregado miúdo em m³;

I_{Vam} é o índice de vazios do agregado miúdo em porcentagem (%).

Intitula-se que o consumo de agregado miúdo, em gramas, é calculo pela Equação 5.

$$M_{am} = V_{arg} \times \rho_{am} \quad (5)$$

Onde:

ρ_{am} é a massa unitária compactada do agregado miúdo, em kg/m³, obtida na caracterização do mesmo.

A partir de então, necessita-se encontrar o consumo ideal de cimento para a produção das argamassas, partindo dos pressupostos apresentados na Equação 6.

$$V_{pasta} = V_{cim} + V_{água} + V_{SP} \quad (6)$$

Segundo a teoria proposta neste procedimento de dosagem, o volume de pasta também pode ser encontrado através do apresentado na Equação 7.

$$V_{pasta} = V_{Vam} + EX_{pasta} \times V_{Vam}$$

$$V_{pasta} = V_{Vam} \times (1 + EX_{pasta}) \quad (7)$$

Colocando todos os volumes da Equação 6 em função da massa de cimento, tem-se:

$$V_{pasta} = \frac{M_{cim}}{\gamma_{cim}} + \frac{M_{cim} \times (a/cim)}{\gamma_{\acute{a}gua}} + \frac{M_{cim} \times SP}{\gamma_{SP}} \quad (8)$$

Isolando o fator M_{cim} na equação 8, obtém-se a Equação 9.

$$V_{pasta} = M_{cim} \left(\frac{1}{\gamma_{cim}} + \frac{(a/cim)}{\gamma_{\acute{a}gua}} + \frac{SP}{\gamma_{SP}} \right) \quad (9)$$

Por fim, considerando os pressupostos das Equações 6 a 9, verifica-se o consumo da massa de cimento como sendo o exposto na Equação 10.

$$M_{cim} = \left(\frac{V_{Vam} \times (1 + EX_{pasta})}{\left(\frac{1}{\gamma_{cim}} + \frac{(a/cim)}{\gamma_{\acute{a}gua}} + \frac{SP}{\gamma_{SP}} \right)} \right) \quad (10)$$

Na qual:

- EX_{pasta} é o excesso de pasta em relação ao volume de vazios do agregado miúdo (AMN);
- V_{Vam} é o volume de vazios do agregado miúdo em m³;
- M_{cim} é a massa de cimento em gramas;
- SP é a porcentagem, em decimais, de aditivo químico em relação à massa de cimento;
- a/cim é o fator água/cimentício;
- γ_{cim} é a massa específica do cimento em kg/m³
- $\gamma_{\acute{a}gua}$ é a massa específica da água, sendo adotada como 1.000 kg/m³;
- γ_{SP} é a massa específica do aditivo químico em kg/m³.

APÊNDICE B - DESENVOLVIMENTO DO CÁLCULO DO CONSUMO DE CIMENTO PARA DOSAGEM DE CONCRETOS

O primeiro passo é determinar o volume de vazios do agregado graúdo (AG) e toma-se como base que o volume de concreto (V_{conc}) produzido é igual ao volume de agregado graúdo (V_{AG}) e com isso, obtém-se o volume de vazios (V_{VAG}) como pode-se observar na Equação 11.

$$\begin{aligned} V_{conc} &= V_{AG} \\ V_{VAG} &= V_{conc} \times I_{VAG} \end{aligned} \quad (11)$$

na qual I_{VAG} é o índice de vazios do AG, obtido na caracterização do mesmo, em percentagem.

A seguir, a massa e agregado leve a ser incorporado na produção é determinado utilizando a Equação 12:

$$M_{AG} = V_{conc} \times \rho_{AG} \quad (12)$$

na qual M_{AG} é a massa de agregado graúdo em quilogramas e ρ_{AG} é a massa unitária solta do agregado graúdo em Kg/m³.

Com o volume de vazios do AG existente, encontra-se o volume de argamassa utilizando-se da Equação 13.

$$V_{arg} = V_{VAG} + EX_{arg} \times V_{VAG} = V_{VAG} \times (1 + EX_{arg}) \quad (13)$$

na qual EX_{arg} é a percentagem, em decimais, do excesso de argamassa em relação ao volume de vazios de AG e V_{VAG} é o volume de vazios do agregado graúdo, em m³, determinado pela Equação 11.

Após a realização do cálculo do volume de argamassa, foram consideradas as premissas das Equações 14 a 16 para obtenção da massa de cimento:

$$V_{arg} = V_{pasta} + V_{am} \quad (14)$$

Onde:

- O volume de pastas é igual ao apresentado na Equação 9;
- O volume de agregado miúdo da Equação 14 é obtido pela Equação

15.

$$V_{am} = \left(\frac{V_{AM}}{V_{arg}} \right) \times V_{arg} \quad (15)$$

Assim, substituindo as Equações 9 e 15 na Equação 14, obtém-se a massa de cimento para os diferentes tipos de argamassa como pode ser visualizado na Equação 16.

$$M_{cim} = \left(\frac{V_{arg} - \left(\frac{V_{AM}}{V_{arg}} \right) \times V_{arg}}{\left(\frac{1}{\gamma_{cim}} + \frac{(a/cim)}{\gamma_{\acute{a}gua}} + \frac{SP}{\gamma_{SP}} \right)} \right) \quad (16)$$

Na qual:

- M_{cim} é a massa de cimento em gramas;
- V_{arg} é o volume de argamassa calculado pela Equação 14 em m³;
- $\left(\frac{V_{AM}}{V_{arg}} \right)$ é a relação entre o volume de agregado miúdo por volume de argamassa encontrado na dosagem das argamassas autoadensáveis;
- SP é a porcentagem, em decimais, de aditivo químico em relação à massa de cimento;
- SP é a porcentagem, em decimais, de aditivo químico em relação à massa de cimento;
- γ_{cim} é a massa específica do cimento em kg/m³
- $\gamma_{\acute{a}gua}$ é a massa específica da água, sendo adotada como 1.000 kg/m³;
- γ_{SP} é a massa específica do aditivo químico em kg/m³;
- a/cim é o fator água/cimentício.

APÊNDICE C - DESENVOLVIMENTO DO CÁLCULO DO PROCEDIMENTO DE DOSAGEM PARA ARGAMASSAS (100% EX_{pasta} e 0,45% de ADITIVO 1)

Para obtenção do consumo de materiais para a produção dos diferentes tipos de argamassas, utilizou-se das Equações 4 a 10. Sabendo-se que foram produzidas 33 (trinta e três) argamassas com diferentes excessos de pasta e teores de aditivos superplastificantes, será dado aqui um exemplo de cálculo com EX_{pasta} igual a 100%. Neste caso, usou-se teor de 0,45% do ADITIVO 1. Para tal, as incógnitas das equações foram substituídas pelos seguintes valores:

- $V_{arg} = V_{am} = 1 \text{ m}^3$;
- $l_{Vam} = 41,8 \%$;
- $\rho_{am} = 1.533,62 \text{ Kg/m}^3$;
- EX_{pasta} = 100 %;
- $\gamma_{cim} = 3.050 \text{ kg/m}^3$;
- $\gamma_{\text{água}} = 1.000 \text{ kg/m}^3$;
- $\gamma_{SP \text{ CQ FLOW } 1865} = 1.080 \text{ kg/m}^3$;
- SP = 0,45 %;
- a/cim = 0,4.

Ao substituir os valores acima nas Equações 4 a 10, temos o desenvolvimento de cálculo como apresentado no Quadro 2.

Quadro 1 - Desenvolvimento da dosagem da argamassa ARG1

ARG1	
Equações	Desenvolvimento
(4)	$V_{Vam} = 1 \times 0,418$ $V_{Vam} = 0,418 \text{ m}^3$
(5)	$M_{am} = (1) \times 1533,62$ $M_{am} = 1533,62 \text{ kg}$
(10)	$M_{cim} = \left(\frac{0,418 \times (1+1)}{\left(\frac{1}{3,05} + \frac{0,4}{1} + \frac{0,0045}{1,08} \right)} \right)$ $M_{cim} = 1.141,58 \text{ kg}$
	$V_{SP} = \frac{0,0045 \times 1141,58}{1,08} = 4,5 \text{ L}$ $V_{\text{água}} = 0,4 \times 1141,58 = 456,63 \text{ L}$

Fonte: O autor.

É importante salientar, que segundo o procedimento proposto, o volume final de argamassa produzida é igual ao volume de agregado miúdo (1m^3), desconsiderando os vazios ($0,418\text{ m}^3$) somado ao volume de pasta ($0,84\text{m}^3$). Dessa forma, o volume de argamassa produzido no desenvolvimento do Quadro 1 é de $1,42\text{ m}^3$.

Para determinar o consumo das demais argamassas, foram utilizados os dados de referência dos respectivos materiais já mencionados, alterando o EX_{pasta} e o teor de aditivo superplastificante CQ FLOW 1865.

Os consumos por metro cúbico de todas as argamassas produzidas, portanto, foram apresentados no item 4.2, na Tabela 24.

APÊNDICE D - DESENVOLVIMENTO DO CÁLCULO DO PROCEDIMENTO DE DOSAGEM PARA ARGAMASSAS (90% EX_{pasta} e 1,10% de ADITIVO 2)

Para obtenção do consumo de materiais para a produção dos diferentes tipos de argamassas, utilizou-se das Equações 4 a 10. Sabendo-se que foram produzidas 33 (trinta e três) argamassas com diferentes excessos de pasta e teores de aditivos superplastificantes, será dado aqui um exemplo de cálculo com EX_{pasta} igual a 100%. Neste caso, usou-se teor de 1,1% do ADITIVO 2. Para tal, as incógnitas das equações foram substituídas pelos seguintes valores:

- $V_{arg} = V_{am} = 1 \text{ m}^3$;
- $l_{vam} = 41,8 \%$;
- $\rho_{am} = 1.533,62 \text{ Kg/m}^3$;
- $EX_{pasta} = 90 \%$;
- $\gamma_{cim} = 3.050 \text{ kg/m}^3$;
- $\gamma_{\acute{a}gua} = 1.000 \text{ kg/m}^3$;
- $\gamma_{SP \text{ APF}_{nano}} = 1.040 \text{ kg/m}^3$;
- $SP = 1,1 \%$;
- $a/cim = 0,4$.

Ao substituir os valores acima nas Equações 4 a 10, temos o desenvolvimento de cálculo como apresentado no Quadro 3.

Quadro 2 - Desenvolvimento da dosagem da argamassa ARG17

ARG17	
Equações	Desenvolvimento
(4)	$V_{vam} = 1 \times 0,418$ $V_{vam} = 0,418 \text{ m}^3$
(5)	$M_{am} = (1) \times 1533,62$ $M_{am} = 1533,62 \text{ kg}$
(10)	$M_{cim} = \left(\frac{0,418 \times (1+0,9)}{\left(\frac{1}{3,05} + \frac{0,4}{1} + \frac{0,011}{1,04} \right)} \right)$ $M_{cim} = 1.075,09 \text{ kg}$
	$V_{SP} = \frac{0,011 \times 1075,09}{1,04} = 11,37 \text{ L}$
	$V_{\acute{a}gua} = 0,4 \times 1075,09 = 430,04 \text{ L}$

Fonte: O autor.

É importante salientar, que segundo o procedimento proposto, o volume final de argamassa produzida é igual ao volume de agregado miúdo (1m^3), desconsiderando os vazios ($0,418\text{ m}^3$) somado ao volume de pasta ($0,798\text{m}^3$). Dessa forma, o volume de argamassa produzido no desenvolvimento do Quadro 1 é de $1,38\text{ m}^3$.

Para determinar o consumo das demais argamassas, foram utilizados os dados de referência dos respectivos materiais já mencionados, alterando o EX_{pasta} e o teor de aditivo superplastificante APFnano.

Os consumos por metro cúbico de todas as argamassas produzidas, portanto, foram apresentados no item 4.2, na Tabela 24.

APÊNDICE E - DESENVOLVIMENTO DO CÁLCULO DO PROCEDIMENTO DE DOSAGEM PARA ARGAMASSAS (80% EX_{pasta} e 0,8% de ADITIVO 3)

Para obtenção do consumo de materiais para a produção dos diferentes tipos de argamassas, utilizou-se das Equações 4 a 10. Sabendo-se que foram produzidas 33 (trinta e três) argamassas com diferentes excessos de pasta e teores de aditivos superplastificantes, será dado aqui um exemplo de cálculo com EX_{pasta} igual a 100%. Neste caso, usou-se teor de 0,8% do ADITIVO 3. Para tal, as incógnitas das equações foram substituídas pelos seguintes valores:

- $V_{arg} = V_{am} = 1 \text{ m}^3$;
- $l_{vam} = 41,8 \%$;
- $\rho_{am} = 1.533,62 \text{ Kg/m}^3$;
- $EX_{pasta} = 80 \%$;
- $\gamma_{cim} = 3.050 \text{ kg/m}^3$;
- $\gamma_{\acute{a}gua} = 1.000 \text{ kg/m}^3$;
- $\gamma_{SP \text{ APF nano mix}} = 1.050 \text{ kg/m}^3$;
- $SP = 0,8 \%$;
- $a/cim = 0,4$.

Ao substituir os valores acima nas Equações 4 a 10, temos o desenvolvimento de cálculo como apresentado no Quadro 4.

Quadro 3 - Desenvolvimento da dosagem da argamassa ARG32

ARG32	
Equações	Desenvolvimento
(4)	$V_{vam} = 1 \times 0,418$ $V_{vam} = 0,418 \text{ m}^3$
(5)	$M_{am} = (1) \times 1533,62$ $M_{am} = 1533,62 \text{ kg}$
(10)	$M_{cim} = \left(\frac{0,418 \times (1+0,8)}{\left(\frac{1}{3,05} + \frac{0,4}{1} + \frac{0,008}{1,05} \right)} \right)$ $M_{cim} = 1.022,60 \text{ kg}$
	$V_{SP} = \frac{0,008 \times 1022,60}{1,05} = 7,79 \text{ L}$
	$V_{\acute{a}gua} = 0,4 \times 1022,60 = 409,04 \text{ L}$

Fonte: O autor.

É importante salientar, que segundo o procedimento proposto, o volume final de argamassa produzida é igual ao volume de agregado miúdo (1m^3), desconsiderando os vazios ($0,418\text{ m}^3$) somado ao volume de pasta ($0,798\text{m}^3$). Dessa forma, o volume de argamassa produzido no desenvolvimento do Quadro 1 é de $1,38\text{ m}^3$.

Para determinar o consumo das demais argamassas, foram utilizados os dados de referência dos respectivos materiais já mencionados, alterando o EX_{pasta} e o teor de aditivo superplastificante APFnano MIX.

Os consumos por metro cúbico de todas as argamassas produzidas, portanto, foram apresentados no item 4.2, na Tabela 24.

APÊNDICE F - DESENVOLVIMENTO DO CÁLCULO DO PROCEDIMENTO DE DOSAGEM PARA ARGAMASSAS (80% EX_{pasta} e 0,8% de ADITIVO 4)

Para obtenção do consumo de materiais para a produção dos diferentes tipos de argamassas, utilizou-se das Equações 4 a 10. Sabendo-se que foram produzidas 33 (trinta e três) argamassas com diferentes excessos de pasta e teores de aditivos superplastificantes, será dado aqui um exemplo de cálculo com EX_{pasta} igual a 100%. Neste caso, usou-se teor de 0,8% do ADITIVO 4. Para tal, as incógnitas das equações foram substituídas pelos seguintes valores:

- $V_{arg} = V_{am} = 1 \text{ m}^3$;
- $l_{vam} = 41,8 \%$;
- $\rho_{am} = 1.533,62 \text{ Kg/m}^3$;
- EX_{pasta} = 80 %;
- $\gamma_{cim} = 3.050 \text{ kg/m}^3$;
- $\gamma_{\text{água}} = 1.000 \text{ kg/m}^3$;
- $\gamma_{SP \text{ APFnano PREMIUM}} = 1.050 \text{ kg/m}^3$;
- SP = 0,8 %;
- a/cim = 0,4.

Ao substituir os valores acima nas Equações 4 a 10, temos o desenvolvimento de cálculo como apresentado no Quadro 5.

Quadro 4 - Desenvolvimento da dosagem da argamassa ARG32

ARG32	
Equações	Desenvolvimento
(4)	$V_{vam} = 1 \times 0,418$ $V_{vam} = 0,418 \text{ m}^3$
(5)	$M_{am} = (1) \times 1533,62$ $M_{am} = 1533,62 \text{ kg}$
(10)	$M_{cim} = \left(\frac{0,418 \times (1+0,8)}{\left(\frac{1}{3,05} + \frac{0,4}{1} + \frac{0,008}{1,05} \right)} \right)$ $M_{cim} = 1.022,60 \text{ kg}$
	$V_{SP} = \frac{0,008 \times 1022,60}{1,05} = 7,79 \text{ L}$
	$V_{\text{água}} = 0,4 \times 1022,60 = 409,04 \text{ L}$

Fonte: O autor.

É importante salientar, que segundo o procedimento proposto, o volume final de argamassa produzida é igual ao volume de agregado miúdo (1m^3), desconsiderando os vazios ($0,418\text{ m}^3$) somado ao volume de pasta ($0,798\text{m}^3$). Dessa forma, o volume de argamassa produzido no desenvolvimento do Quadro 1 é de $1,38\text{ m}^3$.

Para determinar o consumo das demais argamassas, foram utilizados os dados de referência dos respectivos materiais já mencionados, alterando o EX_{pasta} e o teor de aditivo superplastificante APFnano PREMIUM.

Os consumos por metro cúbico de todas as argamassas produzidas, portanto, foram apresentados no item 4.2, na Tabela 24.