



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFRAESTRUTURA E
DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO

BRENDA MAIARA OLIVEIRA ALVES

**ARGAMASSA AUTONIVELANTE PARA CONTRAPISO: EFEITO DO TIPO DE CIMENTO
NO COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO**

Tucuruí-PA

2020

BRENDA MAIARA OLIVEIRA ALVES

**ARGAMASSA AUTONIVELANTE PARA CONTRAPISO: EFEITO DO TIPO
DE CIMENTO NO COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. Área de concentração: Infraestrutura.

Nome do orientador: Dr.^a Luciana De Nazaré Pinheiro Cordeiro.

Tucuruí-PA

2020

BRENDA MAIARA OLIVEIRA ALVES

**ARGAMASSA AUTONIVELANTE PARA CONTRAPISO: EFEITO DO TIPO DE
CIMENTO NO COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético.
Área de concentração: Infraestrutura.

Nome do orientador: Dr.^a Luciana De Nazaré Pinheiro Cordeiro.

Aprovada em 24 de Abril de 2020.

BANCA EXAMINADORA:

Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro.

Prof. Dr.^a Luciana De Nazaré Pinheiro Cordeiro/UFPA. - Orientadora



Prof. Dr. Paulo Sérgio Lima Souza/UFPA- Examinador Interno



Prof. Dr. Júnior Hiroyuki Ishihara/UFPA- Examinador Interno

Carina M. Stolz

Prof. Dr.^a Carina Mariane Stolz/FEEVALE - Examinadora Externa

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

-
- A474a Alves, Brenda Maiara Oliveira.
Argamassa autonivelante para contrapiso: Efeito do tipo de cimento no comportamento físico-mecânico / Brenda Maiara Oliveira Alves. — 2020.
xiii, 111 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof^a. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Tucuruí, 2020.
1. Contrapiso. 2. Argamassa autonivelante. 3. Diferentes cimentos. 4. Adições minerais. 5. Retração. I. Título.

Dedico este trabalho aos meus pais, Valdeci e Elizonete, pelo apoio incondicional, em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela força e perseverança que me fizeram superar os obstáculos que surgiam ao longo dessa caminhada.

À minha família, que estiveram presente me ajudando e dando suporte para que eu conseguisse chegar ao fim desta empreitada.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético (PPGINDE), em especial, a minha orientadora Prof. Dra. Luciana Cordeiro pelos conselhos e ajudando sempre que surgiam dúvidas ou imprevistos, com quem aprendi muito e que guardarei estes ensinamentos.

Aos amigos da graduação e do mestrado que me acompanharam ao longo deste trabalho: Karen, Carla, Thais e Grazi obrigada pela disponibilidade em compartilhar informações, equipamentos e materiais, pela paciência em tirar minhas dúvidas e pelos conselhos, vocês foram essenciais; à Luciana (Lu) por realizar os meus ensaios de caracterização dos materiais na UFRGS, foi muito importante a sua participação nesta etapa do trabalho, à Misley, Taiana, Vanessa e Jedson, por todos os momentos compartilhados, desde os alegres aos angustiantes, obrigada por todo auxílio que vocês proporcionaram ao longo dessa jornada.

Em especial, agradeço novamente à Karen, Júlia e Beatriz, amigas de vários anos, pelas diversas vezes em que vocês se prontificaram em ajudar e a me aconselhar em momentos de dificuldade e tensão, do início ao fim. Sou muito grata por ter uma amizade como a de vocês!

À querida técnica de laboratório Francirene (Fran), por sempre estar solícita em ajudar nos ensaios deste trabalho. Sua ajuda foi muito importante, agradeço por todo companheirismo e dedicação. Ao Sr. Lúcio, que além de vigiar o laboratório me socorria consertando equipamento, bancava o carpinteiro quando necessário, e quando possível me auxiliava com os meus ensaios.

À todos que me ajudaram na doação de materiais e equipamentos para que fosse possível a realização do trabalho. À Eletronorte pela doação de materiais, à empresa DOW e UFRGS pela solicitude em realizar alguns ensaios de caracterização dos materiais e à UFPA, através do PPGINDE, pela possibilidade desta formação acadêmica.

RESUMO

A argamassa autonivelante (AAN) se insere no mercado construtivo como um produto inovador devido as suas propriedades especiais quando comparada com argamassas convencionais, devido o preenchimento dos espaços vazios e o autoadensamento somente sob o efeito da gravidade, a capacidade de fluidez e nivelamento sem a ocorrência de segregação. O uso do cimento CP V-ARI é comum para a sua produção, uma vez que sua elevada finura favorece na fluidez do material e proporciona rápido endurecimento, características fundamentais que devem ser consideradas nas argamassas autonivelantes (AAN's). Porém, a rara disponibilidade deste tipo de cimento se torna um fator limitante para sua aplicabilidade no estado do Pará. Diante disso, o objetivo desta pesquisa é desenvolver o estudo de dosagem de AAN para contrapiso, adaptando-a aos materiais locais que favorecem a sua concepção e avaliando a sua influência nas características reológicas e mecânicas. Para a produção dessas argamassas, utilizou-se a adaptação de Lopes et al. (2018) da metodologia de Tutikian (2004) para concreto autoadensável (CAA), utilizando finos em substituição parcial dos cimentos, adotando como fatores controláveis o tipo de cimento (CP I, CP II-E, CP IV e CP V-ARI) e o tipo de adição mineral (sílica ativa e metacaulim). Para a caracterização da AAN no estado fresco foram realizados os ensaios de mini *slump*, mini funil-V, retenção de fluxo, densidade de massa e teor de ar incorporado, determinação da exsudação e tempo de cura. No estado endurecido foram verificadas as resistências mecânicas à compressão e à tração na flexão e a retração desses materiais, uma vez que é uma das principais manifestações patológicas da AAN. Analisando os resultados obtidos, observou-se que a área superficial dos cimentos testados foi o fator que mais influenciou o desempenho das argamassas produzidas, onde os cimentos com maiores áreas superficiais necessitaram de mais aditivo para atingir propriedades no estado fresco e tiveram os maiores índices de retração. As adições minerais contribuíram na coesão das argamassas e na redução da retração em misturas com teores de até 25% de Metacaulim e 15% de Sílica Ativa.

Palavras-chave: Contrapiso. Argamassa autonivelante. Diferentes cimentos. Adições minerais. Retração.

ABSTRACT

Self-leveling mortar (SLM) is inserted in the construction market as an innovative product due to its special properties when compared to conventional mortars due to the filling of empty spaces and self-compacting only under the effect of gravity, the ability to flow and level without the occurrence of segregation. The use of CP V – ARI cement is common for its production, since its high fineness favors the fluidity of the material and for providing fast hardening, fundamental characteristics that must be considered in self-leveling mortars (SLM's). However, the rare availability of this type of cement becomes a limiting factor for its applicability in the region. Therefore, the objective of this research is to develop the study of SLM dosage for screed, adapting it to local materials that favor its design and evaluating its influence on rheological and mechanical characteristics. For the production of these mortars, we used the adaptation by Lopes et al. (2018) of Tutikian's methodology (2004) for self-compacting concrete (CAA), using fines in partial replacement of cement, adopting as controllable factors the type of cement (CP I, CP II-E, CP IV and CP V-ARI) and the type of mineral addition (silica fume and metakaolin). For the characterization of SLM in the fresh state, the mini *slump*, mini V-funnel, flow retention, mass density and incorporated air content, determination of exudation and healing time tests were performed. In the hardened state, the mechanical resistance to compression and traction in flexion and the retraction of these materials were verified, since it is one of the main pathologies of SLM. Analyzing the results obtained, it was observed that the surface area of the tested cements was the factor that most influenced the performance of the produced mortars, where cements with larger surface areas needed more additive to achieve fresh properties and had the highest rates of retraction. Mineral additions contributed to the cohesion of mortars and reduced shrinkage in mixtures with contents of up to 25% metakaolin and 15% silica fume.

Keywords: Screed. Self-leveling mortar. Different cements. Mineral additions. Shrinkage.

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 2.1 - Efeitos de diferentes materiais sobre a reologia das argamassas.	31
Quadro 4.1-Síntese dos resultados das propriedades das argamassas autonivelantes....	89
Tabela 2.1 - Tipos de cimento Portland comercializados no Brasil.	13
Tabela 2.2 - Referência bibliográfica espalhamento mini <i>slump</i>	33
Tabela 2.3 - Requisitos de desempenho para pisos cimentícios autonivelantes modificados com polímeros.....	42
Tabela 3.1- Idade, número e dimensão de cp's de argamassa por ensaio no estado endurecido.	51
Tabela 3.2 - Composição granulométrica e características físicas da areia fina após o peneiramento.	54
Tabela 3.3 - Características químicas dos cimentos.	55
Tabela 3.4 - Características físicas e mecânicas dos cimentos.....	56
Tabela 3.5- Informações sobre o superplastificante.	56
Tabela 3.6 - Caracterização química das adições minerais.	57
Tabela 3.7 - Características física das adições minerais.....	58
Tabela 3.8 - Traços iniciais para a dosagem do Sp, em massa.....	59
Tabela 3.9 - Dosagem dos teores de sílica ativa e metacaulim nas argamassas, em massa.	59
Tabela 4.1 - Dosagem dos teores ótimo de Sp para cada tipo de cimento.	65
Tabela 4.2-Descrição dos traços unitários, em massa, das argamassas formuladas.....	68
Tabela 4.3 - Resultados de mini- <i>slump</i> , mini funil-V e análise visual das AAN's.....	68
Tabela 4.4- Retenção de fluxo das argamassas autonivelantes.	72
Tabela 4.5 - Resultados de densidade e teor de ar incorporado das AAN's.....	77
Tabela 4.6 - Valores médios obtidos para o ensaio de exsudação das argamassas.	79
Tabela 4.7 - Resistência à compressão das argamassas autonivelantes.	81
Tabela 4.8 - Resistência à tração na flexão das argamassas autonivelantes.....	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- (a) Área de estacionamento com o contrapiso autonivelante industrial aplicado; (b) Pavimento com aplicação de contrapiso autonivelante, sobre manta acústica.	7
Figura 2.2 - Imagens de MEV das partículas de sílica.	17
Figura 2.3 - MEV de 3 amostras de metacaulim – Ampliação 10.000X.....	18
Figura 2.4 - Representação esquemática para definição de viscosidade segundo modelo de Newton.....	27
Figura 2.5 - Comportamento da tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento (Modelos: 1 – Newtoniano, 2 – Bingham, 3 – Pseudoplástico e 4 - Dilatante).	29
Figura 2.6 - Tronco de cone utilizado no ensaio de espalhamento.....	32
Figura 2.7 - Referência bibliográfica de espalhamento do mini <i>slump</i>	33
Figura 2.8 - À esquerda (a), uma argamassa com borda desuniforme devido a processos de segregação e exsudação; e à direita (b), uma argamassa com borda uniforme.	34
Figura 2.9 - Análise visual da argamassa escoada. (a) Argamassa sem tendência à segregação, (b) Argamassa com tendência à segregação.	35
Figura 2.10 - Dimensões do mini funil-V.	35
Figura 2.11 - Equipamento para a realização do o ensaio de retenção de fluxo.	37
Figura 2.12 – Exemplo de corte na amostra de argamassa.....	39
Figura 2.13 - Molde adaptado para o ensaio de exsudação.	40
Figura 2.14 - Pastas autonivelantes e ensaios aplicáveis.....	42
Figura 2.15 - Procedimento de mistura.	46
Figura 2.16 - Procedimento de mistura.	48
Figura 3.1 - Fluxograma da matriz experimental.	52
Figura 3.2 - Argamassadeira utilizada na produção das AAN's.	60
Figura 3.3 - Procedimento de mistura.	61
Figura 3.4 - (a) Mini funil-V preenchido com argamassa; (b) Abertura do orifício para escoamento da argamassa; (c) Argamassa totalmente escoada.	62
Figura 4.1- Teor de aditivo final x espalhamento empregado para cada tipo de cimento.	65
Figura 4.2 – Tempo de fluxo x espalhamento para cada tipo de cimento com sílica.....	69

Figura 4.3 - Tempo de fluxo x espalhamento para cada tipo de cimento com metacaulim.....	69
Figura 4.4 – Percentual de perda de espalhamento ao longo do tempo para cada tipo de cimento com sílica.	72
Figura 4.5 - Perda de espalhamento ao longo do tempo para cada tipo de cimento com metacaulim.....	73
Figura 4.6 – Resultados do tempo de cura das AAN's.	75
Figura 4.7 - Resistência à compressão nos cimentos aos 28 dias.....	81
Figura 4.8 - Resistência à tração na flexão aos 28 dias.	84
Figura 4.9 - Retração das argamassas autonivelantes com sílica ativa.	86
Figura 4.10 - Retração das argamassas autonivelantes com metacaulim.....	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAN	Argamassa autonivelante
AAN's	Argamassas autonivelantes
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
AMV	Aditivo modificador de viscosidade
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
B.E.T	Brunauer Emmett Teller
CAH	Aluminato de cálcio hidratado
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio
C ₃ A	Aluminato tricálcio
CP	Cimento Portland
CP's	Corpos de prova
CP I	Cimento Portland comum
CP II-E	Cimento Portland com adição de escória de alto-forno
CP IV	Cimento Portland Pozolânico
CP V-ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
DMC	Diâmetro máximo característico
FRX	Espectrometria de fluorescência de raios X
G.L	Granulometria à laser
LACER	Laboratório de Materiais Cerâmicos
MBC	Materiais de base cimentícias
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
M.C	Metacaulim
MF	Módulo de finura
NBR	Norma Brasileira
PF	Perda ao Fogo
RCD	Resíduo de construção e demolição
RCMG	Resíduo de corte de mármore e granito
RI	Resíduo Insolúvel
S.A	Sílica ativa

SiO ₂	Dióxido de silício
SLC	<i>Self-levelling flooring compound</i>
Sp	Superplastificante
UHE	Usina Hidrelétrica de Energia

LISTA DE SÍMBOLOS

a/c	Relação água/cimento
g	Gramas
g/cm ³	Gramas por centímetro cúbico
h	Hora
kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
min	Minutos
mm	Milímetro
μm	Micrômetro
s	Segundos
%	Percentual
τ_0	Tensão de escoamento
μ	Viscosidade plástica
$\dot{\gamma}$	Taxa de cisalhamento
τ	Tensão de cisalhamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação e justificativa da pesquisa	2
1.2	Questão de pesquisa	4
1.3	Objetivo da pesquisa	4
1.3.1	Objetivo Principal	4
1.3.2	Objetivos específicos	4
1.4	Estrutura da Dissertação	4
2	ARGAMASSA AUTONIVELANTE	6
2.1	Influência dos materiais constituintes na argamassa autonivelante.....	10
2.1.1	Efeito do cimento.....	11
2.1.2	Efeito da água	14
2.1.3	Efeito do agregado miúdo.....	15
2.1.4	Efeitos das adições minerais	16
2.1.5	Efeito dos aditivos químicos.....	21
2.2	Reologia	24
2.2.1	Classificação reológica	27
2.3	Propriedades da argamassa autonivelante no estado fresco	29
2.3.1	Ensaio no estado fresco	31
2.3.1.1	Mini slump.....	31
2.3.1.2	Mini funil-V	35
2.3.1.3	Tempo de Retenção de fluxo	36
2.3.1.4	Densidade de massa e teor de ar incorporado.....	37
2.3.1.5	Tempo de cura.....	38
2.3.1.6	Determinação da exsudação	39
2.4	Propriedades da argamassa autonivelante no estado endurecido	41
2.4.1	Ensaio no Estado Endurecido.....	43

2.4.1.1 Resistência mecânica.....	43
2.4.1.2 Variação dimensional	43
2.5 MÉTODOS DE DOSAGEM DE AAN	44
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	49
3.1 Planejamento Experimental	Erro! Indicador não definido.
3.1.1 Fatores Controláveis	49
3.1.2 Fatores Fixos.....	50
3.1.3 Variáveis de Resposta.....	51
3.2 Fase 1: Dosagem da AAN	53
3.2.1 Seleção dos materiais.....	53
3.2.1.1 Agregado Miúdo	53
3.2.1.2 Cimento	54
3.2.1.3 Aditivo superplastificante.....	56
3.2.1.4 Adições minerais	57
3.2.1.5 Água.....	58
3.2.2 Definição do teor de Superplastificante.....	58
3.2.3 Acerto de finos e verificação no estado fresco	59
3.2.4 Procedimento de mistura	60
3.3 Fase 2: Efeito do tipo de cimento nas características reológicas.....	61
3.3.1 Ensaio de mini <i>slump</i> e mini funil-V	61
3.3.2 Ensaio de tempo de retenção de fluxo	62
3.3.3 Ensaio de tempo de cura	63
3.3.4 Ensaio de densidade de massa e teor de ar incorporado	63
3.3.5 Ensaio de determinação da exsudação.....	63
3.4 Fase 4: Efeito do tipo de cimento no comportamento mecânico	64
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	65
4.1 Definição do teor de superplastificante	65
4.2 Efeito do tipo de cimento nas características reológicas.....	67
4.2.1 Mini <i>slump</i> e mini funil-V	67

4.2.2	Ensaio de tempo de retenção de fluxo	67
4.2.3	Ensaio de tempo de cura	75
4.2.4	Ensaio de densidade de massa e teor de ar incorporado	77
4.2.5	Ensaio de determinação de exsudação	79
4.3	Efeito do tipo de cimento no comportamento mecânico	80
4.3.1	Resistência à compressão	80
4.3.2	Resistência à tração na flexão	84
4.3.3	Variação dimensional	86
4.4	Desempenho das AAN's	88
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	92
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

1 INTRODUÇÃO

Entre os diversos fatores que influenciaram o desenvolvimento tecnológico na construção civil, pode-se destacar a utilização de novos materiais que agregam qualidade desejada ao produto final e aperfeiçoam a execução do empreendimento (CARVALHO, 2015).

A argamassa autonivelante (AAN) surgiu no mercado como uma tecnologia inovadora contribuindo na execução do contrapiso, justamente por ser um material com características específicas que garantem a total horizontalidade do mesmo e propriedades que a tornam isentas de defeitos oriundos da falha de aplicação, pois não necessitam de adensamento e de acabamento (MARTINS, 2009; ALRIFAI et al., 2013; GOMES; GONÇALVES, 2013; RUBIN, 2015; CARVALHO, 2015; SILVA, 2016a)

O revestimento de pisos em argamassa autonivelante busca atender a racionalização e sistematização das obras, por meio da agilidade de execução desse serviço, caracterizado pelo grande volume de material, através da mecanização do sistema construtivo. Diferentemente do sistema de piso convencional, este tipo de revestimento possibilita aceleração da construção de edifícios de múltiplos pavimentos ou grandes áreas horizontais destinadas ao comércio, que são caracterizados pela repetitividade das atividades (CHAVES, 2019).

Contudo, algumas pesquisas realizadas por Souza et al. (2012), Gomes e Gonçalves (2013), Rubin (2015), Silva (2016a) e Mendes (2019) mostraram que pode ocorrer manifestações patológicas em contrapiso utilizando AAN, como fissuras e deslocamento em decorrência da retração. Além disso, a falta de equipamentos e procedimentos de dosagem próprios para AAN para contrapiso são os maiores fatores que impedem a disseminação desta tecnologia em larga escala no país (OLIVEIRA et al., 2018).

No Brasil, são poucas pesquisas sobre o efeito do tipo de cimento na AAN, pois a maioria da literatura existente e disponível aborda sobre o concreto autoadensável (CAA) (SILVA, 2016a; CHAVES, 2019), enquanto que as construções em locais como na Europa, Estados Unidos e América Latina o uso da AAN já é bastante difundido e pesquisado por autores como Safi et al. (2015), Canbaz, Topçu e Ateşin (2016), Benabed et al. (2018), Zhang et al. (2018). No Brasil, as argamassas autonivelantes

despertaram o interesse de pesquisadores e empresas a partir de 2008 (MARTINS, 2009).

Segundo Gomes e Gonçalves (2013), apesar da utilização da argamassa autonivelante já ser disseminada internacionalmente, ainda é necessário o estudo mais aprofundado de seu comportamento, pois produtos que estão sendo lançados recentemente no mercado, são recorrentes o desenvolvimento precoce de manifestações patológicas.

A AAN é feita misturando materiais cimentícios, agregados miúdos e adições minerais, bem como aditivos químicos (NAKAKURA; BUCHER, 1997; ZHU; BARTOS, 2003; ZHANG et al., 2018). Quando a AAN é usada, deve-se ter excelente fluidez, capacidade de bombeamento e recursos de auto nivelamento para formar uma superfície lisa após uma ligeira pavimentação. A fim de satisfazer as condições de construção acima mencionadas, a AAN deve possuir algumas propriedades, tais como tempo de endurecimento adequado, maior fluidez, maior resistência inicial, boa resistência à segregação e mudança de volume estável (ZHANG et al., 2018).

Neste contexto, é essencial estudar este material de modo a aperfeiçoar o conhecimento tecnológico sobre suas propriedades. Para alcance das características autonivelantes dessas argamassas, esta pesquisa propõe a utilização de quatro tipos de cimentos – alguns disponíveis no local de realização do estudo – com combinações de adições minerais, avaliando seu efeito sobre as propriedades físico-mecânicas, e verificando se ainda que os materiais sejam alterados, as AAN's atendem os parâmetros de controle apresentados pelas metodologias existentes.

1.1 Motivação e justificativa da pesquisa

O desenvolvimento de novas tecnologias e materiais que visem a otimização de prazos, a melhor utilização de insumos e o aumento da produtividade em obras torna-se cada vez mais recorrente, bem como necessário, na indústria da construção civil. Em busca de soluções diferenciadas, tecnologias inovadoras ganham espaço no mercado e são constantemente incorporadas ao dia-a-dia dos canteiros de obras (OLIVEIRA, 2018).

Dessa forma, a argamassa autonivelante se insere no mercado da construção civil como um produto inovador para a execução de contrapiso, que permite não só

reabilitam como também regularizar e nivelar desde os mais novos aos antigos, mostrando-se um produto vantajoso e competitivo, visto que pode acelerar o processo construtivo (SILVA, 2016a).

Comparando os dois métodos de execução, enquanto o convencional é feito com argamassa seca, precisando ser espalhada, compactada e sarrafeada com régua, demandando tempo para o acabamento, no contrapiso autonivelante, ela preenche todo o desnível (TOMAZINI, 2018), garantindo ainda a alta produtividade na aplicação, liberação rápida para a execução de outros serviços ou para o uso do ambiente (24 horas, contra os 14 dias necessários para cura dos pisos cimentícios convencionais) e qualidade e desempenho superior a das argamassas convencionais (CICHINELLI, 2012; HOUANG, 2013; GUGELMIN, 2013).

Além disso, a utilização de resíduos oriundos de diferentes processos produtivos na produção de AAN tem sido bastante abordada, visto que podem corroborar para minimização do consumo de cimento Portland, que neste tipo de tecnologia acaba sendo alto, como demonstrado em pesquisas como Rizwan e Bier (2012), Medipour et al. (2013) e Carvalho (2015).

Na literatura, vários tipos de resíduos têm sido utilizados como matérias-primas para a fabricação de AAN, como resíduos plásticos (SAFI et al., 2013), conchas (SAFI et al., 2015), ardósia aterrada de resíduos de extração (BARLUENGA; OLIVARES, 2010) e agregado reciclado de concreto (OLIVEIRA, 2019).

No Brasil, a difusão desta tecnologia tem sido limitada devido à falta de pesquisas mais detalhadas a respeito deste material, bem como pela carência de normalização nacional específica (RUBIN, 2015; SILVA; 2016a; OLIVEIRA et al., 2018; CHAVES, 2019).

É sabido que as propriedades de cada tipo de cimento pode influenciar diretamente no seu comportamento nos estados fresco e endurecido (STOLZ, 2011). O uso do cimento CP V-ARI, por exemplo, é mais comumente aplicado na mistura de argamassas autonivelantes, principalmente em função de características como o rápido endurecimento pós-hidratação, a elevada finura (vantajosa ao passo que argamassas autonivelantes requerem um alto teor de finos em sua composição) e o ganho acelerado de resistência do mesmo (CARVALHO, 2015; OLIVEIRA et al., 2018; CHAVES, 2019; MENDES, 2019). Porém, a rara a disponibilidade deste cimento se torna um fator limitante para sua aplicabilidade na região.

Neste contexto, isso reforça a importância e a necessidade de maior conhecimento tecnológico sobre AAN's que estão sendo executado no país, sobretudo na região Norte, buscando argamassas autonivelantes utilizando cimentos alternativos e mais comuns na região, de modo que se possa tornar aplicável.

1.2 Questão de pesquisa

O programa experimental foi desenvolvido buscando responder a seguinte questão:

- De que forma o tipo de cimento afeta nas propriedades de argamassas autonivelantes para contrapiso?

1.3 Objetivo da pesquisa

1.3.1 Objetivo Principal

Este trabalho visa analisar o efeito do tipo de cimento no comportamento físico-mecânico de AAN para contrapiso produzidas em laboratório.

1.3.2 Objetivos específicos

- Avaliar se o método de Tutikian (2004) adaptado por Lopes et al. (2018) se aplica as argamassas produzidas a partir de diferentes tipos de cimento Portland: CP I, CP II-E, CP IV e CP V-ARI;
- Avaliar o efeito do tipo de cimento e adição mineral no comportamento físico-mecânico de AAN;
- Avaliar o efeito do tipo de material frente à retração das argamassas elaboradas.

1.4 Estrutura da Dissertação

A presente pesquisa está dividida em cinco capítulos, conforme descrito a seguir:

O primeiro capítulo é uma introdução abordando o contexto e as justificativas para a realização desta pesquisa, os objetivos principais e específicos e a estruturação da pesquisa.

O segundo capítulo é formado por uma revisão bibliográfica, onde se apresentam informações sobre a argamassa autonivelante, descrevendo sobre suas propriedades no estado fresco e endurecido, os materiais que a constituem, os aspectos conceituais relacionados à reologia e os trabalhos já realizados que são relevantes para o desenvolvimento deste estudo utilizando este material.

O terceiro capítulo aborda o programa experimental descrevendo os materiais a serem utilizados e o método adaptado para a dosagem da argamassa autonivelante.

O quarto capítulo apresentam-se os resultados obtidos dos ensaios no estado fresco e endurecido, seguidos de sua análise e discussão. A disposição dos resultados segue a ordem apresentada no capítulo anterior.

O quinto capítulo apresentam-se as considerações finais do trabalho e sugestões para futuras pesquisas.

2 ARGAMASSA AUTONIVELANTE

Foram anos de pesquisa da ciência e tecnologia buscando o aprimoramento nas diversas aplicações das argamassas até obter a argamassa autonivelante (CABRAL et al., 2016). A primeira argamassa autonivelante foi desenvolvida por Nils Johansson na Finlândia intitulada de “*self-levelling flooring compound*” (SLC), no ano de 1977 (ANDERBERG, 2007). Utilizando cimento Portland e aditivos químicos como superplastificantes e fluidificantes, o objetivo inicial do produto era criar uma maneira fácil de nivelar pisos de concreto, antes da aplicação do revestimento final, eliminando assim o tratamento da superfície (ANDERBERG, 2007; RUBIN, 2015).

Define-se como argamassa autonivelante (AAN), uma argamassa capaz de preencher os espaços vazios e se autoadensar apenas sobre o efeito da gravidade e de sua própria capacidade de fluxo, conferindo uma reologia que proporcione grande capacidade de fluir e se adensar, sem segregar (MARTINS, 2009; SILVA, 2016a; NENEVÊ, 2017). De acordo com Mehdipour et al. (2013), as AAN's são uma nova categoria de sistemas com base cimentícia, considerada de alto desempenho, caracterizado por sua capacidade de se espalhar rapidamente e auto consolidar, na qual não apresentam qualquer separação significativa de seus constituintes.

Para Schaefer (2013) é uma mistura fluída que apresenta um espalhamento que varia de 250 a 270 mm e ao ser aplicado ela não necessita de vibração e nem nivelamento, por possuir uma espessura reduzida.

Martins (2009) e Silva (2016a) complementam que isto se torna possível devido ao equilíbrio entre a alta fluidez, viscosidade moderada e a coesão entre as partículas que a compõem. A homogeneidade destes compostos é necessária para assegurar características de resistência e durabilidade do produto final, portanto, é imprescindível que a mistura apresente alta estabilidade (MEHDIPOUR et al., 2013). Para isso, boas formulações das argamassas autonivelantes exigem emprego de aditivos químicos e adições minerais (NENEVÊ, 2017).

A aplicação desse material está voltada principalmente para pisos e contrapisos (MARTINS, 2009). Esse sistema aceita sobre si todos os tipos de revestimentos como: pisos vinílicos, os amadeirados, os cerâmicos e entre outros (SCHAEFER, 2013). Porém, ainda não há normas técnicas brasileiras que regulamentam o contrapiso à base de cimento, portanto, as normas referenciais são as europeias.

Segundo Rubin (2015) é possível encontrar no mercado duas indicações para a utilização e aplicação dessa tecnologia:

- a) Argamassas autonivelantes industriais: indicadas para aplicações industriais, garagens, estacionamentos, pátios e pisos industriais submetidos a tráfego moderado (Figura 2.1a). Podem receber ou não, dependendo do fabricante, pinturas e/ou revestimentos de diversas naturezas ou ainda funcionar como a própria superfície final do piso. Normalmente são utilizadas para acabamento do piso e apresentam secagem mais rápida por apresentar espessuras mais finas, que variam, dependendo do caso, de 5 a 20 mm (LESSA; COUTINHO, 2013).
- b) Argamassas autonivelantes residenciais/comerciais: indicadas para aplicações em áreas internas, residenciais e comerciais (Figura 2.1b). Normalmente são utilizadas para nivelamento, não podendo funcionar como a própria superfície final do piso, pois não são aptas a receber tráfego intenso, requerendo um acabamento final. Entretanto podem ser aplicadas sobre pisos flutuantes, embutindo instalações, sobre mantas acústicas e/ou térmicas, de acordo com a necessidade. Apresentam espessuras um pouco maiores que as argamassas industriais, podendo variar entre 20 a 60 mm (LESSA; COUTINHO, 2013).

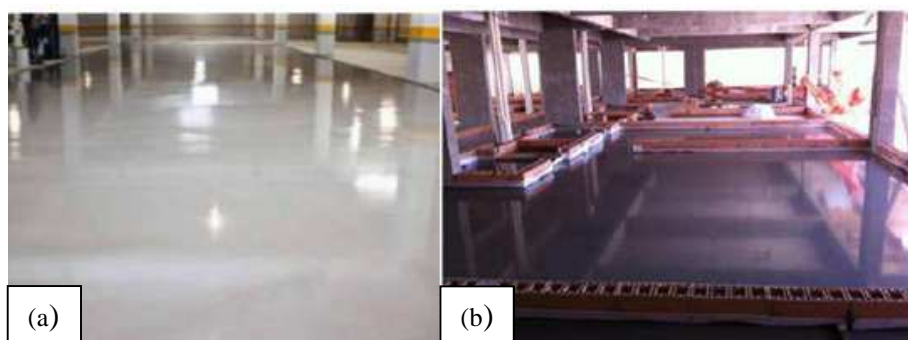


Figura 2.1- (a) Área de estacionamento com o contrapiso autonivelante industrial aplicado; (b) Pavimento com aplicação de contrapiso autonivelante, sobre manta acústica.

Fonte: Lessa e Coutinho, (2013), Houang, (2013) – Adaptado.

A maioria dos fabricantes não orienta que seja aplicado em áreas externas por conta da exposição frequente a intempéries, mas alguns admitem desde que sejam em áreas com trânsito moderado (TOMAZINI, 2018).

Na aplicação da argamassa autonivelante é necessário preparar o substrato para evitar futuras manifestações patológicas. Para evitar tais problemas, segundo Gugelmin

(2013), deve-se realizar a limpeza da laje sobre a qual a ANN será aplicada, eliminando quaisquer restos de sujeiras, resíduos, óleos, partículas soltas ou material aderido que impeça uma correta aderência do produto ao substrato.

Além disso, a Associação Nacional de fabricantes de argamassa da Espanha (AFAM) e os fabricantes de argamassa brasileiros recomendam que seja realizada a imprimação do substrato com uso de *primers* e selantes específicos. O processo promove uma ponte de aderência entre as interfaces dos materiais (CICHINELLI, 2012), selando a superfície, no caso de substratos com elevadas absorções, ou ainda, fornecendo um agente de ligação, no caso de substratos não absorventes (AFAM, 2005).

Se a taxa de absorção e porosidade da laje em que a argamassa será aplicada for muito porosa e/ou má saturada de água, pode absorver a água da argamassa autonivelante, provocando o aparecimento de fissuras no material depois de seco ou ainda o aparecimento de bolhas. Por sua vez, substratos com baixa taxa de absorção tendem a não fornecer a adesão necessária para a aderência da argamassa, causando descolamento/desplacamento (AFAM, 2005).

Pinho (2015) fez um estudo de caso da utilização de argamassa autonivelante para contrapiso em edificações. Logo após os primeiros 3 dias de aplicação começou a surgir trincas no contrapiso e alguns pontos apresentaram deslocamento. O autor concluiu que todas as manifestações patológicas apresentadas na primeira laje onde foi executado o contrapiso autonivelante serviram de alerta para as demais lajes. As manifestações patológicas ocorreram devido à falta de juntas de dilatação e não foi realizada a limpeza do pavimento antes da aplicação da argamassa.

De acordo com a AFAM (2005) a existência de juntas estruturais da edificação devem ser observadas e impostas ao revestimento autonivelante, antes de sua aplicação. Argamassa autonivelante para uso residencial/comercial deve ser colocada junta de espuma em todo o perímetro do ambiente, entre o futuro contrapiso e a alvenaria para absorver possíveis movimentos de expansão e contração do material.

As vantagens e desvantagens do uso de argamassas autonivelantes (AAN's) irão depender de fatores como o tipo de argamassa utilizada, a dosagem dos seus materiais constituintes, o tipo de cimento e o uso a que se destinam. Alguns autores citam as vantagens que a argamassa autonivelante pode oferecer (MARTINS, 2009; ALRIFAI et al., 2013; SILVA, 2016a; GOMES, GONÇALVES 2013; RUBIN, 2015; CARVALHO, 2015), dentre as quais pode-se destacar:

- Substituindo parte do cimento por adições proporcionará economia de cimento, e conseqüentemente, redução de custo e melhorará as características do produto final, incluindo as propriedades reológicas;
- É um material de construção extremamente versátil, rápido de ser instalado e que pode ser utilizado em diversos ambientes;
- Otimiza mão de obra, com a diminuição no número de trabalhadores necessários para a produção e aplicação do produto, já que dispensa o processo de desempenho e eliminação do ruído ocasionado pelo vibrador;
- Em função da velocidade de bombeamento do produto e de sua alta produtividade, reduz os prazos de execução;
- Reduz o desperdício de material quando comparada com a argamassa convencional, assim como maior controle de qualidade;
- Garante excelente acabamento devido a sua consistência fluída e elevada capacidade de se mover apenas pela ação do próprio peso, onde promove um preenchimento mais uniforme e homogêneo no local aplicado.

Dentre as principais desvantagens, podem ser mencionados (KATSIADRAMIS; SOTIROPOULOU; PANDERMARAKIS, 2010; SOUZA, 2013; GOMES; GONÇALVES, 2013; RUBIN, 2015; CARVALHO, 2015; JÚNIOR, 2016; YANG et al., 2019):

- No estado fresco da argamassa, destaca-se a segregação e a exsudação, resultante de dosagem inadequada ou erros de execução;
- A prática de engenharia mostra que a fissuração, a retração por secagem, comum em materiais de pequenas espessuras e com grande presença de finos e a retração autógena causada pela rápida perda de água e hidratação do cimento são as principais formas de dano e falha da argamassa autonivelante;
- Poucas empresas hoje têm domínio e conhecimento sobre a produção e aplicação da argamassa autonivelante;
- Falta de mão de obra especializada para a execução do serviço, de forma que a produtividade potencial máxima do produto possa ser verificada durante a obra. Neste caso, é necessário que as empresas fabricantes e usuárias do produto, que

queiram incorporá-lo na construção civil, promovam o treinamento necessário para qualificar a mão-de-obra de operários;

- Deve haver um controle na dosagem dos aditivos, pois se feita de maneira errônea, pode requerer maior tempo para cura e enrijecimento da argamassa, impedindo a liberação rápida do local. Além disso, se o contrapiso não estiver com a fluidez adequada, pode ocasionar o entupimento dos mangotes durante o processo de bombeamento da argamassa;
- Em função da sua fluidez, argamassas autonivelantes não podem ser empregadas em superfícies inclinadas;
- A falta de padronização dos equipamentos para sua aplicação e a falta de especificações técnicas, tanto de uso como de produção dessa argamassa, gera uma série de dúvidas quanto ao correto comportamento do material, desmotivando o uso do material na construção civil brasileira.

De forma geral, entende-se como AAN um fluído que apresenta as seguintes características: boa capacidade de fluxo, adensamento por ação da gravidade de forma coesa e homogênea, ou seja, sem necessitar de intervenção mecânica ou manual e uma reologia que possibilite, simultaneamente, controlar a segregação, exsudação e retração da mesma.

2.1 Influência dos materiais constituintes na argamassa autonivelante

Segundo Rubin (2015) as propriedades da argamassa autonivelante se assemelha a do concreto autoadensável (CAA). De acordo com Zhu e Bartos (2003), argamassas e concretos autoadensáveis possuem basicamente a mesma composição, pois ambos têm o mesmo princípio de adensamento por ação da gravidade. A composição segue a seguinte forma: cimento, areia, brita (agregado graúdo, para concretos), adições de finos ou materiais pozolânicos e por fim, os aditivos plastificantes, que tem como objetivo modificar a viscosidade do concreto, mantendo o material sem exsudação e segregação.

Em relação às porcentagens dos constituintes da argamassa autonivelante, é similar a da argamassa tradicional, de 25 a 45% de cimento Portland, 40 a 60% de areia quartzosa e 10 a 15% de aditivos químicos e adições minerais destinados a modificar as características reológicas e as propriedades físico-mecânicas (INÉIA, 2017).

O tipo e a proporção dos materiais constituintes influenciam as propriedades das argamassas no estado fresco e, conseqüentemente, seu desempenho no estado endurecido (CARASEK, 2007).

No entanto, para argamassa autonivelante conter reologia adequada e exercer a função de adensamento próprio, a determinação dos materiais e da dosagem, que irão compor o material precisa ser criteriosa (FREITAS et al., 2010), uma vez que a qualidade dos constituintes determina a qualidade final da pasta (TUTIKIAN, 2004).

No estudo mais recente de Lopes et al. (2018), na qual buscaram dosar AAN para contrapiso utilizando o método de Tutikian (2004) de forma adaptada, as autoras realizaram um estudo de dosagem para obter o melhor traço para a confecção dessas argamassas.

A dosagem correta dos compostos autonivelantes permite que estes apresentem as seguintes propriedades por ordem de importância: auto nivelamento, baixa viscosidade, rápido endurecimento, ganho de resistência, secagem, estabilidade dimensional, durabilidade, resistência de superfície e forte adesão ao substrato. (SEIFERT; NEUBAUER; GOETZ-NEUNHOEFFER, 2012).

2.1.1 Efeito do cimento

Cimento com diferentes composições químicas, quando hidratadas, podem apresentar diferentes propriedades. As principais propriedades físicas e mecânicas, como resistência, retração, permeabilidade, resistência às intempéries e fluência, também são afetadas por fatores além da composição do cimento, embora ela tenha grande influência na velocidade de crescimento de resistência (NEVILLE; BROOKS, 2013).

A microestrutura dos materiais de base cimentícia (MBC) é determinada essencialmente pelas reações químicas do cimento com a água, sendo influenciada por diversos fatores tais como: o tipo de cimento (em termos de composição química, mineralogia e grau de finura); a razão água/cimento; o processo de mistura; as condições de cura e a natureza, quantidade e dimensão de inertes ou outros aditivos. As reações de hidratação conferem aos MBC uma microestrutura complexa que apresenta variações locais ao nível da composição química, dimensão, morfologia e distribuição espacial das fases. Acresce que a estrutura interna sofre alterações ao longo do tempo

em resultado de processos químicos e físicos que ocorrem nestes materiais em função das condições ambientais (COSTA et al., 2009).

A finura do cimento é um fator vital que rege a velocidade da reação de hidratação do mesmo e tem também influência na qualidade da pasta, argamassa ou concreto. Entende-se que quanto maior for a finura, melhor será a resistência, particularmente na primeira idade, aumentando assim a impermeabilidade, a trabalhabilidade e a coesão, e conseqüentemente, diminuindo as chances de ocorrer a exsudação e outros tipos de segregação (BAUER, 2013). Em contrapartida, a velocidade de desprendimento do calor de hidratação, o teor de água para uma mesma trabalhabilidade, a retração e/ou risco de fissuração estão também diretamente relacionados à finura (BAUER, 2005).

O teor de cimento é outro fator que influencia diretamente nas propriedades mecânicas das argamassas, já que estas aumentam proporcionalmente a quantidade de cimento adicionada à mistura (BAUER, 2005). A consequência disso é uma maior necessidade de água para manter esta trabalhabilidade (YOUNG et al., 1998).

Os cimentos mais finos propiciam que as reações de hidratação ocorram mais rapidamente deixando o material mais suscetível ao processo de retração e o alto consumo de cimento produz materiais menos deformáveis com maior risco de fissuração (BAUER; SOUSA, 2005).

Bauer (2005) justifica que o elevado consumo de cimento aumenta o módulo de elasticidade deixando-as mais rígidas e, conseqüentemente, com menos capacidade de deformar-se sem romper, gerando um maior risco de fissuração. De acordo com Gomes e Barros (2009), todos os tipos de cimento Portland podem ser utilizados, respeitando a escolha da classe pela exigência específica de sua aplicação.

A Tabela 2.1 apresenta um resumo dos diversos tipos de cimento vendidos no mercado.

Tabela 2.1 – Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa).

Designação normalizada		Sigla	Classe de Resistência	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material Pozolânico	Material carbonático
Cimento Portland comum		CP I-S	25, 32, 40	95-100	0-5		
				90-94	-	0	6-10
Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno		CP II-E		51-94	6-34	0	0-15
Cimento Portland composto com material pozolânico		CP II-Z		71-94	0	6-14	0-15
Cimento Portland composto com material carbonático		CP II-F		75-89	0	0	11-25
Cimento Portland de alto-forno		CP III		25-65	35-70	0	0-10
Cimento Portland pozolânico		CP IV		45-85	0	15-50	0-10
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V	ARI	90-100	-	-	0-25
Cimento Portland Branco	Estrutural	CPB	25, 32, 40	75-100	-	-	0-25
	Não estrutural		-	50-74	-	-	26-50

Fonte: NBR 16697 (ABNT, 2018).

A variação que ocorre entre um tipo de cimento e outro é a quantidade de adição que é incorporada ao teor de clínquer+gesso. Os cimentos de alta resistência inicial (CPV-ARI) são compostos quase com 100% de clínquer+sulfato de cálcio, sendo permitida a incorporação de até 5% de escória, material pozolânico e carbonático. Nos cimentos Pozolânicos (CPIV), o teor de clínquer é menor, estando entre 45 a 85%, entretanto é permitido um acréscimo de até 5% de filer de calcário e também incorporação de 15 a 50% de adições pozolânicas (PEREIRA, 2018).

Para a produção da argamassa autonivelante o cimento que melhor atende as necessidades são os que apresentam reduzido teor de aluminato tricálcico (C_3A) até 10%, responsável por controlar a reologia e o enrijecimento da mistura, em função do tempo (SOUZA, 2013).

No Brasil, tem-se usado o cimento Portland composto, CP II. Ele além de ser facilmente encontrado com baixo custo em comparação a outras categorias atende as especificações da EFNARC (2002) com relação à presença de C_3A na sua composição.

A EFNARC (2002) determina ainda limites para o consumo do cimento, sendo o máximo 450 kg/m^3 para controlar a retração e mínimo de 350 kg/m^3 . A substituição de uma porcentagem de cimento por algum tipo de adição mineral em sua composição pode ser a solução para evitar ou diminuir problemas ocasionados pelo alto consumo.

2.1.2 Efeito da água

A relação água/cimento pode ser subdivida em duas partes: a primeira representa a quantidade de água necessária para a completa hidratação do cimento; e a segunda representa a quantidade de água adicional necessária para se obter uma trabalhabilidade adequada (água de trabalhabilidade) (AÏTCIN; NEVILLE, 2003).

A relação água/cimento (a/c) é um fator determinante para as propriedades reológicas da pasta, em que, quanto maior for o teor de água menor será a tensão limite de escoamento, gerando assim maior deformabilidade e acentuada diminuição de viscosidade. A água também pode gerar outro grande prejuízo, a segregação, por isso é essencial fazer uso dos aditivos superplastificantes (CAVALCANTI, 2006).

Portanto, a adição de água à argamassa para controlar o comportamento do fluxo tem que ser a última possibilidade tecnológica. Em vez disso, grandes quantidades de aditivos químicos - superplastificantes têm que ser usados para alcançar os critérios de trabalhabilidade em baixas relações a/c (KWAN; FUNG, 2012).

Diversos autores como Katsiadramis et al. (2010); Libre et al. (2010); Onishi e Bier (2010) e Turk (2012) demonstraram em seus trabalhos bons resultados utilizando a relação a/c 0,5 para a produção de AAN's. Autores como Sahmaram et al. (2006); Libre et al. (2010); Rizwan e Bier (2012); Medipour et al. (2013); Carvalho (2015) adotaram o traço 1:2 em suas pesquisas acerca da AAN. Lopes et al. (2018), por exemplo, utilizaram uma relação a/c de 0,5 na produção de AAN e testaram traços 1:1, 1:2 e 1:3, onde concluíram para a pesquisa como melhor traço o 1:2.

2.1.3 Efeito do agregado miúdo

A norma NBR 7211 (ABNT, 2009) fixa as características exigíveis na recepção e produção de agregados, miúdos e graúdos, de origem natural, encontrados fragmentados ou resultantes da britagem de rochas.

O agregado graúdo tem um efeito significativo no concreto autoadensável onde não há na argamassa. Por outro lado, as argamassas comuns têm areia mais grossa em comparação com as AAN's (CANBAZ; TOPÇU; ATEŞIN, 2016).

Tristão et al. (2005) afirma que existe uma ampla gama de areias que interferem na composição dos traços das argamassas devido às frações granulométricas e características geométricas.

Muitas propriedades dos agregados como massa específica, estrutura de poros, forma, dimensão das partículas, textura superficial e absorção, podem exercer considerável influência na qualidade do concreto fresco e endurecido (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Observa-se que a composição granulométrica influencia diretamente sobre a qualidade desses produtos, principalmente nos aspectos relativos à trabalhabilidade, compacidade e resistência aos esforços mecânicos (RIBEIRO et al., 2006). As areias finas são largamente empregadas na confecção de argamassas em função do melhor acabamento que esta proporciona, porém, esta prática compromete a resistência mecânica, inclusive a resistência de aderência, além da estabilidade de volume destas (RECENA, 2007), devido ao alto índice de inchamento, consenso na literatura, de grãos mais finos.

No trabalho de Benabed et al. (2012) apresenta um estudo experimental sobre as propriedades reológicas e mecânicas das AAN's produzidos com vários tipos de areias: areia de britagem de calcário, areia do rio, areia de dunas e uma mistura de areias diferentes. Os autores observaram que agregados com módulo de finura menores (areia de duna, com módulo de finura de 0,78), exigiam uma maior demanda de água na mistura para molhar a superfície das partículas para atingir uma elevada fluidez e viscosidade, se comparado com agregados cujos módulos de finura são maiores (areia de britagem de calcário e areia de rio, com módulo de finura de 2,21 e 2,45, respectivamente).

A areia triturada com (10-15%) de finos calcários pode ser usada com sucesso na produção de argamassa autonivelantes com boas propriedades reológicas e de resistência. No entanto, observou-se redução da resistência à compressão com aumento do teor de areia de dunas (até 50%) em argamassa com areias binárias e ternárias (BENABED et al., 2012).

De uma forma geral, para a produção de argamassas autonivelantes são utilizadas as areias naturais com granulometria fina. Pode-se notar na bibliografia que grande parte dos autores utilizaram grãos com dimensões máximas de 2mm (LIBRE et al., 2010; RIZWAN; BIER, 2012).

2.1.4 Efeitos das adições minerais

EFNARC (2002) define como finos, partículas menores que 0,125mm, incluindo as dos agregados. Mas, além de responsáveis pela resistência à segregação da mistura, os finos desempenham um papel importante para a durabilidade, tanto física quanto quimicamente.

Como as partículas são de tamanho pequeno, elas realizam um efeito filler, pois fecham poros e melhoram inclusive a zona de transição, que seria o local onde agentes agressivos penetrariam e onde provavelmente romperia o material no seu limite de carga. E caso as adições fossem pozolânicas, elas reagiriam com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) resultante da hidratação do cimento, que é um composto frágil e facilmente lixiviável, aumentando novamente a durabilidade do concreto (TUTIKIAN, 2004).

O metacaulim (M.C) e a sílica ativa (S.A) são mais finos que o cimento e, portanto, quando adicionados individualmente, preenchem os espaços vazios entre os grãos de cimento para aumentar a densidade (CHU; KWAN, 2019).

Através da adição de sílica ativa, a densidade pode ser aumentada pelo preenchimento dos poros entre os grãos de cimento. O caráter pozolânico da sílica ativa contribui ainda mais para a formação de estrutura densa e permite consumir a portlandita precipitada durante a hidratação do cimento e formar estruturas semelhantes às fornecidas pela hidratação do cimento Portland. Por outro lado, a alta superfície específica da sílica ativa pode diminuir a trabalhabilidade do material no estado fresco (FUNG; KWAN, 2010; AHARI et al., 2015; WU et al., 2016).

Bezerra et al. (2010) afirmam que a adição de metacaulim no estado fresco pode contribuir positivamente na trabalhabilidade, coesão e diminuição da exsudação. Além disso, pela elevada finura de suas partículas e alta superfície específica, o metacaulim, provoca elevada absorção de água de amassamento pelas suas partículas. Em geral, a adição de M.C pode aumentar o empacotamento se for mais fina que o cimento e melhorar a resistência e a durabilidade em virtude de sua alta reatividade pozolânica (RASHAD, 2013; AVET; LI; SCRIVENER, 2018).

O M.C contém dióxido de silício (SiO_2) e óxido de alumínio (Al_2O_3), enquanto S.A é composto principalmente por SiO_2 (CHU; KWAN, 2019). A S.A e o M.C podem reagir com a cal liberada durante a hidratação do cimento para produzir gel para a ligação das partículas sólidas na mistura de concreto. No caso do M.C, o gel produzido compõe tanto o de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) quanto o de aluminato de cálcio hidratado (CAH), enquanto que no caso da S.A, o gel produzido é principalmente o C-S-H (SABIR; WILD; BAI, 2001).

Outra grande diferença é o tamanho das partículas. O M.C pode ser retificado para diferentes tamanhos de partícula, mas geralmente é retificado para um tamanho de partícula de 2 a 11 μm , mais fino que o cimento. Por outro lado, a S.A, obtido a partir dos gases de escape, possui um tamanho de partícula menor que 1 μm (KWAN; WONG, 2008) e, portanto, é mais fino que o M.C.

A geometria das partículas também se difere. Na S.A predomina partículas esféricas que tendem a formar aglomerados arredondados, formados em função da alta energia superficial do material, observadas nas imagens de MEV (Figura 2.2), enquanto o M.C é irregular e lamelar, ocasionalmente com a presença de partículas tubulares, observando-se também partículas aglomeradas (Figura 2.3).

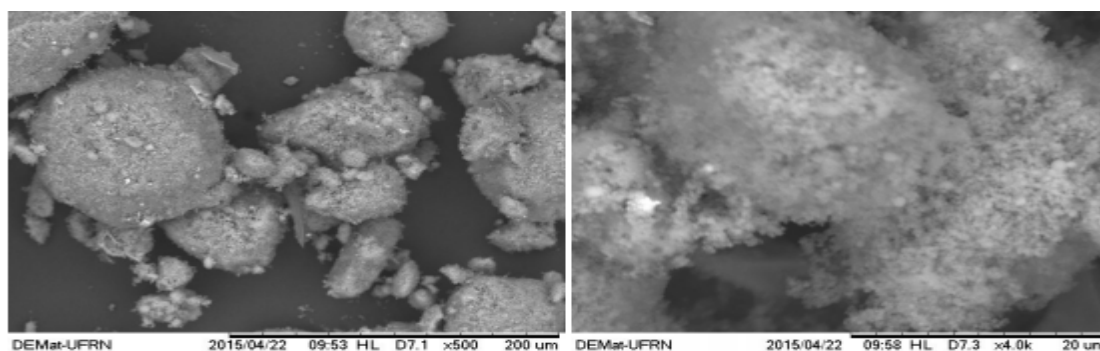


Figura 2.2 - Imagens de MEV das partículas de sílica.

Fonte: Silva (2016b)

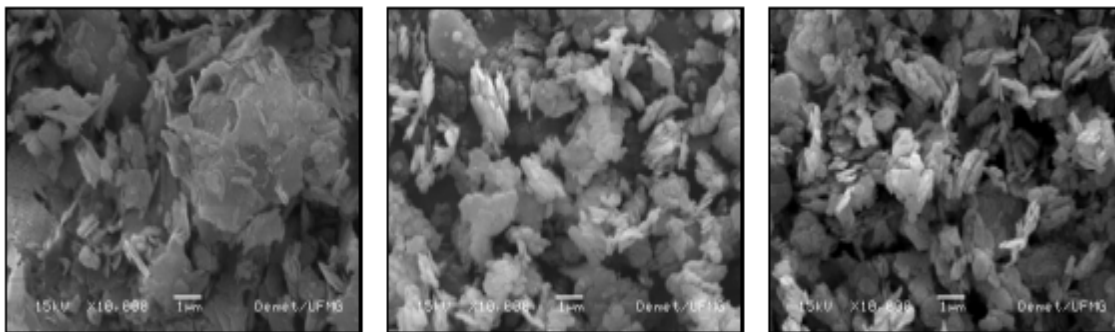


Figura 2.3 - MEV de 3 amostras de metacaulim – Ampliação 10.000X.
Fonte: Rocha (2005).

Como o S.A é mais fino que o M.C e, portanto, possui uma área de superfície específica maior, a única adição de S.A levaria a aumentos maiores na demanda de água e na demanda de superplastificante do que a única adição de M.C (CHU; KWAN, 2019).

Segundo Lacerda e Helene (2012), baseado em seus estudos sobre a influência da substituição de cimento Portland por metacaulim em concretos, o efeito *filler* diminui os teores de vazios nas misturas com metacaulim. Este efeito ocorre enquanto não se iniciam as reações pozolânicas, onde as partículas finas inertes do metacaulim preenchem os espaços existentes que seriam ocupados pelo ar.

Segundo Mehdipour et. al (2013), a adição de metacaulim em argamassas autonivelantes reduz a fluidez da mistura. No entanto, a redução desta fluidez é mais acentuada para as misturas com menor relação a/c. Isso provavelmente ocorre devido à sua elevada atividade química e a sua grande área de superfície, que resulta em alta absorção de água e conseqüentemente redução de água livre na mistura.

Por outro lado, a substituição de parte do cimento Portland por metacaulim reforça a coesão das argamassas autonivelantes, devido à área de superfície elevada que proporciona uma maior viscosidade (MEHDIPOUR et al., 2013).

As AAN's com maiores relações a/c são mais propensas à exsudação. Porém, com a adição de metacaulim, mesmo em baixos teores, não ocorre exsudação. Provavelmente, devido à elevada área de superfície específica do metacaulim que resulta em maior adsorção de água. Usando metacaulim, mesmo em baixas dosagens, a exsudação das misturas desapareceu completamente. Em amostras com relação a/c de 0,45, a exsudação de 4,5 cm foi eliminada quando 10% de metacaulim foi adicionado à mistura (MEHDIPOUR et al., 2013).

Martins (2009) estabeleceu um procedimento para dosagem de pastas para argamassa autonivelante (AAN), destacando o desempenho no estado fresco da pasta na fluidez dessa argamassa. Nesta pesquisa foram propostas diversas formulações do material contendo cimento CP V-ARI RS, adição de sílica ativa e aditivos. Os resultados de espalhamento das pastas estudadas mostraram que o aumento do teor de sílica indicou uma redução do espalhamento da pasta, resultando também em pouca segregação.

Freitas et al. (2010) também realizaram pesquisa sobre as adições e aditivos nas propriedades de AAN. O estudo propôs as adições minerais de metacaulim e cinza de biomassa da cana de açúcar, em substituição a uma parcela do cimento. O objetivo era verificar a adequação dessas adições como material pozolânico e principalmente na redução da porosidade e permeabilidade da argamassa visando maior durabilidade. Como conclusão das análises das propriedades físicas e mecânicas, os traços moldados apresentaram resultados favoráveis quanto à fluidez do material e as adições minerais utilizadas demonstraram poder pozolânico, em virtude da presença do teor de sílica com incremento da resistência à compressão, em relação ao de referência.

Rizwan e Bier (2012) analisaram o comportamento de AAN compostas por diferentes adições minerais, onde observaram que o uso independente de qualquer filler calcário ou cinza volante não foi suficiente para atingir um bom desempenho nos estados fresco e endurecido, já que em AAN exige alto teor de aditivo Sp e produz alta retração inicial.

Em contrapartida, cinzas volantes utilizadas de forma independente aumentam o tempo de início de pega, embora melhore a facilidade de adensamento e reduza a geração de calor inicial, e conseqüentemente, a retração. Os autores concluem que utilizando misturas ternárias contendo filler calcário e cinza volante, melhora o desempenho final da AAN, principalmente, quando um filler calcário ou cinzas volantes é substituído por 20% em massa de sílica ativa ou cinza de casca de arroz.

No trabalho de Souza et al. (2012) para as argamassas autonivelantes foram realizados de resistência à tração na flexão, à compressão, ao impacto e à abrasão, aderência profunda e superficial e módulo de elasticidade, na qual as autoras notaram a influência das adições, onde a maior dosagem de sílica possivelmente conduziu a uma menor aderência superficial.

O aumento da sílica ocasionou a redução na resistência à tração na flexão, mas não influenciou a resistência à compressão, uma vez que foram obtidos resultados semelhantes. A influência da sílica foi percebida nos resultados de resistência à abrasão, visto que a maior quantidade deste material acarretou a maior resistência ao desgaste (SOUZA et al. 2012).

Mehdipour et al. (2013), avaliou os efeitos das adições minerais sobre as propriedades de escoamento e estabilidade das argamassas autonivelantes. Os autores optaram pela utilização de mais de um tipo de adição mineral (misturas binárias e ternárias de cinzas volantes e metacaulim) sobre fluidez, viscosidade e estabilidade de argamassas autonivelante sujeitas a tempo de mistura prolongado.

Os resultados mostraram que substituindo o cimento Portland por cinza volante, com teores superiores a 20%, em tempos de mistura mais elevados, ocorre uma redução na trabalhabilidade das argamassas autonivelantes, principalmente para maiores relações a/c.

Ainda sobre os experimentos realizados por Mehdipour et al. (2013), foi constatado que o aumento do teor de cinza em tempos de misturas prolongadas pode causar um maior risco de instabilidade, gerando exsudação e/ou segregação. Houve um maior índice de segregação com a incorporação de cinza volante em argamassa autonivelante quando comparado com mistura composta apenas com cimento Portland. No entanto, o uso de metacaulim como adição em argamassas autonivelantes demonstrou ser eficiente para diminuir a segregação das misturas.

As amostras contendo metacaulim (10%, 20% e 30%) demonstraram alta estabilidade para ambas as relações a/c analisadas, enquanto a segregação estática foi totalmente eliminada, devido à elevada finura do metacaulim. O efeito do metacaulim para estabilizar misturas autonivelantes foi mais significativo em maiores relações a/c. Em misturas com a/c de 0,45, a substituição de metacaulim por 10% da massa de cimento, promoveu redução no índice de segregação de 160% para 16,8%, enquanto que nas misturas com a/c de 0,35, o efeito da adição de 10% de metacaulim no índice de segregação da argamassa autonivelante foi insignificante (MEHDIPOUR et al., 2013).

2.1.5 Efeito dos aditivos químicos

Para o estudo da pasta autonivelante é indispensável o uso de aditivos, que visa obter características reológicas desejadas (MARTINS, 2009). Apesar de existir uma infinidade de aditivos, os mais cruciais para a produção da argamassa autonivelante é o superplastificante (Sp) e o aditivo modificar de viscosidade (AMV) (RUBIN, 2015). Martins (2009) explica que esses dois aditivos devem ser aplicados devido o Sp garantir uma fluidez adequada e reduzir a tensão de escoamento, enquanto que o AMV irá auxiliar na estabilidade da mistura.

Embora o aditivo modificador de viscosidade deva ser utilizado apenas em argamassas autonivelantes que se apresentarem propensas à instabilidade. Portanto, a utilização deste aditivo é válida quando o conteúdo de umidade global não pode ser controlado de forma adequada, ou em misturas com os agregados mal classificados ou com baixo teor de finos (LIBRE et al., 2010).

É geralmente aceito que a influência do superplastificante na reologia da mistura de ligantes de cimento depende principalmente das características do superplastificante e do cimento e de sua interação (ou seja, a compatibilidade cimento-superplastificante). Entre eles, os seguintes podem ser listados como os mais significativos: composições químicas e mineralógicas do cimento (especialmente C_3A e conteúdo alcalino, conteúdo e tipo de sulfato de cálcio), finura do cimento (ou superfície específica), microestrutura e forma cristalina de minerais de clínquer, dosagem de superplastificante (quantidade de superplastificante adsorvido por unidade de superfície de hidratos de cimento), natureza e estrutura química e massa molecular dos polímeros superplastificantes e ordem de adição de superplastificante (YAMADA, 2009; KURDOWSKI, 2010; YAMADA, 2011).

Segundo Yamada e Hanehara (2003) a perda rápida de fluxo é uma característica das pastas de cimento com baixa adição de superplastificante ou feitas de cimentos que as consomem rapidamente. Tutikian e Dal Molin (2008) explicam que todos os tipos de cimento Portland apresentam aumento de trabalhabilidade com adição de Sp, embora a eficiência não seja a mesma para cada um deles. De forma geral, quanto maior a finura do cimento, menor a eficiência do aditivo devido à diminuição da concentração específica das moléculas absorvidas na superfície dos grãos de cimento.

Katsiadramis, Sotiropoulou, Pandermarakis (2010) reforçam que a adição de Sp não tem influência absoluta sobre a resistência mecânica das AAN's, mas sim da interação entre todos os materiais e aditivos que incorporados em sua constituição.

A função do Sp é dispersar as partículas sólidas. Tal dispersão das partículas sólidas aumentaria diretamente a fluidez. Alternativamente, no mesmo requisito de fluidez, a relação água/cimento (a/c) pode ser reduzida para melhorar a resistência e a durabilidade do concreto e argamassas (KWAN; FUNG, 2012).

Sua desvantagem é que em alguns casos o uso em excesso do Sp pode resultar em efeitos indesejados como, por exemplo, a redução da coesão ocasionando a segregação entre partículas e exsudação na mistura, e sua falta não será eficaz na dispersão das partículas (KWAN; FUNG, 2012; JAWAHAR et al., 2013; SILVA, 2016a).

Outro motivo seria em determinadas situações pode ocorrer incompatibilidade entre cimento-aditivo. A incompatibilidade pode ser resultante da variedade de Sp que existem atualmente no mercado com diferentes composições químicas, ou dos diversos tipos de cimentos que também apresentam diferentes composições mineralógicas, ou então, a utilização cada vez mais frequente das adições (cinza de casca de arroz, sílica ativa, pozolanas, escórias entre outras) (SILVA, 2016a).

Dentre todos os aditivos, após espalhamento resultante do ensaio de fluidez, o AMV é o que tem maior influência na conformidade das bordas da mistura (MARTINS, 2009). Ele reduz os riscos de exsudação e de segregação dos constituintes da argamassa durante o processo de transporte, adensamento e assentamento, até que se inicie o processo de endurecimento do material (KHAYAT; GHEZAL, 2010).

Algumas vantagens são observadas com a utilização do AMV, sendo elas (MARTINS, 2009): flexibilidade na escolha de materiais e procedimentos de lançamentos; obtenção de níveis de fluidez que fazem com que o material seja capaz de vencer grandes distâncias horizontais; melhoria da homogeneidade na mistura e permanência da coesão durante queda livre. Porém, o VMA pode ocasionar a incorporação de ar, levando a uma redução da resistência (FIORENTIN, 2011).

Otaviano (2007, *apud* Tutikian et al., 2008) complementam que é necessário também um controle quanto ao teor do modificador de viscosidade e sua compatibilização com o superplastificante para evitar problemas com retardamento da

pega, alteração no desenvolvimento da resistência nas primeiras idades, coesão excessiva e aumento da retração por secagem.

No estudo de formulações de pastas autonivelantes dosadas em laboratório por Martins (2009) foram propostas diversas formulações do material contendo cimento CP-V ARI RS, adição de sílica ativa, aditivo Sp e AMV. Após várias análises reológicas da pasta utilizando um viscosímetro e analisando as condições de uniformidade da borda do material escoado em um equipamento chamado “Cilindro Espanhol”, o autor concluiu a pesquisa obtendo uma pasta fluida e sem segregação, com teores de 0,9% de AMV e 0,5% de SP em relação à porção de cimento.

Os resultados de espalhamento das pastas estudadas, considerando-se a presença do Sp e AMV na mistura em vários teores avaliados, mostraram que o aumento do teor de sílica indicou uma redução do espalhamento da pasta, resultando também em pouca segregação.

No trabalho de Katsiadramis et al. (2010), foram analisadas as condições reológicas e mecânicas para obter uma argamassa autonivelante. Foram preparadas nove misturas diferentes adicionando uma pequena porcentagem de Sp (1%), realizando testes de flexão e compressão, enquanto sua resposta reológica veio através de testes *slump flow* e de funil em V.

Os autores observaram que a adição de uma pequena porcentagem de Sp melhorou a resposta reológica da mistura fresca, com altos valores de abatimento e menores tempos de funil em V. Isso significa uma alta deformabilidade e, portanto, uma melhor fluidez e trabalhabilidade e, ao mesmo tempo, sem qualquer aparência de segregação.

A adição de estabilizador também melhorou a resposta reológica de argamassa fresca, mas de forma combinada. Em relação aos ensaios mecânicos, os autores concluíram que a redução do teor de água levou a uma alta resistência à flexão e compressão como já era esperado e que a adição de Sp não influenciou sobre a resistência mecânica de uma argamassa endurecida.

Souza et al. (2012) analisaram formulações de argamassa autonivelante para verificar suas propriedades no estado fresco, quanto à fluidez e a condição visual do material escoado, no estado endurecido e a sua viabilidade de aplicação. Foram selecionados cimentos do tipo CP V-ARI, areia quartzosa fina, sílica ativa e aditivos Sp e VMA.

Os autores notaram a influência da redução do teor de aditivos, diminuindo a retenção de água e contribuindo para o aumento do teor de ar incorporado. Os mesmos concluíram que o maior teor de aditivos pode ter contribuído para uma maior aderência superficial, já a maior dosagem de sílica possivelmente conduziu a uma menor aderência superficial.

2.2 Reologia

A indústria da construção está prestando atenção crescente à reologia de novas suspensões cimentícias, tanto no conceito quanto nas aplicações. De fato, a medição das propriedades reológicas de compósitos cimentícios frescos tornou-se tão importante quanto à identificação de propriedades do estado endurecido. Essa importância é destacada não apenas por sua importância no controle de qualidade, mas também pela solução de desafios nos processos de produção e fabricação (FERRARA et al., 2012).

Entender o comportamento do fluxo de argamassas é essencial para projetar seu comportamento de assentamento, revestimento ou reparo em edifícios. Uma fluidez adequada pode aumentar a área de contato da argamassa com o substrato onde ela é aplicada, tornando os sistemas mais estáveis e duráveis (STOLZ; MASUERO, 2018).

Bingham definiu reologia como estudo da deformação e fluxo da matéria. A reologia é uma ferramenta utilizada para descrever o comportamento de fluxo, espessamento, perda de trabalhabilidade, estabilidade e, até mesmo, a compactabilidade baseada na suspensão de partículas em pastas, argamassas e concretos. Para aplicar esta ferramenta deve-se conhecer parâmetros importantes tais como a tensão de escoamento (τ_0) e a viscosidade plástica (μ), para desta forma, poder avaliar os parâmetros que dizem respeito à reologia (WALLEVIK; WALLEVIK, 2011).

Uma tensão de escoamento “verdadeira” é a tensão de cisalhamento exigida por um material elástico-viscoso para iniciar uma deformação plástica. É a tensão máxima de cisalhamento sob a qual o material permanece em um estado estático. Um material deve superar a tensão de escoamento para transformar o comportamento sólido em líquido. Viscosidade é a resistência de um material ao escoamento e descreve o comportamento do material em um estado dinâmico (LU; WANG, 2011).

O comportamento reológico é influenciado pela microestrutura das partículas. A microestrutura é uma função das ligações físico-químicas e as interações

inter/intramolecular, que afeta fundamentalmente o fluxo característico do material, alterando os parâmetros reológicos, como por exemplo, viscosidade e tensão de escoamento (SAKANO, 2016).

Martins (2009) considera a argamassa autonivelante como uma mistura do tipo sólido-líquido, na qual as partículas estão dispersas de forma relativa e uniforme através do meio líquido. Costa (2007) afirma que essa concentração de sólidos pode influenciar o seu desempenho reológico.

No estado fresco, a argamassa é uma suspensão multifásica heterogênea com grande extensão granulométrica, em que partículas maiores que 100 μm (agregados) estão imersas em uma matriz aquosa de partículas menores que 100 μm (finos) (ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, 2011). Quando submetida a condições de cisalhamento, a fração grossa (areia) da argamassa é predominantemente submetida a fenômenos de atrito e escoamento em massa (atrito e impacto), enquanto a fração fina (<100 μm) é afetada por fenômenos de superfície e reações de hidratação (CARDOSO; JOHN; PILEGGI, 2009).

Com o passar do tempo, principalmente devido à reação do cimento com a água, o comportamento deste material muda, passando do fluido para o estado sólido elástico (endurecido). Este comportamento é um resultado de vários fenômenos, tais como dissolução, aglomeração, precipitação de fases de ligantes hidratados, mudanças no pH e o efeito de quaisquer aditivos (CARDOSO; JOHN; PILEGGI, 2009).

Dessa forma, pode-se considerar as argamassas como um sistema complexo, em que atuam forças de diferentes naturezas e que, devido a sua heterogeneidade intrínseca, ainda estão sujeitas à separação de fases. O fluxo diferencial entre as fases (principalmente sólido-líquido) pode ser gerado pelas solicitações impostas durante os diversos momentos do processamento das argamassas no estado fresco, seja em etapas de espera, transporte e aplicação prática do material, ou mesmo durante o ensaio de caracterização reológica (CARDOSO et al., 2015).

Embora a reologia esteja relacionada com o fluxo e a deformação de matéria, incluindo líquidos, sólidos e gases, o termo reologia é principalmente usado para se referir ao estudo de fluidos. Os objetos de estudo em reologia são materiais que apresentam propriedades reológicas, ou seja, elasticidade, plasticidade, viscosidade, relaxação e redução da resistência em longo prazo, que são características presentes em todos os corpos reais (SAKANO, 2016).

As propriedades reológicas de cada material são manifestadas em diferentes maneiras e dependem do estado de tensão e deformação em que o corpo já se encontra, das suas características físicas e químicas, e de fatores como tensão, tempo, temperatura e pressão (SAKANO, 2016).

Avaliando a reologia dos sólidos, o parâmetro mais importante é a deformação elástica, enquanto que na reologia dos fluidos o parâmetro de maior interesse deve ser a viscosidade (DIAZ; VENDRUSCOLO; VENDRUSCOLO, 2004).

No estudo de argamassas, a viscosidade é o parâmetro crucial para a compreensão de seu comportamento reológico (ROMANO; PILEGGI, 2012). Todavia, a propriedade reológica de interesse em materiais que não podem ser diferenciados em sólidos ou fluidos com precisão é a viscoelasticidade (REIS, 2008).

Apesar da maioria das teorias de reologia, qualitativas ou quantitativas, tratar de fenômenos reversíveis, a irreversibilidade é geralmente encontrada (CASTRO, 2007). A reversibilidade e a irreversibilidade são fenômenos vinculados às propriedades reológicas de uma substância exibindo mudanças consideráveis com o tempo ou com uma de formação prolongada (CASTRO, 2007; REIS, 2008).

Por serem compostos de altas concentrações de partículas, que interagem intensamente, as argamassas apresentam comportamento reológico diferente do modelo ideal de Newton (CARDOSO; JOHN; PILEGGI, 2009).

2.2.1 Classificação reológica

A classificação dos fluídos segundo seu comportamento reológico é apresentada na Figura 2.4.

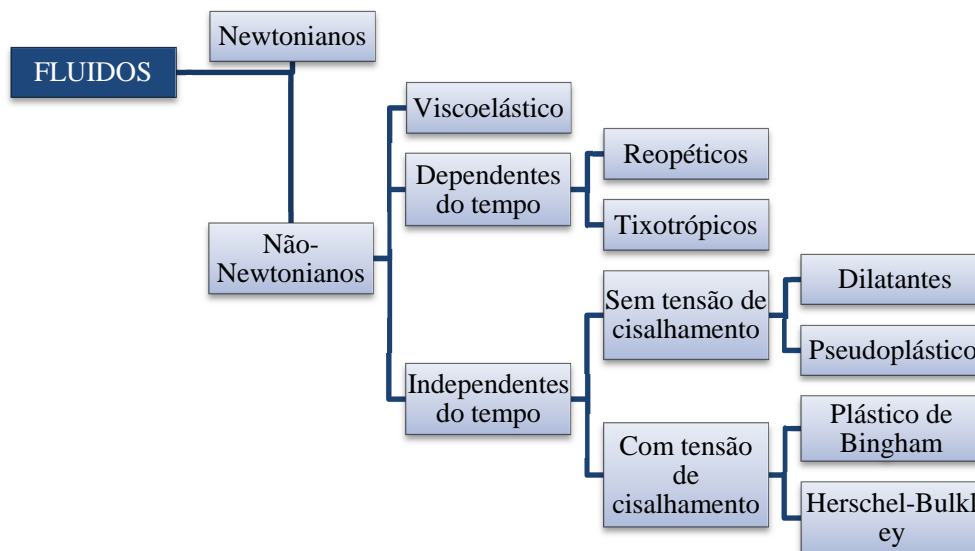


Figura 2.4 - Representação esquemática para definição de viscosidade segundo modelo de Newton.
Fonte: Martins (2009) - Adaptado.

As argamassas podem ser classificadas quanto à relação entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento (SILVA, 2003):

- Fluidos Newtonianos: apresentam comportamento linear com a tensão aplicada, não dependendo da taxa de cisalhamento;
- Fluidos Não-Newtonianos: a viscosidade depende da taxa de cisalhamento, podendo aumentar ou diminuir, ou ainda, no caso da taxa de cisalhamento constante, variar com o tempo, podendo ser viscoelásticos, dependentes do tempo e independentes do tempo de cisalhamento.

Os fluidos viscoelásticos são os que apresentam comportamento de sólido por ter elasticidade e de líquido de modo a mostrar viscosidade, ou seja, retornam parcialmente ao seu formato original quando a tensão exercida é removida (MELO, 2015). Fluidos dependentes do tempo têm comportamentos que oscilam com o tempo de aplicação da tensão de cisalhamento, podendo ser considerados tixotrópicos, cuja consistência

depende tanto da duração do cisalhamento quanto da taxa de cisalhamento (MARTINS, 2009).

Sua viscosidade diminui com o tempo sob uma taxa de cisalhamento constante, sendo que se tornam mais fluidos com o aumento do tempo de escoamento sob condições estacionárias ou reopéticos, que quando há um aumento de viscosidade com o tempo sob uma taxa de cisalhamento constante, ou seja, o material exhibe maior resistência ao escoamento com o aumento do tempo de escoamento quando sujeito ao cisalhamento sob condições estacionárias (MARTINS, 2009).

Os fluidos independentes do tempo sem tensão de cisalhamento inicial são fluidos que não necessitam de tensão de cisalhamento para que haja escoamento. Subdivide-se em dilatantes onde apresentam um aumento de viscosidade aparente com aumento da taxa de cisalhamento e pseudoplásticos, na qual a viscosidade decresce com o aumento da taxa de cisalhamento em escoamentos cisalhantes estacionários (MELO, 2015).

Os fluidos independentes do tempo com tensão de cisalhamento inicial são fluidos que necessitam de uma tensão de cisalhamento inicial para começarem a escoar (MELO, 2015). Dentre os fluidos desta classe se encontram Herschel-Bulkley, em que a maioria destes materiais tem uma relação não linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, o que repercute diretamente sobre a viscosidade (BARBOSA et al., 2011).

E plásticos de Bingham, que segundo Martins (2009) são os fluidos que quando as forças externas são suficientemente fortes para superar as forças de ligação entre as partículas em que a estrutura entra em colapso, ocorrendo uma mudança de posição irreversível, isto é, o sólido modifica-se em um líquido. As argamassas autonivelantes podem ser consideradas como fluidos de Bingham.

Muitos materiais podem ser modelados como fluidos não-newtonianos, notadamente os materiais à base de cimento. Ainda que ditos complexos em seu comportamento reológico, muitos comportamentos de pastas, argamassas e concretos podem exhibir uma reometria binghamiana (BARBOSA et al., 2011), sendo caracterizadas por uma tensão de escoamento e uma viscosidade plástica.

Descrever o comportamento reológico das argamassas como fluidos Bingham significa que o material atua como um corpo rígido sob baixas tensões, mas flui, como um fluido viscoso, com alta tensão tendo uma relação linear entre tensão de

cisalhamento e taxa de deformação quando a tensão de cisalhamento limiar é excedida (PAIVA et al., 2009).

Benabed et al., (2012) expõem que a argamassa começa a fluir quando a tensão de escoamento é excedida. Uma vez que começa a fluir, a tensão de cisalhamento aumenta linearmente com um aumento na tensão, conforme definido pela viscosidade plástica, como uma medida da facilidade do fluxo.

O comportamento do fluido Bingham é descrito por plasticidade e viscosidade. O modelo de Bingham é expresso pela Equação 2.1, onde τ é tensão de cisalhamento, τ_0 é tensão de escoamento, μ é viscosidade e $\dot{\gamma}$ é a taxa de cisalhamento (FERRARIS, 2001).

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} \quad (2.1)$$

Na Figura 2.5 pode-se observar como são expressos os modelos reológicos dos fluidos.

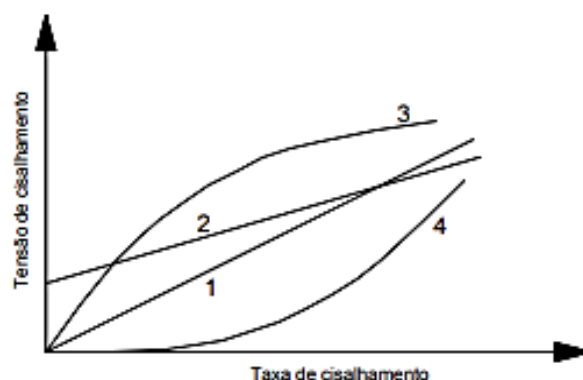


Figura 2.5 - Comportamento da tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento (Modelos: 1 – Newtoniano, 2 – Bingham, 3 – Pseudoplástico e 4 - Dilatante).
Fonte: SOUSA; BAUER (2002)

2.3 Propriedades da argamassa autonivelante no estado fresco

Algumas propriedades responsáveis pela qualidade final do material precisam ser analisadas antes de seu processo de endurecimento, isto é, no estado fresco. Algumas dessas características que podem comprovar a sua qualidade no estado fresco são a trabalhabilidade, a coesão, o teor de ar, a segregação e a exsudação, dentre outros, pois se entende que basear apenas pelos resultados isolados de resistência não é

suficiente para garantir um bom desempenho do concreto e/ou argamassa, necessitando serem também verificados outros fatores, que vão desde a dosagem adequada até a sua cura (BARBAR, 2016).

Para garantir a autoadensabilidade e a qualidade no estado endurecido, a argamassa autonivelante em seu estado fresco deverá possuir algumas propriedades específicas (MARTINS, 2009; SOUZA et al., 2012).

É considerado um material autoadensável com um ótimo desempenho quando o mesmo possui uma combinação de propriedades como fluidez, coesão, trabalhabilidade, compatibilidade entre cimento-aditivos e viscosidade, que deverão ser trabalhadas em conformidade (EFNARC, 2002).

Uma das características mais observadas no estado fresco é a trabalhabilidade, que deve ser adequada para a execução do revestimento, com o objetivo de garantir o seu desempenho quanto à aderência ao substrato (CARASEK, 2007).

Para conseguir uma boa trabalhabilidade, Neville e Brooks (2013) comentam que a área superficial da partícula, o volume aparente, o conteúdo vazio, a possibilidade de segregação e o teor de finos do agregado devem ser considerados.

Além da granulometria, a forma e a textura das partículas também influenciam o estado fresco. Quando não há uma trabalhabilidade adequada na AAN pode gerar efeitos desfavoráveis, como dificuldade de auto nivelamento, o que irá resultar em uma argamassa com maior índice de vazios, e conseqüentemente, menor resistência mecânica e durabilidade (CARVALHO, 2015).

Pode-se levar em consideração que as reações de hidratação, o tempo de pega e a capacidade de retenção de água das argamassas, influenciam na capacidade de manter a fluidez e trabalhabilidade ao longo do tempo, que varia em função da composição e propriedades dos materiais utilizados na mistura (CHAVES, 2019).

Outro fator é a viscosidade que requer certo controle, pois uma argamassa muito viscosa dificulta o mesmo a passar pelos obstáculos, dificultando seu próprio espalhamento. No entanto, se a viscosidade for muito baixa a estabilidade da mistura pode ser afetada ocorrendo exsudação e segregação (MARTINS, 2009).

Por isso, a fim de evitar a segregação, mas que ao mesmo tempo mantenha uma adequada trabalhabilidade, os materiais com características autonivelantes devem ter um limite de elasticidade ou viscosidade. A estabilidade das AAN's pode ser afetada pela

dosagem inadequada dos seus componentes ou pelo método de aplicação (LIBRE, et al., 2010; MEHDIPOUR et al., 2013).

Mehdipour et al. (2013) afirmam que quando se precisa de misturas com elevada fluidez pode-se incorporar metacaulim na composição para que sejam eliminados sinais de instabilidade e quando a falta de fluidez não é muito grande a utilização de *filler* calcário ou cinza volante pode ser igualmente eficaz (LIBRE et al., 2010).

Já o aditivo Sp age diretamente na fluidez da mistura, pois promove a dispersão das partículas, ou seja, o afastamento das mesmas, permitindo assim que a mistura aumente a fluidez. Porém, ressalva-se que seu uso tem um limite, pois o uso em excesso causará a exsudação da água e a segregação da mistura (SILVA, 2016a).

Na autoadensabilidade da AAN, a tensão de escoamento deve ser baixa para garantir o aumento da fluidez, já à viscosidade deve ser moderada para que ocorra a estabilidade necessária (GOMES, 2002).

No Quadro 2.1 é apresentada por Banfill (1994) a influência dos materiais que afetam a reologia das argamassas, os quais apresentam efeitos mais representativos do concreto.

Quadro 2.1 - Efeitos de diferentes materiais sobre a reologia das argamassas.

Ação	Efeito	
	Tensão de escoamento	Viscosidade plástica
Aumento no volume de água	Redução	Redução
Aumento na quantidade de agregado miúdo	Aumento	Aumento
Aumento na quantidade de cimento	Aumento	Aumento
Aumento na finura do agregado miúdo	Aumento	Aumento / Sem efeito
Emprego de aditivo plastificante	Redução	Sem efeito
Emprego de aditivo incorporador de ar	Sem efeito	Redução
Substituição de parte do cimento por cinzas volantes	Redução	Redução
Substituição de parte do cimento por sílica ativa	Aumento	Redução

Fonte: Banfill (1994).

2.3.1 Ensaios no estado fresco

2.3.1.1 *Mini slump*

No concreto o ensaio é realizado no cone de Abrams, utilizado também para medir o abatimento, já em pastas e argamassas esse ensaio é denominado *mini slump* e

utiliza-se um tronco de cone (Figura 2.6) com dimensões reduzidas, de acordo com as prescrições da EFNARC (2002).



Figura 2.6 - Tronco de cone utilizado no ensaio de espalhamento.
Fonte: EFNARC (2002)- Adaptado por Chaves, (2019).

O ensaio de espalhamento constitui no preenchimento de um mini tronco de cone, o qual deve ser retirado para que a argamassa possa se espalhar livremente sob seu peso próprio. Em seguida, são medidos dois diâmetros ortogonais (CARVALHO, 2015).

Segundo Martins, (2009) as medidas para argamassa autonivelantes devem ser medidas de acordo com sua fluidez, portanto não deve ser avaliada de forma padrão no que se refere aos ensaios consistência, sendo assim deve ter uma metodologia própria para avaliar este material quanto homogeneidade na mistura, coesão entre partículas e fluidez adequada. Os critérios de aceitação sugeridos pela EFNARC (2002), para experimentos de espalhamento em argamassas autoadensáveis, varia entre 24 e 26 cm. É importante ressaltar que os tamanhos dos moldes de mini *slump* encontrados na literatura possuem volumes diferentes, o que altera o valor do espalhamento obtido.

Na Tabela 2.2 e Figura 2.7 apresentam-se um apanhado com os resultados de espalhamento para diferentes tamanhos de moldes.

Tabela 2.2 - Referência bibliográfica espalhamento mini *slump*.

Autores	Ano	Medida do espalhamento (mm)	Slump utilizado no ensaio (cm³)
EFNARC	2002	240 a 260	1375,32
Pera e Ambroise	2004	250 a 300	1266,26
Georgin et al.	2008	250 a 270	1375,32
Martin	2009	250 a 350	1375,32
Katsiadramis et al.	2010	240 a 260	1375,32
Barluenga e Olivares	2010	250 a 270	1375,32
Rizwan e Bier	2012	>260	1375,32
Jawaher et al.	2013	271 a 300	1375,32
Carvalho	2015	240 a 275	1375,32
Araújo et al.	2015	250 a 370	1375,32

Fonte: Hamoy (2017).

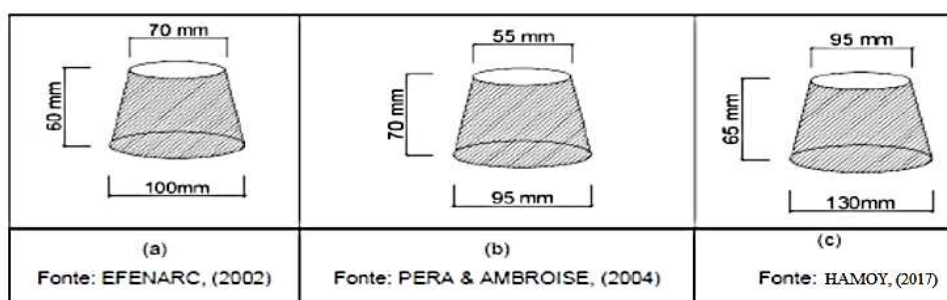


Figura 2.7 - Referência bibliográfica de espalhamento do mini *slump*.

Fonte: Hamoy (2017).

Katsiadramis et al. (2010), por exemplo, observaram que a adição de uma pequena porcentagem de SP melhorava a resposta reológica da argamassa fresca dando altos valores de espalhamento e pequenos tempos de funil-V, trazendo alta deformabilidade e, portanto, melhor fluidez, trabalhabilidade e, ao mesmo tempo, sem qualquer aparência de segregação.

Carvalho (2015) constatou com o ensaio de espalhamento o teor de aditivo ótimo para um espalhamento em conformidade com as exigências necessárias em AAN's. O autor, após analisar os resultados de dosagem, concluiu utilizar substituições de *filler* em teores de apenas 10% e 15%, uma vez que as misturas com 20% de substituição se apresentaram mais propensas à segregação, além de proporcionarem menores valores de espalhamento.

Resultados similares foram encontrados por Benabed et al., (2012). Os autores concluíram que o teor de *filler* calcário (FC) influenciava no ensaio de espalhamento e o *filler* calcário apresentava melhores respostas em porcentagens de 10 e 15% de substituição do cimento.

Tal fato pode ser explicado pelo aumento da finura e à área superficial específica dos *fillers*, pois com o aumento do teor de finos torna-se necessário mais água para molhar a superfície das partículas e manter a mesma fluidez.

Além da análise quantitativa, ao mesmo tempo em que se realiza a execução das medidas de diâmetro de espalhamento, são avaliadas visualmente a uniformidade e as condições de borda e existência de segregação e exsudação (MARTINS, 2009).

Nos estudos de Silva (2016a), a autora destaca que a análise visual das bordas da argamassa podem se apresentar altas ou baixas, fluidas em excesso ou não, com ou sem forma definida, e também se pode identificar a presença de sólidos aglomerados.

Segundo Martins (2009) a mistura escoada com pequenas espessuras (altura) de borda tendem a segregação, enquanto que bordas com espessuras mais altas dão indícios de maior coesão da mistura, logo menor probabilidade de segregação.

Na Figura 2.8 e 2.9, mostram as duas condições que caracterizam a existência ou não de segregação da argamassa segundo critérios de Martins (2009) e seguida por autores como Souza et al. (2012), Silva (2016a) e Nenevê (2017).

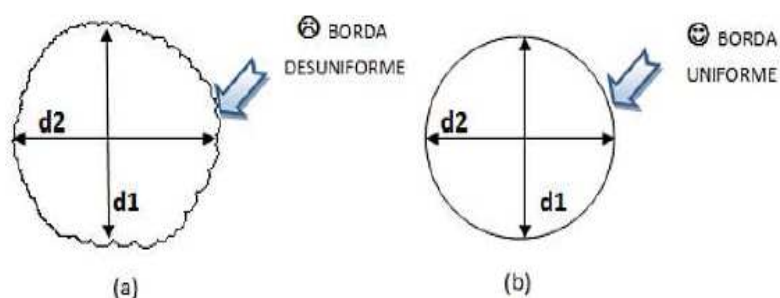


Figura 2.8 - À esquerda (a), uma argamassa com borda desuniforme devido a processos de segregação e exsudação; e à direita (b), uma argamassa com borda uniforme.

Fonte: MARTINS (2009).



Figura 2.9 - Análise visual da argamassa escoada. (a) Argamassa sem tendência à segregação, (b) Argamassa com tendência à segregação.

Fonte: MARTINS (2009).

2.3.1.2 Mini funil-V

O teste de escoamento no Funil em V consiste em mensurar o tempo que uma amostra necessita para fluir completamente em uma caixa em forma de V, medindo a capacidade de escoamento do CAA (SAFIUDDIN et al., 2011).

Em AAN, é utilizado um equipamento em versão reduzida para argamassas com dimensões de 270 mm e 30 mm de largura na extremidade, 30 mm de espessura e 300 mm de altura, com a base do funil fechada. A EFNARC (2002) determina que esse escoamento deva atender ao requisito de 7 a 11 segundos.

Na Figura 2.10 está representado o mini funil-V conforme as dimensões adaptadas para argamassa autonivelante.

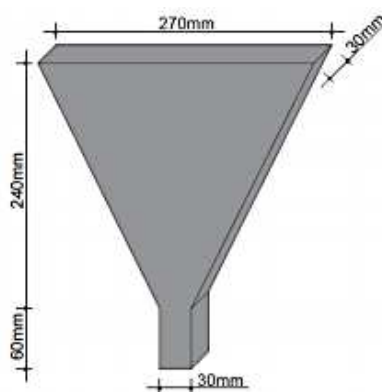


Figura 2.10 - Dimensões do mini funil-V.

Fonte: EFNARC (2002)- Adaptado por Chaves, 2019.

Caso estes parâmetros não sejam atendidos pela argamassa, a EFNARC (2002) recomenda realizar nova dosagem (relação água/material seco) ou ainda acrescentar aditivos químicos para regular essa viscosidade (RUBIN, 2015).

Em um estudo realizado por Safiuddin *et al.*, (2011), os autores descrevem que neste ensaio um tempo de escoamento mais curto sugere uma viscosidade mais baixa, enquanto que um escoamento prolongado indica susceptibilidade de bloqueio da mistura.

No trabalho de Turk (2012) investigou os efeitos do uso de materiais cimentícios suplementares em misturas binárias e ternárias sobre as propriedades frescas e endurecidas de argamassas autoadensáveis, cuja argamassa de referência incluiu apenas Cimento Portland, enquanto as misturas binárias incorporadas (CP + Cinza volante, CP + Sílica ativa) e misturas cimentícias ternárias (CP + Cinza volante + Sílica ativa). As argamassas com misturas binárias de cinza volante apresentaram os maiores tempos de fluxo do funil V. O autor observou a partir dos resultados, que a fluidez das argamassas reduziu com o aumento da quantidade de cimento substituído por cinza volante. No entanto, o uso de misturas cimentícias ternárias de sílica ativa e cinza volante reduziu esse efeito.

Turk (2012) concluiu que a incorporação de sílica ativa com cinza volante em misturas ternárias em geral melhorou o tempo de funil V das argamassas com misturas cimentícias binárias de acordo com os critérios de aceitação sugeridos pelo EFNARC.

Benabed *et al.*, (2012) em seu trabalho concluiu que o tempo de fluxo do funil em V tem uma relação direta com a viscosidade, pois o aumento no tempo de fluxo do funil em V aumenta a viscosidade da argamassa.

2.3.1.3 Tempo de Retenção de fluxo

A norma americana C 1708 (ASTM, 2016) apresenta alguns métodos de ensaios próprios para avaliação das AAN's, como o ensaio de tempo de retenção de fluxo e o tempo de cura/cicatrização.

O ensaio de retenção de fluxo avalia a perda de trabalhabilidade das AAN's ao longo do tempo. Ou seja, se a fluidez diminuir ao longo do tempo o material terá seu nivelamento comprometido (SILVA, 2016a).

De acordo com esta norma, a mesma recomenda utilizar um equipamento denominado "anel de fluxo", que apresenta dimensões com diâmetro interno de 50 mm e altura de 30 mm, apresentada na Figura 2.11.



Figura 2.11 - Equipamento para a realização do o ensaio de retenção de fluxo.
Fonte: Guimarães (2013).

Através deste ensaio, é possível observar a capacidade de manter a fluidez, ao longo do tempo determinado para análise, que é um fator resultante das reações de hidratação e da capacidade de retenção de água das argamassas (SILVA, 2016a).

De forma análoga ao ensaio de consistência, é medido o diâmetro de espalhamento da argamassa, após sua mistura, em tempos de 20 min e 30 min. Em casos de argamassas com menor trabalhabilidade, esse intervalo de tempo pode ainda ser reduzido (RUBIN, 2015).

Diversos produtores de argamassas autonivelantes como a Laticrete que é uma empresa americana, e as empresas brasileiras Weber e Votorantim, apresentam na ficha técnica de seus produtos que o tempo de manuseio limite é de 30 min (SILVA, 2016a).

No Estudo de Mehdipour et al. (2013) foram avaliadas para diversas formulações de argamassas autonivelantes a retenção de fluxo, e o comportamento comum para todas formulações, na qual constataram que a taxa de escoamento aumentava até o 30 min de ensaio e depois se estabilizava. Este resultado pode explicar o tempo limite de manuseio apresentado pelos produtores de argamassas autonivelantes.

2.3.1.4 Densidade de massa e teor de ar incorporado

A densidade de massa, ou a massa específica, corresponde à relação entre a massa do material e o seu volume, podendo ser absoluta (desconsiderando-se os vazios existentes) ou relativa (MELO, 2012). Ottoni (2017) diz que os vazios que estão

presentes na argamassa, contêm ar aprisionado ou espaços, durante o processo de mistura, ou deixados pela evaporação do excesso de água de amassamento. Essas duas propriedades interferem em outras propriedades das argamassas no estado fresco.

À medida que a densidade diminui, a argamassa se torna mais leve e com melhor trabalhabilidade, reduzindo o esforço do operário e contribuindo para o aumento da sua produção (ALVES, 2002; BEZERRA, 2010). Diante da presença do ar incorporado nas argamassas, há um ganho de consistência e plasticidade. Este ganho se deve ao “efeito ponte” existente entre as bolhas de ar e as partículas de cimento e, provavelmente da areia (ALVES, 2002).

Carasek (2007) explica que, em relação à densidade de massa, as argamassas podem ser classificadas como leves (densidade de massa menor que 1,40 g/cm³), normais (densidade entre 1,40 g/cm³ e 2,30 g/cm³) e pesadas (densidade acima de 2,30 g/cm³).

Todavia, uma argamassa com menor densidade de massa e um teor de ar muito elevado, embora melhore a trabalhabilidade, pode ser prejudicial reduzindo a resistência mecânica e a aderência da argamassa, devido à reduzida ligação entre pasta/agregado, ou seja, ao grande número de vazios (BAHIA; SABBATINI 2008; KANNING, 2013).

O teor de ar incorporado está relacionado ao volume de ar aprisionado ou incorporado na argamassa e/ou concreto e expresso em porcentagem do volume total do material em estado fresco (HAMOY, 2017). O controle do teor de ar é essencial no controle da qualidade do material para verificar tanto os limites máximos e mínimos desejáveis de ar incorporado quanto para identificar teores de vazios de ar no concreto (BARBAR, 2016).

O teor de ar incorporado, além de prejudicar na resistência, contribui para o impedimento da passagem de água para o interior da argamassa pelo fenômeno da capilaridade, pois as bolhas de ar podem interromper parte dos poros capilares da argamassa (FREITAS, 2010).

2.3.1.5 Tempo de cura

O ensaio de tempo de cura ou tempo de cicatrização é prescrito pela norma C 1708 (ASTM, 2016) (capacidade da argamassa em voltar ao seu estado original de nivelamento, sem apresentar deformações, após sofrer alguma vibração) deve fornecer

um tempo em aberto suficiente a ponto de não comprometer a aplicação e o acabamento da mesma (RUBIN, 2015).

O ensaio consiste em realizar cortes em até 10 minutos a partir do momento de início da mistura e continuar fazendo cortes como na Figura 2.12 a cada 5 minutos, até que o material não cure mais. O tempo de cura é determinado após curar durante a noite e avaliar se há algum recuo ou crista no corte.



Figura 2.12 – Exemplo de corte na amostra de argamassa.
Fonte: C 1708 (ASTM, 2016).

Não existem parâmetros de valores mínimos e máximos na norma, mas de acordo com Cichinelli (2012) o tempo em aberto da AAN pode variar entre 15min a 20min.

2.3.1.6 Determinação da exsudação

A exsudação é uma característica extremamente importante na avaliação do proporcionamento de compósitos cimentícios, uma vez que exerce influência direta na durabilidade dos materiais (SILVA, 2016a). O ensaio para a determinação da quantidade de água que exsuda é descrito pela NBR 15558 (ABNT, 2008), mas como é direcionada a amostra de concreto fresco, para determinar a taxa de exsudação das misturas de argamassas autonivelantes é necessário adaptar para tal material (RUBIN, 2015).

Como o método é indicado para concretos, Rubin (2015) adaptou buscando reduzir a quantidade necessária de material para a realização do ensaio. Além disso, dispensou a compactação do material no molde, devido sua fluidez.

Para o ensaio é necessário encher o molde (Figura 2.13) e fechar com filme plástico, a fim de evitar a perda de água do material para o ambiente, e em seguida, em intervalos de 10min em 10min, durante o período de 01h30min (tempo em que as argamassas passam após esse período a apresentar mudanças de estado fluído para sólido) recolhe-se com auxílio de um conta-gotas, a água que exsuda da mistura, para posterior cálculo (RUBIN, 2015).



Figura 2.13 - Molde adaptado para o ensaio de exsudação.
Fonte: Rubin (2015).

Rubin (2015) concluiu que nenhuma das argamassas autonivelante apresentaram exsudação de água da mistura, decorrente do rápido enrijecimento do material e perda de trabalhabilidade das misturas com o passar do tempo, além das misturas apresentarem elevado teor de finos e (provavelmente) aditivos químicos que auxiliaram na coesão do material, diminuindo a exsudação de água das misturas.

No estudo de Hamoy (2017) teve por objetivo formular misturas de argamassas autonivelantes que apresentassem características reológicas adequadas. No ensaio de determinação de exsudação, a autora concluiu que as argamassas que apresentaram melhores resultados foram os traços ASF e BSF, com quantidades de água exsudada praticamente desprezível, entre 0,15% a 1%, em razão do alto teor de finos e uso moderado de aditivo espessante que contribuem para a coesão do material.

Segundo Oliveira (2019) poucos autores utilizaram este ensaio para a caracterização de AAN's, provavelmente, por ser uma adaptação de uma norma para a análise de concretos realizada por Rubin (2015).

2.4 Propriedades da argamassa autonivelante no estado endurecido

De acordo com Souza et al. (2012) as principais propriedades no estado endurecido são a resistência mecânica, ao impacto e à abrasão, além da aderência superficial e profunda.

A porosidade também é uma propriedade importante para AAN, sobretudo se o material for aplicado para piso acabado, uma vez que a superfície estará em contato direto com o meio externo, facilitando o ataque de agentes agressivos, seja pela limpeza do piso, intempéries, ou desgaste por abrasão devido ao tráfego de equipamentos, ou maquinários, e pessoas. Deste modo, é necessário que os pisos apresentem pouca porosidade (SILVA, 2016a), que pode ser obtida facilmente através das adições que permitem o refinamento de poros (PARANDE et al., 2008; SILVA, 2016a).

Outra propriedade que merece destaque é o módulo de elasticidade, pois está ligada aos fenômenos patológicos de argamassas, em especial as fissuras (SILVA; CAMPITELI, 2008). As fissuras são os principais indicativos do processo de retração que está relacionada a muitos problemas de durabilidade dos materiais, como por exemplo, facilitar o ataque de agentes agressivos ao material (ONISHI; BIER, 2010).

Em AAN's, a retração é ocasionada pelas reações de hidratação de cimento, tensão superficial da água e variações de volumes do material do estado plástico ao endurecido (ONISHI; BIER, 2010). Girotto (2012) aponta algumas características que, de modo geral, podem conduzir à retração dos compósitos cimentícios: geometria da estrutura, dosagem do material e condições climáticas.

O teor de ar incorporado nas argamassas, apesar de favorecer a sua trabalhabilidade, atua de forma desfavorável em relação às resistências mecânicas (MANSUR, 2006). A presença do ar afeta a capacidade da argamassa se deformar e tem influência direta na energia de lançamento (SILVA, 2006).

Segundo a UNE EN 13813 (2002) - norma europeia para pastas autonivelantes - prescreve as características e especificações desejadas de acordo com o material aglomerante das mesmas, classificando e enumerando os ensaios físico-mecânicos aplicáveis para cada tipo de pasta.

Na Figura 2.14 podem ser observadas as principais características de acordo com suas normas.

Materiais das pastas	Resistência à compressão	Resistência à flexão	Resistência ao desgaste "Bohme"	Resistência ao desgaste "BCA"	Resistência ao desgaste por rodadura	Dureza superficial	Resistência à penetração	Resistência ao desgaste por rodadura em solo	Tempo de pega	Retração e inchamento	Consistência	Valor de Ph	Módulo de elasticidade	Resistência ao impacto	Resistência à tração
	UNE-EN 13892-2 (AENOR, 2003)	UNE-EN 13892-2 (AENOR, 2003)	UNE-EN 13892-3 (AENOR, 2006)	UNE-EN 13892-4 (AENOR, 2003)	UNE-EN 13892-5 (AENOR, 2006)	UNE-EN 13892-6 (AENOR, 2003)	UNE-EN 12697-20 (AENOR, 2003)	UNE-EN 13892-7 (U AENOR, 2003)	UNE-EN 13454-2 (AENOR, 2003)	UNE-EN 13454-2 (AENOR, 2003)	UNE-EN 13454-2 (AENOR, 2003)	UNE-EN 13454-2 (AENOR, 2003)	UNE-EN 13454-2 (AENOR, 2003)	UNE-EN ISO 178 (AENOR, 2013)	UNE-EN ISO 6272 (AENOR, 2013)
Cimento	N	N	N ^a (um dos três)	O	-	O	O	O	O	O	O	O	O	O ^a	O

Legenda: (N) Normativa; (O) Opcional onde seja relevante; (-) Não relevante; (^a) Somente para pastas autonivelantes utilizadas em superfícies de desgaste.

Figura 2.14 - Pastas autonivelantes e ensaios aplicáveis.

Fonte: AENOR (2002) -Traduzida e adaptada da UNE-EN 13813.

A norma supracitada não apresenta os valores de resultados ideais, contudo, a EFNARC (2001), apresentam valores de acordo com a Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Requisitos de desempenho para pisos cimentícios autonivelantes modificados com polímeros.

Características de desempenho	Método de ensaio especificado	Requisitos
Resistência à compressão	UNE-EN 13892-2	≥ 20 MPa
Resistência à flexão	UNE-EN 13892-2	≥ 5 MPa
Resistência à abrasão	UNE-EN 13892-4 (BCA)	≥ 0,2 mm de desgaste por ano, ou melhor
Resistência de arrancamento ao substrato	UNE-EN 1542, usando como referência UNE-EN 1766 para substratos de concreto (relatar a área de ruptura)	≥ 1.0 MPa
Resistência ao impacto	ISO 6272 (quando ligado a uma superfície de concreto de acordo com a UNE-EM 13892-1)	≥ 4 Nm
Resistência ao escorregamento (molhado)	UNE-EN 13036-4 (Pêndulo de deslizamento)	≥ 40, quando testado molhado
Permeabilidade ao vapor de água	UNE-EN 12086	≤ 4 g/(m ² .d)

Fonte: EFNARC (2001) - Traduzida e adaptada.

2.4.1 Ensaios no Estado Endurecido

2.4.1.1 Resistência mecânica

A resistência mecânica está ligada a sua capacidade de resistir esforços de tração, compressão ou cisalhamento, provenientes de cargas estáticas ou dinâmicas decorrentes da edificação ou condições ambientais (FREITAS, 2010).

Segundo Fochs, Recena e Silva (2013) a grande questão com relação à resistência mecânica de uma argamassa é sua quantificação, ou seja, qual valor deve ser atingido e como deve ser feita a medição desse valor de referência, qual a idade para ensaio, qual o método a ser empregado e qual o corpo de prova a ser adotado. A resposta para essa questão está diretamente ligada ao emprego previsto para a argamassa e com as solicitações previstas em projeto, quando for o caso.

Diversos fatores influenciam consideravelmente a resistência à compressão do concreto. Fatores desde o adensamento até as condições de cura (grau de hidratação do cimento) têm efeitos na resistência do concreto. Outras variações podem influenciar os resultados dos ensaios de resistência à compressão como: tipo e tamanho de corpo de prova, tipo do molde, preparação dos corpos de prova, rigidez da máquina de ensaio e a velocidade de aplicação da força (NEVILLE, 2016).

2.4.1.2 Variação dimensional

Argamassa e concreto são materiais porosos, que conferem a eles a maior desvantagem de sofrer variações de volume devido à retração durante a hidratação e secagem (LE-BIHAN et al., 2012).

As alterações volumétricas em argamassas autonivelantes que provocam o fenômeno da retração tem sido um dos principais problemas em pisos autonivelantes, principalmente pela relação de área exposta e espessura. O uso do aditivo redutor de retração pode amenizar esse problema, assim como o uso de fibras poliméricas (SILVA, 2016a).

Segundo Helene e Andrade (2010) a perda de água ocorre por exsudação, evaporação, percolação por juntas dos moldes, absorção de água pelos agregados, absorção de água pelas fôrmas ou por alguma superfície em contato com a peça

concretada. Ela dá origem à chamada retração plástica. Essa perda de água pode ser controlada em parte por um correto estudo de dosagem experimental e em parte por procedimentos adequados de concretagem, adensamento e cura no concreto endurecido, a perda de água ocorre quando este é exposto em ambiente com umidade relativa inferior a 100%. Ocorre então a chamada retração por secagem ou retração hidráulica.

As causas da retração em argamassas autonivelantes são ocasionadas por reações químicas de hidratação do cimento, tensão superficial da água e variações de volume do material do estado plástico para estado endurecido (ONISHI; BIER, 2010).

Rocha (2005) explica que as argamassas mais ricas em cimento Portland tendem a apresentar maiores resistências mecânicas e impermeabilidade. No entanto, isso pode proporcionar o aumento da ocorrência de formação de fissuras devido à hidratação do cimento.

A retração é influenciada também pelo teor de materiais pulverulentos (grãos com tamanho inferior a 0,075mm). De uma forma geral, quanto maior o teor de finos, maior a retração, principalmente quando os grãos possuem dimensões inferiores a 0,005mm, chamados de argila. Esses finos, de alto poder plastificante, devido à sua alta superfície específica e à sua natureza, para uma trabalhabilidade adequada, requerem maior quantidade de água de amassamento, gerando maior retração e fissuração, o que compromete a durabilidade dos revestimentos (CARASEK, 2007).

Os principais tipos de retração são por secagem e autógena. A retração autógena seria basicamente a deformação durante o processo de hidratação sem interferências de umidade com o ambiente externo. A retração por secagem pode ser definida como deformação gerada pela troca de umidade entre a estrutura porosa da pasta e o ambiente externo. Como a umidade relativa do ambiente é mais baixa do que na pasta de cimento, ocorre, em consequência, a contração do material (ALRIFAI et al., 2013). A prática de engenharia mostra a retração de secagem e o autógeno causados pela rápida perda de água e hidratação do cimento são as principais formas de dano e falha da argamassa autonivelante, que devem ser estudadas e resolvidas enfaticamente (YANG et al., 2019).

2.5 MÉTODOS DE DOSAGEM DE AAN

O método de dosagem empregado e as prescrições normativas são baseados em métodos para concretos autoadensáveis (CAA) (CHAVES, 2019), visto que não existe

norma brasileira que regulamente este material para a avaliação do seu desempenho (RUBIN, 2015; SILVA, 2016a; LOPES et al. 2018; OLIVEIRA, 2019; CHAVES, 2019; MENDES; 2019).

No Brasil, as pesquisas desenvolvidas acerca da argamassa autonivelante são baseadas em normas internacionais como a EFNARC (2002), a norma norte-americana C 1708 (ASTM, 2016) que descreve os métodos de ensaios adequados para avaliar o desempenho de argamassas autonivelantes nos estados fresco e endurecido e em métodos para o CAA.

Lopes et al. (2018) adaptaram o método de dosagem proposto por Tutikian (2004), na qual é baseado inicialmente a partir do método do IPT/EPUSP, em que o concreto convencional (CCV) vai se alterando para ser um concreto autoadensável (CAA) ao adicionar um aditivo superplastificante (Sp), a fim de se obter uma maior fluidez, e conseqüente segregação, em que a mesma será corrigida com adição de finos pozolânicos ou não.

Neste sentido, de uma forma análoga, as autoras dosaram a AAN com o mesmo princípio que o CAA. Na primeira etapa realizaram um estudo de dosagem inicial com misturas que variavam os traços de argamassa 1:1, 1:2 e 1:3, incorporando o superplastificante até que a mistura ganhasse maior fluidez. No entanto, o traço 1:3 não obteve a fluidez necessária para tornar-se o ANN. Assim, para que se tivesse uma mistura final com menor consumo de cimento, optaram pelo traço 1:2.

Na dosagem do teor de superplastificante, Tutikian (2004) recomenda que se comece com pequenas quantidades, na ordem de 0,30% de aditivo da massa de cimento, e vá aumentando até chegar ao ponto ideal. Lopes et al. (2018) adicionaram Sp na mistura até o primeiro sinal de exsudação. Nesta etapa do método de Tutikian (2004) não é necessário realizar os ensaios de espalhamento para o concreto, no entanto, para a adaptação do método as autoras verificaram através do ensaio de mini *slump* se a mistura estava exsudada.

Para a correção da exsudação no concreto autoadensável, Tutikian (2004) recomenda que deve ser realizada sem mexer nas proporções iniciais dos materiais ao realizar a adição de finos, sendo que se o fino for pozolânico, este será substituído no cimento e se não for pozolânico será substituído no agregado miúdo. Seguindo este princípio, Lopes et al. (2018) utilizaram o resíduo do corte de mármore e granito como fino não pozolânico substituindo no agregado miúdo e incorporando na mistura em

pequenas porcentagens com intuito de corrigir a segregação e melhorar a viscosidade das argamassas.

Na Figura 2.15 é apresentado o procedimento de mistura seguido por Lopes et al. (2018).



Figura 2.15 - Procedimento de mistura.
Fonte: Lopes et al. (2018).

Na segunda etapa, Lopes et al. (2018) utilizaram alguns ensaios como de espalhamento no mini *slump*, tempo de escoamento no mini funil-V e o tempo de retenção de fluxo, como determinado nas recomendações EFNARC (2002) e C 1708 (ASTM, 2016) com objetivo de avaliar as propriedades necessárias para que a argamassa seja considerada autonivelante.

Já Carvalho (2015) em seus estudos de dosagens de argamassas autonivelantes substituiu parte do cimento Portland CP V-ARI pelos finos de *filler* calcário (FC), resíduos de construção e demolição (RCD) e cinza pesada (CZP). A dosagem foi realizada em função da substituição de cimento Portland por finos (FC, RCD e CZP) e também em função da porcentagem de aditivo.

Carvalho (2015) realizou experimentos para avaliar as propriedades da argamassa no estado fresco para determinação dos teores ótimos de aditivo e porcentagem de finos. A dosagem foi realizada em função do diâmetro de espalhamento das argamassas na mesa de consistência utilizando o mini *slump*, sem apresentar segregação, conforme os critérios de aceitação sugeridos pela EFNARC (2002), de forma a obter misturas com características autonivelantes. O preparo das argamassas autonivelantes do trabalho de Carvalho (2015) foi efetuado de forma similar aos procedimentos descritos pela NBR 13276 (ABNT, 2016), mas dispensando o adensamento.

Outras metodologias adotadas por alguns autores foram se basear em estudos anteriores, adotando os melhores traços e adaptando-os para suas respectivas pesquisas.

Oliveira et al. (2018) em seu trabalho utilizou um traço base pré-existente que apresentou características mais vantajosas dentre os estudados por Souza et al. (2012), onde devido a diferença de materiais selecionados para sua pesquisa daqueles utilizados originalmente, precisou fazer ajustes sobre a proporção de aditivos, especialmente do aditivo superplastificante, mantendo igual a quantidade dos demais componentes da mistura.

No total, Oliveira et al. (2018) produziram seis formulações distintas, com três tipos diferentes de cimento, sendo eles o CP-I, o CP-II E e o CP-V ARI, e duas combinações possíveis de aditivos: uma fazendo uso simultâneo de aditivo superplastificante (Sp) e de aditivo modificador de viscosidade (MV); e outra aplicando apenas um aditivo plastificante polifuncional (PP), com efeito tanto sobre a dispersão das partículas quanto na manipulação da reologia das misturas, específico para argamassas autonivelantes. Os materiais utilizados nas formulações foram misturados em ordem semelhante à empregada por SOUZA et al. (2012).

Todos os aditivos foram, antes de adicionados à mistura, dissolvidos em parte da quantidade total de água. Quando utilizados simultaneamente dois aditivos, foi primeiro adicionado o superplastificante, para a dispersão das partículas, e após ele colocado o aditivo modificador de viscosidade, para a correção da coesão da argamassa.

Os ensaios realizados para a avaliação das propriedades das argamassas formuladas no estado fresco foram o de consistência e o de tempo de fluxo, os quais utilizaram equipamentos de mini *slump* e o mini funil-V, respectivamente, de acordo com a EFNARC (2002).

Silva (2016a) também se baseou em Souza et al. (2012), escolhendo o traço que apresentou o melhor desempenho no estado fresco, e a partir da mesma, foram propostos ajustes de formulação com a inclusão de fibras sintéticas e a substituição parcial do cimento por cinza volante, de forma a obter reduzidos efeitos de retração.

Em seus ensaios no estado fresco foram realizados o tempo de retenção de fluxo pela norma americana C 1708 (ASTM, 2016), densidade de massa e teor de ar incorporado pela NBR 13278 (ABNT, 2005) e espalhamento no cone de Kantro. Na Figura 2.16 é apresentado o procedimento de mistura seguido por Silva (2016).

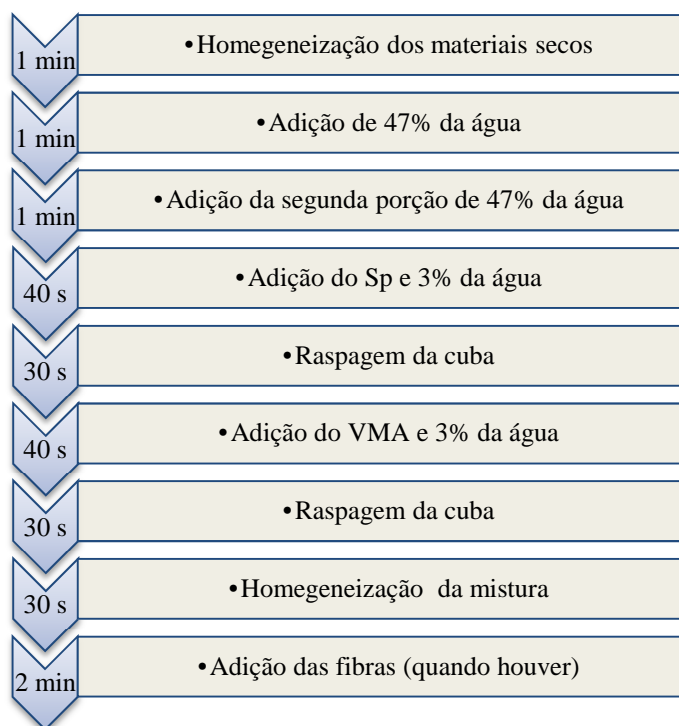


Figura 2.16 - Procedimento de mistura.
Fonte: Silva (2016a).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentados os materiais e os métodos para a realização dos experimentos das argamassas autonivelantes (AAN's) para contrapiso. O programa experimental foi elaborado visando dar sequência aos estudos que englobam esse tipo de tecnologia, dentre os quais se destacam Souza et al. (2012), Rubin (2015), Silva (2016a) e Lopes et al. (2018).

O estudo foi desenvolvido a partir de um método de dosagem de argamassas proposto por Lopes et al. (2018). Os autores tomam como base o método de dosagem para concreto autoadensável de Tutikian (2004), e realizam adaptações de modo a satisfazer as características reológicas necessárias a uma argamassa autonivelante para contrapiso.

3.1 Definição das variáveis

3.1.1 Fatores Controláveis

Nesta pesquisa, os fatores controláveis (variáveis independentes) foram:

- a) Tipo de cimento: CP I (Cimento Portland Comum), CP II-E (Cimento Portland Composto com Escória de Alto-Forno), CP IV (Cimento Portland Pozolânico) e CP V-ARI (Cimento Portland de Alta Resistencia Inicial);
- b) Tipo de adição mineral: Sílica ativa (S.A) e Metacaulim (M.C).

A escolha destas variáveis baseou-se no conhecimento adquirido durante a revisão bibliográfica e buscou contribuir no avanço científico sobre este tema. Adotou-se como misturas de referência àquelas confeccionadas com cimento CPV-ARI, visto que este material é comumente aplicado em estudos nacionais sobre argamassas autonivelantes como, por exemplo, Souza et al. (2012), Carvalho (2015), Oliveira et al. (2018); Chaves (2019), Mendes (2019) e Matos et al. (2020).

A sua elevada finura contribui para a fluidez do material e proporciona rapidez de endurecimento, favorecendo, por exemplo, para a liberação do piso em pouco tempo. Contudo, essas mesmas características corroboram ao aparecimento de manifestações

patológicas com o surgimento de retração e fissuração verificadas na literatura por Onishi e Bier (2010), Souza et al. (2012), Carvalho (2015), Silva (2016a), Mendes (2019) e Chaves (2019).

O cimento CP I foi adicionado ao estudo por ser um cimento puro e se comparado com CPV de baixa finura, o que facilitaria no controle de adições minerais incorporadas as argamassas e no controle das retrações. E apesar de não ser comercializado, atualmente no país, considerou-se como apropriado para composição de dados sobre este tema. A escolha do CP II-E atribuiu-se ao fato deste ser um material comumente encontrado no município de Tucuruí-PA, e o apelo do mercado local motivou a sua escolha nesta pesquisa.

A escolha do CP IV justifica-se por este ser o cimento, comercialmente disponível, com o menor teor de clínquer se comparado com os demais cimentos desta pesquisa. Com base na NBR 16697 (ABNT, 2018), neste tipo de cimento é permitido um acréscimo de até 10% de *filler* de calcário e também incorporação de 15 a 50% de adições pozolânicas, o que diminuiria o risco de retração.

As adições minerais utilizadas nesta pesquisa são os materiais pozolânicos metacaulim (M.C) e sílica ativa (S.A). A escolha se deu pela disponibilidade local e devida suas características intrínsecas que contribuem para a melhor correção da exsudação das AAN's, melhorando as propriedades reológicas como fluidez para baixos teores e coesão, contribuindo não só com o surgimento de um benefício ecológico, mas também econômico, visto que aditivos modificadores de viscosidade agregam maior custo.

3.1.2 Fatores Fixos

Em relação aos fatores fixos estabelecidos nesta pesquisa, destaca-se:

- a) Traço das argamassas autonivelantes dosadas: 1:2 em massa (cimento/areia);
- b) Relação água/cimento (a/c) de 0,5 (em relação à massa dos materiais secos);
- c) Ordem de mistura dos materiais.

Apesar do traço ser rico, este foi estabelecido baseando-se nos trabalhos que utilizaram o mesmo traço conforme os autores como Libre et al. (2010); Rizwan e Bier

(2012), Medipour et al. (2013), Carvalho (2015) Lopes et al. (2018) e Chaves (2019) que estudaram parâmetros como fluxo, resistência, microestrutura de sistemas de argamassa autoadensável, dentre outros e os resultados indicaram que as AAN's tiveram uma resposta geral melhorada com consistência na faixa de aceitação sem sinais de exsudação e segregação, com bom desempenho mecânico e redução de retração por secagem.

A relação a/c de 0,5 foi definida também baseada na revisão bibliográfica em pesquisas realizadas por autores como Katsiadramis et al. (2010); Libre et al. (2010); Onishi e Bier, (2010) e Turk (2012).

3.1.3 Variáveis de Resposta

Como não existem normas nacionais para avaliação da AAN, o estudo baseou-se em normas internacionais, tais como EFNARC (2002) e C 1708 (ASTM, 2016) e nas referências bibliográficas para avaliar e compreender as propriedades das argamassas autonivelantes. Dessa forma as variáveis de respostas são:

- a) Teores ótimos de aditivo e finos;
- b) Espalhamento médio e condição de borda e presença de segregação;
- c) Tempos de escoamento; retenção de fluxo e de cura;
- d) Taxa de exsudação;
- e) Densidade de massa aparente e teor de ar incorporado;
- f) Resistência à compressão axial e à tração na flexão;
- g) Variação dimensional.

Na Tabela 3.1 são dadas as informações referentes ao método de ensaios no estado endurecido, de acordo com a norma vigente para cada ensaio.

Tabela 3.1- Idade, número e dimensão de cp's de argamassa por ensaio no estado endurecido.

Método de ensaio	Idade de ensaio (dias)	Nº (mínimo) de cp's por idade	Dimensão dos cp's (cm)	Especificações
Resistência à tração na flexão e à compressão	28	3	4x4x16	NBR 13279 (ABNT, 2005)
Variação dimensional	1,7 e 28	3	2,5x2,5x28,5	NBR 15261 (ABNT, 2005)

Na Figura 3.1 é demonstrada a matriz experimental para o desenvolvimento da pesquisa.

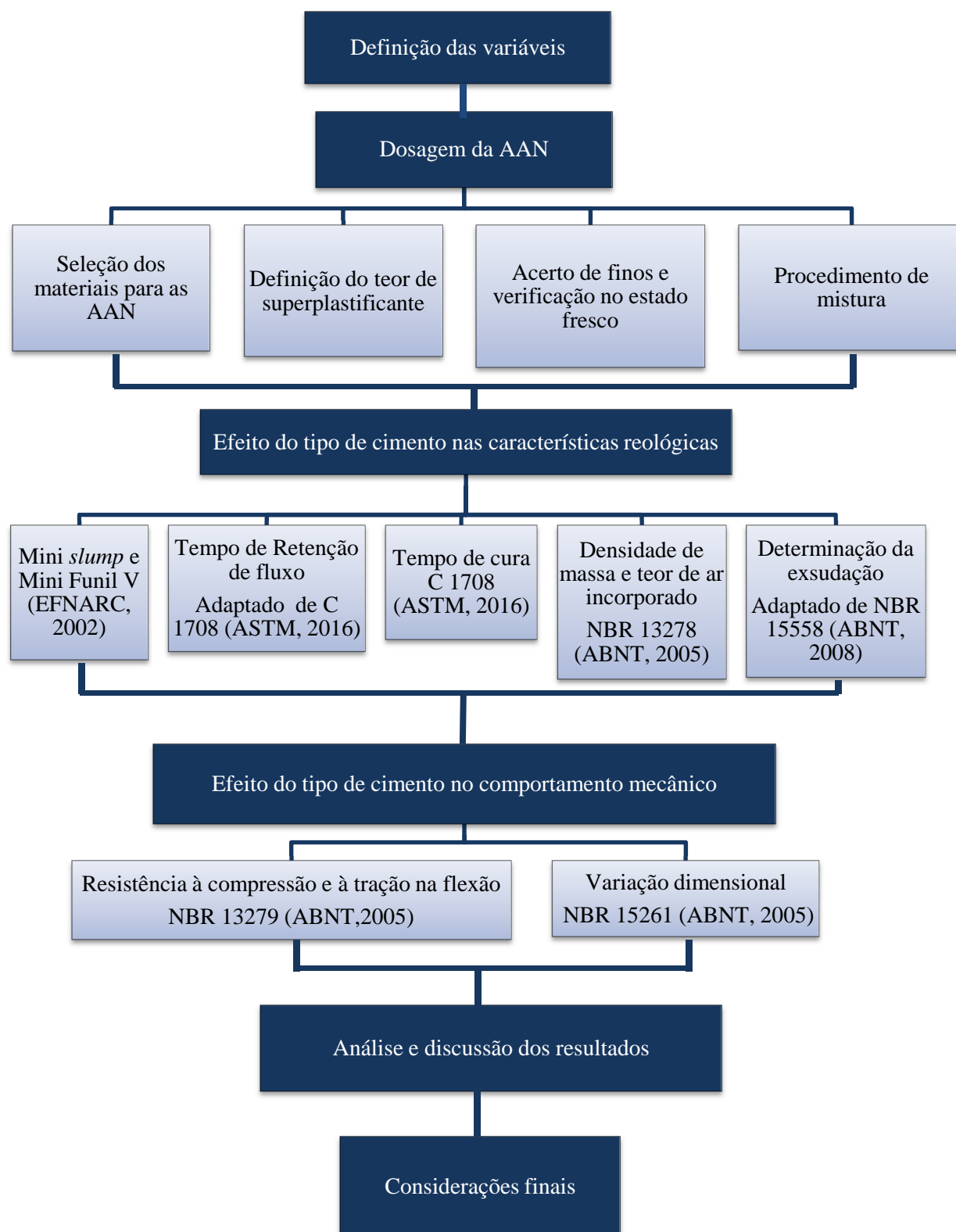


Figura 3.1 - Fluxograma da matriz experimental.

3.2 Dosagem da AAN

A metodologia de dosagem da argamassa autonivelante (AAN) seguiu a metodologia proposta por Lopes et al. (2018). As informações detalhadas a seguir, seguem a ordem da matriz experimental apresentada anteriormente na Figura 3.1.

3.2.1 Seleção dos materiais

Na primeira etapa houve a seleção dos materiais para compor a AAN, uma vez que a escolha dos materiais é fundamental para obter uma argamassa com reologia de autoadensabilidade adequada.

3.2.1.1 Agregado Miúdo

O agregado miúdo natural empregado na pesquisa na produção de AAN foi a areia natural quartzosa extraída do leito do rio Tocantins, a qual foi utilizada na construção da segunda etapa da Usina Hidrelétrica de Energia (UHE) de Tucuruí. Sua caracterização física foi realizada no Laboratório de Materiais da Faculdade de Engenharia Civil da UFPA, campus Tucuruí.

Contudo, a areia utilizada na produção das argamassas estava gerando segregação e para continuar trabalhando com os materiais disponíveis na região, adaptou-se a areia passando por um processo de peneiramento na malha 0,6 mm para retirada dos grãos maiores, pois para compor uma AAN é necessário utilizar uma areia muito fina.

A Tabela 3.2 apresenta as características físicas do agregado miúdo após o peneiramento utilizado nas argamassas autonivelantes.

Tabela 3.2 - Composição granulométrica e características físicas da areia fina após o peneiramento.

Abertura das peneiras (mm)	Amostra	
	Massa retida (%)	Média retida acumulada (%)
0,6	0	0
0,42	53	53
0,3	28	81
0,25	4	85
0,18	10	95
0,15	2	97
0,075	3	100
Fundo	0	100
Módulo de Finura- NBR NM 52 (ABNT, 2009)		1,8
Diâmetro máximo característico (mm) - NBR NM 248 (ABNT, 2003)		0,6
Massa específica (g/cm³) - NBR NM 52 (ABNT, 2009)		2,4
Massa unitária (g/cm³) - NBR NM 45 (ABNT, 2006)		2,0
Absorção de água (%) - NBR NM 30 (ABNT, 2001)		0,4
Índice de vazios (%) - NBR NM 45 (ABNT, 2006)		17,5

Os resultados da Tabela 3.2 mostram que o módulo de finura da areia peneirada na malha 0,6 mm foi de 1,8, classificando-a como areia fina de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009), propício para o uso na argamassa estudada por promover homogeneidade e fluidez da mistura.

3.2.1.2 Cimento

Foi utilizado o CP I (Cimento Portland Comum), CP II-E (Cimento Portland Composto com Escória de Alto-Forno), CP IV (Cimento Portland Pozolânico) e CP V-ARI (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial), especificado pela NBR 16697 (ABNT, 2018).

Para a caracterização química dos cimentos selecionadas nesta pesquisa, foi realizado o ensaio de Espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER), localizado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul e pela empresa DOW, localizado na cidade de Breu Branco-PA.

As suas composições químicas e os valores são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Características químicas dos cimentos.

Características avaliadas (% massa)	LACER/DOW				NBR 16697 (ABNT, 2018)
	CP I	CP II-E	CP IV	CP V-ARI	
Al ₂ O ₃	4,90	5,45	14,60	4,24	
SiO ₂	1,50	1,61	27,20	1,50	
Fe ₂ O ₃	2,10	4,37	3,20	4,64	
CaO	75,50	71,56	46,30	68,79	
MgO	10,00	10,23	2,80	10,77	≤ 6,50*
SO ₃	4,40	4,45	4,00	6,95	
Na ₂ O	0,40	0,39	0,05	0,97	≤ 4,50*
K ₂ O	0,50	0,58	0,17	1,34	
SrO	0,20	0,29	0,04	0,51	
P ₂ O ₅	0,08	-	0,29	0,15	
MnO	0,05	0,56	0,03	0,08	
TiO ₂	0,18	0,36	0,90	-	
NiO	-	-	0,02	0,02	
ZnO	-	-	0,01	-	
PF	-	-	-	-	
RI	-	-	-	-	

*Requisitos aplicáveis apenas para os cimentos tipo CP I e CP V-ARI.

Como se pode observar na Tabela 3.3, para o teor de MgO disponíveis nos cimentos utilizados foram um pouco maiores que os recomendados pela NBR 16697 (ABNT, 2018) que é de até 6,50%, com exceção do CP IV e para o teor de SO₃ apenas o CP V-ARI não atendeu ao limite de 4,50%, não havendo limites discriminados nesta norma para os demais componentes químicos analisados.

A caracterização física foi obtida através dos ensaios realizados no laboratório de Materiais da Faculdade de Engenharia Civil da UFPA, conforme a NBR 16605 (ABNT, 2017) para determinação da massa específica e NBR NM 45 (ABNT, 2006) de forma adaptada utilizando um recipiente menor para que fosse possível determinar massa unitária e o volume de vazios.

Foi realizada também a determinação da área superficial específica por B.E.T (Brunauer Emmett Teller) e os demais parâmetros foram fornecidos pelos fabricantes de acordo com as exigências da NBR 16697 (ABNT, 2018) para cimento Portland. Os valores são apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Características físicas e mecânicas dos cimentos.

Características avaliadas		CP I		CP II-E		CP IV		CP V-ARI	
Massa específica (g/cm ³)		3,17		3,07		2,95		3,06	
Massa unitária (g/cm ³)		0,95		1,08		0,76		0,91	
Índice de vazios (%)		0,78		0,79		0,75		0,77	
Área específica B.E.T (m ² /g)		3,50		3,00		8,40		5,00	
Expansão à quente (mm)		0	≤ 5,00	0	≤ 5,00	0	≤ 5,00	0	≤ 5,00
Tempo de pega (min)	Início	155	≥ 60	187	≥ 60	180	≥ 60	135	≥ 60
	Fim	217	≤ 600	247	≤ 600	290	≤ 720	205	≤ 600
Finura (%)	#200	0,60	≤ 10,00	0,50	-	1,1	≤ 8,0	-	-
	#325	6,70	-	6,80	-	-	-	-	-
Resistência à Compressão (MPa)	1 dia	-	-	-	-	-	-	29,00	≥ 14,00
	3 dias	29,20	≥ 8,00	20	≥ 10,00	26,4	≥ 10,00	35,00	≥ 24,00
	7 dias	37,40	≥ 15,00	26,40	≥ 20,00	34,4	≥ 20,00	40,00	≥ 34,00
	28 dias	48,70	≥ 25,00	36,30	≥ 32,00	48,6	≥ 32,00	47,00	-

3.2.1.3 Aditivo superplastificante

O superplastificante (Sp) utilizado é constituído por uma solução aquosa a base de polímeros policarboxílatos. Este aditivo foi essencial para aumentar o índice de consistência das argamassas com uma quantidade de água de amassamento constante, tornando a mistura mais fluida sem a necessidade de aumentar a quantidade de água da mistura. Na Tabela 3.5 apresentam-se as principais características do aditivo superplastificante fornecidas pelo fabricante.

Tabela 3.5- Informações sobre o superplastificante.

Características	Dados do Fabricante
Tipo de produto	Plastificante/superplastificante
Aspecto/Cor	Líquido/marrom
Dosagem Recomendada	0,2 a 2,0% sobre o peso do cimento
Densidade	1,11 g/cm ³

3.2.1.4 Adições minerais

A seleção das adições minerais se deu para corrigir a segregação nas misturas, onde se optou por utilizar finos pozolânicos com elevado grau de finura e que contribui nas propriedades reológicas e mecânicas da argamassa, já que ela terá a finalidade de contrapiso.

Para análise da composição química as amostras foram caracterizadas pelos métodos Espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) realizado no laboratório LACER e pela empresa DOW apresentadas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Caracterização química das adições minerais.

Características avaliadas (% da massa)	Sílica ativa	Metacaulim
SiO ₂	95,75	52,54
Al ₂ O ₃	1,01	34,00
Fe ₂ O ₃	0,06	2,10
Cr ₂ O ₃	-	7,10
MgO	-	2,42
SO ₃	1,73	0,38
K ₂ O	0,73	3,38
NiO	-	1,23
P ₂ O ₅	0,90	0,09
MnO	0,03	-
Ag ₂ O	-	1,71
Na ₂ O	-	0,41
CaO	0,73	0,36
ZrO ₂	-	0,29
CuO	-	0,14

Na análise química da Tabela 4.2 obtida pelo método FRX, observa-se que em relação aos principais óxidos tanto a sílica quanto o metacaulim estão em conformidade com os requisitos químicos da NBR 12653 (ABNT, 2015), quanto a um material classificado como pozolânico, uma vez que o somatória de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ foi superior a 70% .

A caracterização física das adições foi através dos ensaios de massa específica pela NBR 16605 (ABNT, 2017), massa unitária e volume de vazios, conforme a NBR NM 45 (ABNT, 2006) de forma adaptada utilizando um recipiente menor para que fosse possível determinar massa unitária e o volume de vazios e a área específica por B.E.T foi realizado pelo LACER da UFRGS.

Na Tabela 3.7 são apresentados os resultados da caracterização física das adições de sílica ativa e metacaulim.

Tabela 3.7 - Características física das adições minerais.

Características avaliadas	Sílica Ativa	Metacaulim
Massa Específica (g/cm ³)	2,26	2,56
Massa unitária (g/cm ³)	0,45	0,50
Índice de vazios (%)	0,67	0,69
Área Superficial Específica B.E.T (m ² /g)	2,22	1,91

Nota-se pelos resultados de área superficial específica B.E.T que as adições possuem elevada finura, menores que o cimento, sendo a sílica ativa maior em relação ao metacaulim. Em outros trabalhos realizados na produção de AAN Carvalho (2015) utilizou finos na com valores 2,17 m²/g para fino de cinza pesada (CZP) e 5,02 m²/g para resíduos de construção e demolição (RCD) e Mehdipour et al. (2013) utilizou metacaulim com 2,30 m²/g.

3.2.1.5 Água

Utilizou-se para a realização dos ensaios e produção das AAN, água potável proveniente da rede de abastecimento da Vila Permanente, fornecida pela Eletrobras/Eletronorte.

3.2.2 Definição do teor de Superplastificante

A próxima etapa foi à incorporação do superplastificante (Sp) na mistura até chegar ao ponto ideal, que foi obtido visualmente quando a mistura estava bastante fluida (exsudada).

A cada adição de Sp referente ao traço 1:2, fazia-se o ensaio de mini *slump* para verificar se o mesmo estava com um espalhamento acima do limite estipulado pela EFNARC (2002), pois ao adicionar os finos para a correção da exsudação, o espalhamento final permanecerá dentro dos parâmetros da norma supracitada.

A dosagem iniciou em 0,30% de aditivo por massa de aglomerante até encontrar o teor ótimo para cada tipo de cimento. A nomenclatura dos traços produzidos para a

dosagem do superplastificante com o tipo de cimento seguido do teor de Sp são apresentados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Traços iniciais para a dosagem do Sp, em massa.

Tipo de cimento	Cimento	Areia	a/c	Sp
CP V-ARI	1	2	0,50	0,0050
CP IV	1	2	0,50	0,0125
CP II-E	1	2	0,50	0,0030
CPI	1	2	0,50	0,0040

3.2.3 Acerto de finos e verificação no estado fresco

Após o teor de superplastificante ter sido definido nos testes de espalhamento no mini *slump* como foi descrito no item 3.2.2, deu-se prosseguimento na dosagem com a correção da exsudação através da adição de finos na argamassa.

Seguindo o princípio de Tutikian (2004) adotado por Lopes et al. (2018), na dosagem da AAN utilizou-se finos pozolânicos, e por isso, fez-se a substituição da sílica ativa (S.A) e metacaulim (M.C) no cimento com objetivo de corrigir a exsudação resultante do superplastificante, afim de torna-lo coeso e fluido ao mesmo tempo.

Neste programa experimental, as substituições de sílica ativa e metacaulim ocorreram para cada tipo de cimento (CP I, CP II-E, CP IV e CP V-ARI) fixando o cimento e, em seguida, adicionaram-se os finos e areia na mesma proporção do traço.

Os teores de correções das argamassas variavam a cada 5% podendo chegar até 25% de finos no total, de acordo com a necessidade de atingirem a consistência ideal através do ensaio de espalhamento no mini *slump*. Apresentam-se na Tabela 3.9 os traços produzidos identificadas de acordo com o material utilizado e o teor de substituição de cimento por finos de sílica ativa (S.A) e metacaulim (M.C).

Tabela 3.9 - Dosagem dos teores de sílica ativa e metacaulim nas argamassas, em massa.

Traços	Cimento	Areia	a/c	Sp	Finos
CPV-SA10%	1,0010	2,0020	0,50	0,0050	0,10
CPIV-SA5%	1,0005	2,0010	0,50	0,0125	0,05
CPII-SA15%	1,0015	2,0030	0,50	0,0034	0,15
CPI-SA15%	1,0015	2,0030	0,50	0,0037	0,15
CPV-MC10%	1,0010	2,0020	0,50	0,0050	0,10
CPIV-MC5%	1,0005	2,0010	0,50	0,0125	0,05
CPII-MC25%	1,0025	2,0050	0,50	0,0034	0,25
CPI-MC25%	1,0025	2,0050	0,50	0,0037	0,25

Após a análise dessas misturas, caso a argamassa se enquadrasse nos parâmetros da EFNARC (2002) com espalhamento de 24 a 26 cm, estava pronta a dosagem, caso o contrário, continuava-se acertando as proporções.

Ao final desse ajuste realizou-se o ensaio de tempo de escoamento pelo mini funil-V (EFNARC, 2002), o limite apropriado para uma AAN seria de 7 a 11 segundos. Caso, o traço definido no ensaio de mini *slump* não enquadrasse neste tempo seria necessário realizar uma nova dosagem, até a mistura atender simultaneamente esses dois parâmetros (espalhamento e tempo de escoamento).

3.2.4 Procedimento de mistura

O procedimento de mistura foi desenvolvido buscando a dispersão dos materiais de maneira mais homogênea possível, desta forma, baseou-se em Lopes et. al (2018). Os materiais foram adicionados em parcelas na argamassadeira (Figura 3.2) com capacidade de 5 litros, misturados durante todo o procedimento na velocidade 1 (velocidade lenta) e na rotação de 830 rpm.



Figura 3.2 - Argamassadeira utilizada na produção das AAN's.

Iniciou-se pela homogeneização dos materiais secos na argamassadeira de forma manual com uma colher. Em seguida, toda a água em relação ao traço 1:2 (cimento: areia, em massa) foi adicionada para que os mesmos fossem bem umedecidos, respeitando o tempo de mistura e 2 min nessa etapa. Posteriormente, realizou-se a retirada de excesso de material das paredes da cuba para garantir que todo material fosse devidamente misturado.

A próxima etapa foi a adição do Sp misturado por mais 2 mim promovendo a dispersão dos materiais, onde deve-se obter seu teor ótimo para cada cimento até a argamassa se tornar bastante fluida, o que gerará exsudação que é corrigida em seguida, ao adicionar os finos, promovendo a coesão final da mistura. Na Figura 3.3, está representado esquematicamente o procedimento.

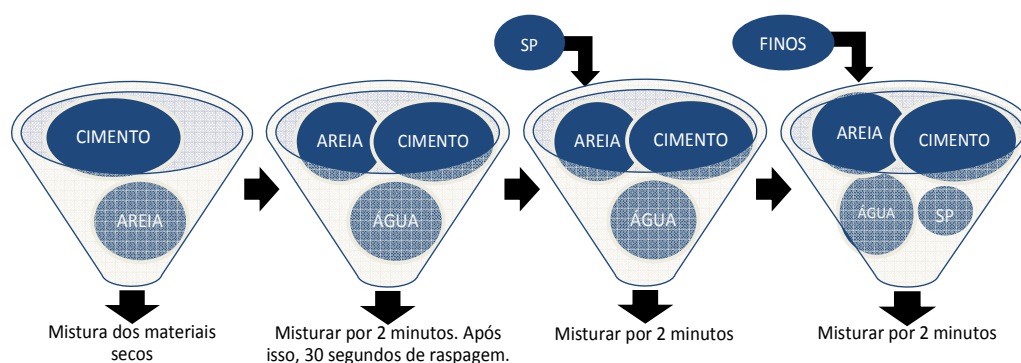


Figura 3.3 - Procedimento de mistura.

3.3 Efeito do tipo de cimento nas características reológicas

As propriedades da argamassa autonivelante no estado fresco devem ser analisadas a fim de garantir a qualidade no estado endurecido. Para todos os ensaios descritos a sala de pesquisa manteve-se climatizada e teve sua temperatura ambiente controlada na faixa de $26^{\circ}\text{C} \pm 1$, uma vez que a AAN é um material suscetível a variações como temperatura. A umidade relativa do ar se manteve na faixa de 55%.

3.3.1 Ensaio de mini *slump* e mini funil-V

O ensaio de mini *slump* tem como objetivo verificar a consistência da argamassa através da média de dois diâmetros perpendiculares do espalhamento do material, avaliando a habilidade do material se espalhar e ocupar os espaços. Este ensaio foi executado como proposto pela EFNARC (2002).

Para sua execução, manteve-se o mini *slump* posicionado no centro de uma placa de vidro. Os materiais foram misturados na argamassadeira mecânica com velocidade lenta como descrito no item 3.2.4 do procedimento de mistura.

Após a mistura, o mini *slump* foi preenchido com uma amostra da argamassa, levantando o equipamento e permitindo o espalhamento sobre a placa. Com o

paquímetro, tomaram-se duas medidas perpendiculares e a média dessas medidas determinou o espalhamento final da argamassa, na qual deve estar compreendido entre 24 e 26 cm, de acordo com a EFNARC (2002). Além da determinação do diâmetro foi feita a análise visual da borda da argamassa, assim como a verificação da ocorrência de segregação na mesma.

Em prosseguimento a metodologia de Lopes et al. (2018), executou-se outro ensaio como parâmetro de controle para a adequada elaboração das formulações, o mini funil-V. Este ensaio busca avaliar o tempo de escoamento das argamassas, onde o equipamento é semelhante ao utilizado hoje para a avaliação no estado fresco de concretos autoadensáveis, entretanto em uma versão reduzida e dimensionada para argamassas, conforme a EFNARC (2002).

O ensaio consistiu em preencher o aparato com a argamassa, e em seguida fez-se a abertura do orifício inferior do funil, cronometrando até que o material escoasse completamente para verificar seu tempo de escoamento como mostra a Figura 3.4.

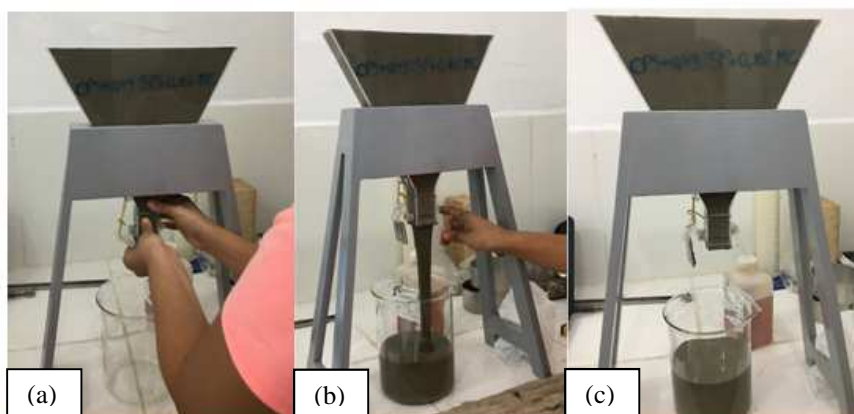


Figura 3.4 - (a) Mini funil-V preenchido com argamassa; (b) Abertura do orifício para escoamento da argamassa; (c) Argamassa totalmente escoada.

Neste ensaio é possível determinar a fluidez da mistura por meio de tempo de queda, que de acordo com a EFNARC (2002) deve ser compreendido entre 7 a 11 segundos.

3.3.2 Ensaio de tempo de retenção de fluxo

Este ensaio busca avaliar a perda de trabalhabilidade ao longo do tempo, sendo determinada pela norma americana norma C 1708 (ASTM, 2016), apresentado no item

2.3.1.3, a qual utiliza um anel de fluxo para medir os espalhamentos, este substituído pelo mini *slump* e já realizado por autores como Rubin (2015) e Lopes et al. (2018).

3.3.3 Ensaio de tempo de cura

A norma americana C 1708 (ASTM, 2016) prescreve o ensaio de tempo de cura, na qual a regeneração da argamassa deve fornecer a habilidade de retornar ao seu estado original após sofrer um corte específico introduzido em sua superfície.

Inicialmente, a bandeja foi disposta em uma superfície nivelada e livre de vibrações. Após a conclusão da mistura, a argamassa foi despejada em uma bandeja até $6 \text{ mm} \pm 1$ de espessura.

O ensaio consistiu em realizar o primeiro corte após 10 minutos a partir do momento de início do preparo da argamassa, utilizando a barra de metal e segurando em um ângulo de 45° . A norma especifica que cada corte deve ser realizado a cada 5 minutos a uma distância de 25 mm, puxando a barra suavemente pela mistura, em aproximadamente em 5 a 10 segundos, parando próxima à borda da bandeja.

Cada amostra permaneceu curando durante a noite antes de avaliar o tempo de cura. No dia seguinte, foram feitas as observações, perto do centro dos cortes, evitando áreas perto da borda da bandeja. O tempo de cura é o tempo mais longo para o qual nenhum recuo óbvio ou crista é observado, ou seja, o último corte a se fechar completamente.

3.3.4 Ensaio de densidade de massa e teor de ar incorporado

Nesta pesquisa, a determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado das argamassas dosadas foi realizada de acordo com o descrito na NBR 13278 (ABNT, 2005) com o intuito de caracterizar esse material. A norma preconiza a necessidade de introduzir no recipiente a argamassa previamente preparada em três camadas iguais aplicando-se 20 golpes ao longo das camadas rasando o recipiente posteriormente, porém essa etapa é dispensada, dada à fluidez da AAN.

3.3.5 Ensaio de determinação da exsudação

A metodologia para determinação da quantidade de água exsudada baseou-se na norma NBR 15558 (ABNT, 2008), realizada pela Rubin (2015). Foi utilizado um recipiente com dimensões reduzidas de 100 mm de diâmetro interno e altura interna de 109 mm, conforme descrito no item 2.3.1.6, pois a AAN não requer recipiente grande e foi dispensada a compactação da mistura, pois a mistura é bastante fluida.

O ensaio consiste em preencher o molde com a mistura, onde foram cobertos com filme plástico para evitar perda de água para o ambiente. A coleta de água exsudada foi executada através da pipeta, em intervalos de 10 em 10 minutos durante uma hora e trinta minutos.

3.4 Efeito do tipo de cimento no comportamento mecânico

Nesta etapa, foram realizados ensaios a fim de avaliar o efeito do tipo de cimento no comportamento mecânico das AAN's. O ensaio de resistência à tração na flexão e à compressão foi realizado segundo a NBR 13279 (ABNT, 2005), dispensando apenas o adensamento na moldagem devido à alta fluidez da argamassa, conforme previsto na norma. A cura foi realizada em ambiente laboratorial e os ensaios foram realizados na idade de 28 dias.

O ensaio da variação dimensional permitiu avaliar a mudança de comprimento nos prismas em um período de tempo pré-determinado, detectando a presença de retração (valores negativo) ou expansão (valores positivo) nas argamassas ensaiadas. Este foi realizado segundo a norma NBR 15261 (ABNT, 2005) que prevê a avaliação da variação através de 3 cp's prismáticos no mínimo, porém nesta pesquisa foram moldados 4 cp's de dimensões 2,5 x 2,5 x 28,5cm.

A cura foi realizada em ambiente laboratorial e logo após a desforma, os corpos de prova foram identificados, marcando uma referência que permitisse colocá-los sempre na mesma posição no aparelho de medida. E as idades de ensaio foram 1, 7 e 28 dias.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados finais obtidos através dos ensaios previstos no programa experimental, assim como as análises dos mesmos comparando-os com a literatura. Os dados suplementares encontram-se no Apêndice A.

4.1 Definição do teor de superplastificante

Na Tabela 4.1 são apresentados os teores de aditivo superplastificante (Sp) na dosagem obtida no ensaio de mini *slump* que estivessem acima do limite máximo prescritos pela EFNARC (2002). Os resultados de cada correção de aditivo até chegar ao traço final encontram-se no Apêndice A.

Tabela 4.1 - Dosagem dos teores ótimos de Sp para cada tipo de cimento.

Tipo de cimento	Cimento	Areia	a/c	Sp	Espalhamento médio (cm)
CP V-ARI	1	2	0,50	0,0050	26,7
CP IV	1	2	0,50	0,0125	28,7
CP II-E	1	2	0,50	0,0035	27,3
CPI	1	2	0,50	0,0040	27,6

Na Figura 4.1 apresenta o espalhamento versus o teor de aditivo em relação ao tipo de cimento.

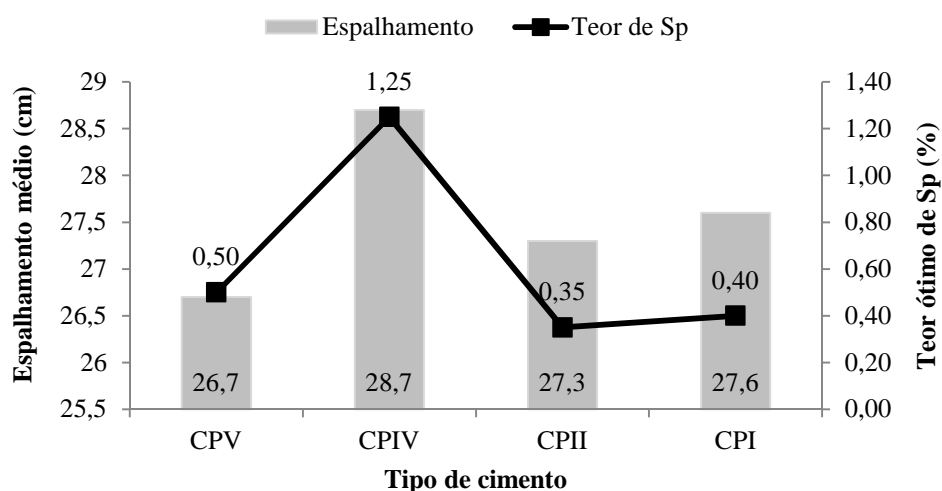


Figura 4.1- Teor de aditivo final x espalhamento empregado para cada tipo de cimento.

Na escolha do teor de aditivo superplastificante buscou-se determinar o quanto esse material seria necessário nas AAN's para promover um espalhamento superior a 26 cm. Adotando o CP V-ARI como referência, pois é o cimento mais comumente usado em AAN, foi realizada a dosagem do aditivo aos poucos até chegar ao teor ótimo.

Percebe-se na Figura 4.1, que a argamassa produzida com CP V-ARI apresentou um teor de 0,50% de Sp, enquanto que com o CP IV durante sua dosagem demandou cerca de 60% a mais de aditivo para o alcance do espalhamento. Este fato justifica-se por ser aquele com maior área de superfície B.E.T (8,4 m²/g) e pela presença de material fino em sua composição em relação ao CP V-ARI que possui uma área superficial menor (5,0 m²/g).

Além disso, para o traço com CP IV optou-se por um teor alto de aditivo, visto que por ser um material muito fino, considerou-se apropriado obter um espalhamento maior, visando uma margem de folga para garantir o prosseguimento da metodologia proposta ao adicionar finos na correção da exsudação.

Ao mesmo tempo em que a elevada finura é adequada para a manutenção da coesão da argamassa, ela também se torna responsável pelo maior consumo de água ou aditivo pela mistura, como demonstrado pelo CP IV, na qual teve uma maior absorção, necessitando de mais aditivo para torna-lo mais fluido. Autores como Libre et al. (2010), Benabed et al. (2012) e Oliveira et al. (2018) tiveram a mesma conclusão com base nos seus resultados, onde o aumento da finura do cimento e a área superficial específica dos finos tornou-se necessário mais água para molhar a superfície das partículas e manter a mesma fluidez.

As argamassas com CP II-E e CP I apresentaram teores ótimos de Sp e espalhamentos próximos, onde a faixa de redução de aditivo foi de 30% e 20%, respectivamente, em relação ao CPV-ARI. Esse comportamento entre os materiais podem ser atribuídos a sua finura que são muito próximas, 3,5 m²/g para o CPI e 3,0 m²/g para CPII-E, necessitando de menos aditivo para atingir a fluidez.

Empregando o mesmo traço desta pesquisa, Carvalho (2015) testou nas AAN's teores mínimos de 0,30% de Sp e máximo de 0,40% no cimento CP V-ARI com resultados satisfatórios. Vale destacar que o método de dosagem é distinto desta pesquisa e o autor realizava a dosagem de Sp em relação ao teor de finos substituído no cimento. Porém os teores acima desse valor encontrados pelo autor com 0,45% e 0,50%

de Sp apresentaram sinais de exsudação e espalhamento superior a 26 cm, o que confere com resultado encontrado na dosagem do CP V-ARI desta pesquisa.

Chaves (2019) que também utilizou o mesmo traço, após a definição de teores de adição de resíduo de beneficiamento de mármore e granito e do aditivo modificador de viscosidade, definiu o teor de superplastificante, na qual as argamassas que apresentaram melhor resultado foram com 0,40% de Sp, porém para comparativo desta pesquisa o espalhamento que passou de 26 cm e apresentou exsudação foi com o teor de 0,50% de Sp.

Comparando-se os quatro tipos de cimento utilizado nesta etapa, pode-se concluir que o uso de maiores quantidades de aditivo Sp foram para os cimentos de maior área superficial específica B.E.T.

4.2 Efeito do tipo de cimento nas características reológicas

Os ensaios preliminares no estado fresco tiveram como objetivo principal obter argamassas com espalhamento no mini *slump* entre 24 a 26 cm, sem que ocorressem sinais de segregação e com tempo de escoamento no mini funil-V entre 7 a 11s. Somente após realização desses ensaios foram definidos os traços para realização dos demais experimentos da pesquisa.

4.2.1 Mini *slump* e mini funil-V

A Tabela 4.2 mostra a descrição dos traços finais das argamassas conforme os procedimentos de dosagem para correção da exsudação com seus respectivos teores ótimo de finos. Os resultados de cada correção de finos até chegar ao traço final e seus registros fotográficos encontram-se no Apêndice A.

Tabela 4.2-Descrição dos traços unitários, em massa, das argamassas formuladas.

Traço	Cimento	Areia	a/c	Sp	Finos
CPV-SA10%	1,0010	2,0020	0,50	0,0050	0,10
CPIV-SA5%	1,0005	2,0010	0,50	0,0125	0,05
CPII-SA15%	1,0015	2,0030	0,50	0,0035	0,15
CPI-SA15%	1,0015	2,0030	0,50	0,0040	0,15
CPV-MC10%	1,0010	2,0020	0,50	0,0050	0,10
CPIV-MC5%	1,0005	2,0010	0,50	0,0125	0,05
CPII-MC25%	1,0025	2,0050	0,50	0,0035	0,25
CPI-MC25%	1,0025	2,0050	0,50	0,0040	0,25

Podem ser observados na Tabela 4.3 os resultados dos ensaios de espalhamento e tempo de fluxo dentro dos limites mínimo e máximo prescritos pela EFNARC (2002) e de acordo com os parâmetros visuais de Martins (2009) (bordas uniformes e sem segregação).

Tabela 4.3 - Resultados de mini *slump*, mini funil-V e análise visual das AAN's.

Traço	Sp	Finos	Parâmetros da EFNARC (2002)		Parâmetros de Martins (2009)	
			Esp. médio: 24 a 26 cm	Tempo de fluxo: 7 a 11s	Bordas: U/D	Segregação: SS/CS
CPV-SA10%	0,0050	0,10	24,8	8,60	U	SS
CPIV-SA5%	0,0125	0,05	25,9	7,30	U	SS
CPII-SA15%	0,0035	0,15	25,2	7,65	U	SS
CPI-SA15%	0,0040	0,15	25,7	7,56	U	SS
CPV-MC10%	0,0050	0,10	24,8	8,58	U	SS
CPIV-MC5%	0,0125	0,05	25,9	7,35	U	SS
CPII-MC25%	0,0035	0,25	24,4	8,68	U	SS
CPI-MC25%	0,0040	0,25	24,2	8,77	U	SS

Legenda: U= Uniforme; D= Desuniforme; SS= Sem Segregação; CS= Com Segregação.

Na Figura 4.2 e 4.3 é possível visualizar a variação desses parâmetros em cada traço formulado de acordo com o tipo de cimento e adição mineral.

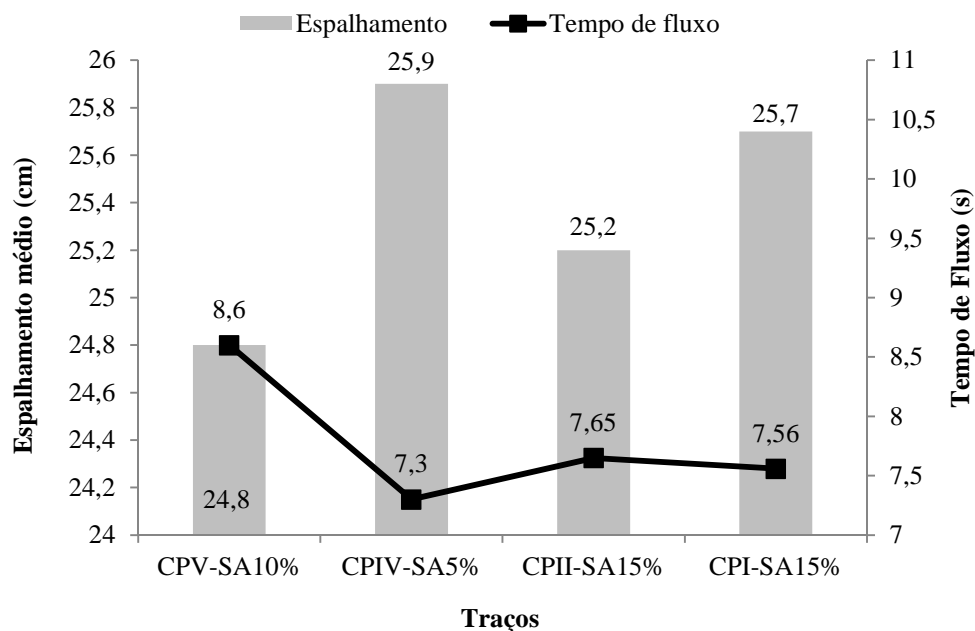


Figura 4.2 – Tempo de fluxo x espalhamento para cada tipo de cimento com sílica.

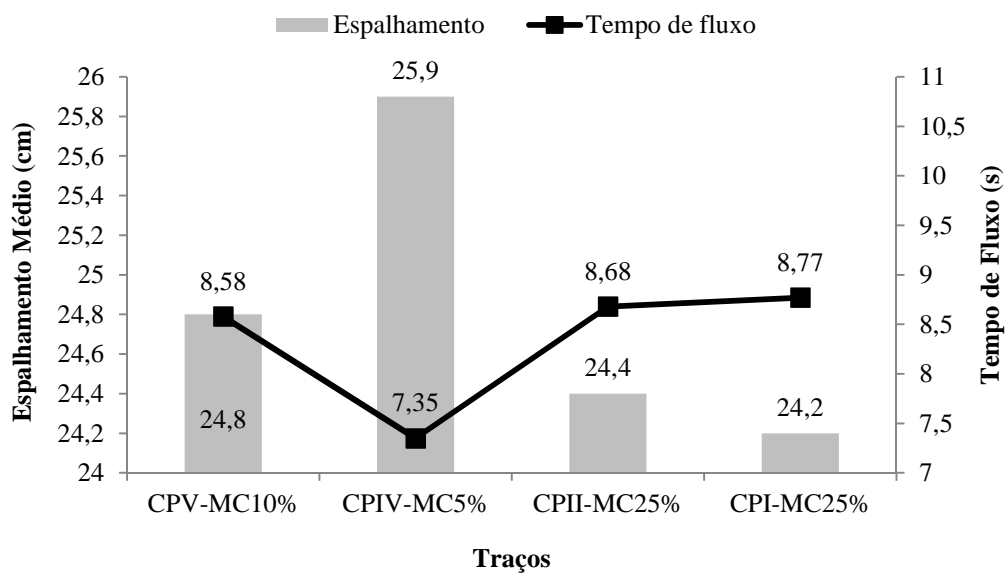


Figura 4.3 - Tempo de fluxo x espalhamento para cada tipo de cimento com metacaulim.

Analisando os resultados da Tabela 4.3 para o cimento de referência, CP V-ARI, foram realizados apenas duas tentativas para a correção da exsudação, uma com 5% e

outra com 10% de sílica ativa. Dentre estas, a que apresentou melhor resultado foi o traço com 10% de sílica.

Comparando os demais traços com a produzida com CP V-ARI, a argamassa utilizando a menor quantidade de sílica ativa foi com o CP IV com 5% de adição obtida no primeiro teste, em contrapartida, as argamassas com os cimentos CP II-E e CP I, exigiram um teor maior de adição, ambos com 15% de sílica.

Esse comportamento pode ser associado às características físicas desses aglomerantes, pois enquanto o CP IV já havia muitos finos em sua composição aumentando a frequência de contato entre eles e influenciando no aumento da viscosidade e coesão das argamassas com menores teores de substituição, o CP II-E e CP I por possuírem finura semelhante e menor que o cimento CP V-ARI precisou de mais finos em sua dosagem.

Durante os ajustes até obter o teor ótimo de sílica para os cimentos, a cada teste de espalhamento analisou-se as condições de bordas e presença de segregação/exsudação, de acordo com Martins (2009). Observa-se na Tabela 4.3 que todos os traços finais apresentaram bordas uniformes e altas, indicando maior coesão da mistura. Teores anteriores que não se enquadraram nos parâmetros, apresentaram argamassas com pequena espessura de borda, tendendo a exsudação.

Feito estes ajustes no espalhamento, outro parâmetro a ser analisado foi o tempo de fluxo. Percebe-se na Figura 4.2 a relação direta em que à medida que o espalhamento das argamassas aumenta para o CPIV-SA5%, CPII-SA15% e CPI-SA15%, consequentemente, o tempo de fluxo diminui em comparação ao CPV-SA10% que teve o menor espalhamento e maior tempo de fluxo, isso se deve a maior viscosidade das argamassas. O mesmo ocorreu no estudo de Benabed et al. (2012) que concluíram que à medida que a porcentagem de finos de calcário na argamassa aumentava, o espalhamento diminuía e o tempo de fluxo da argamassa fresca aumentava devido a maior viscosidade do material.

Para as argamassas produzidas com adição de metacaulim, adotando o cimento CP V-ARI como referência, observa-se na Figura 4.3 que os ajustes para a argamassa com o cimento mais fino (CP IV) foi mínimo, contudo, para os demais cimentos (CP II-E e CP I) foi necessário incorporar mais adições de metacaulim (25%) para atender aos parâmetros da EFNARC (2002) e das condições de bordas de Martins (2009).

Na pesquisa realizada por Ouldkaoua et al. (2020), o autor utilizou o metacaulim como uma substituição parcial do cimento na AAN, os resultados obtidos no ensaio de mini funil-V mostraram que a introdução do metacaulim aumentou o tempo de fluxo e a viscosidade plástica, ou seja, diminuiu o espalhamento.

Neste trabalho, as argamassas com metacaulim tiveram o mesmo comportamento, que pode ser justificado pela finura dos materiais, pois enquanto a sílica corrigiu a exsudação em menores quantidades, o metacaulim por ser menos fino em relação à sílica, necessitou de maiores teores, e à medida que se aumentava o teor de adição, diminuía o espalhamento das argamassas.

Além disso, a geometria das partículas pode ter influenciado no comportamento. Enquanto na S.A predomina partículas esféricas que tendem a formar aglomerados arredondados, formados em função da alta energia superficial do material, favorecendo na mistura e espalhamento, o M.C é irregular e lamelar, ocasionalmente com a presença de partículas tubulares, observando-se também partículas aglomeradas (ROCHA, 2005; SILVA, 2016b).

Dosagens realizadas por alguns autores obtiveram resultados semelhantes a esta pesquisa dentro dos parâmetros da EFNARC (2002). Lopes et al. (2018) obtiveram AAN com espalhamento no mini *slump* de 25,2 cm e 7,46s no mini funil-V; Aboutaleb et al. (2017) testaram a fluidez da argamassa por mini *slump*, onde todas as argamassas estudadas tiveram fluidez adequada com espalhamento de 24cm; Madandoust et al. (2015) obtiveram argamassas com 25 ± 1 cm de espalhamento com tempo de fluxo variando de 7,7s a 10,3s, concluindo que a incorporação de nano partículas tornou as argamassas autonivelantes mais viscosas.

Conclui-se que, a variação dos resultados que ocorre entre um tipo de cimento e outro é a quantidade de adição mineral que é incorporada nas argamassas e o aumento da finura e área superficial específica de cada material. À medida que o material tem maior área superficial específica, menores são os teores de adição para correção da exsudação, porém maior é o teor de aditivo Sp necessário para promover fluidez.

Com os devidos ajustes, os ensaios permitiram chegar aos traços finais, onde todas as argamassas dosadas tiveram valores muito próximos entre si e que atenderam as faixas de valores considerados adequados pela EFNARC (2002) para uma AAN. Sendo assim, foi possível produzirem argamassas utilizando outros cimentos além do CP V-ARI e seguir na execução dos demais ensaios.

4.2.2 Ensaio de tempo de retenção de fluxo

O ensaio de retenção de fluxo foi realizado nos traços definidos nos ensaios preliminares nesta pesquisa, de acordo com o tipo de cimento e adição. Os resultados de espalhamentos médios para este ensaio podem ser observados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4- Retenção de fluxo das argamassas autonivelantes.

Leitura (min)	Espalhamento médio (cm)							
	CPV-SA10%	CPIV-SA5%	CPII-SA15%	CPI-SA15%	CPV-MC10%	CPIV-MC5%	CPII-MC25%	CPI-MC25%
0	24,8	25,9	25,2	25,7	24,8	25,9	24,4	24,2
20	22,5	18,5	22,1	22,9	23,3	19,6	20,2	23,4
30	22,0	16,8	21,0	20,9	22,7	17,7	18,5	22,8

A tendência de comportamento das argamassas com sílica ativa e metacaulim referidas na Tabela 4.4 pode ser visualizada nas Figuras 4.4 e 4.6 com o percentual de perda de espalhamento.

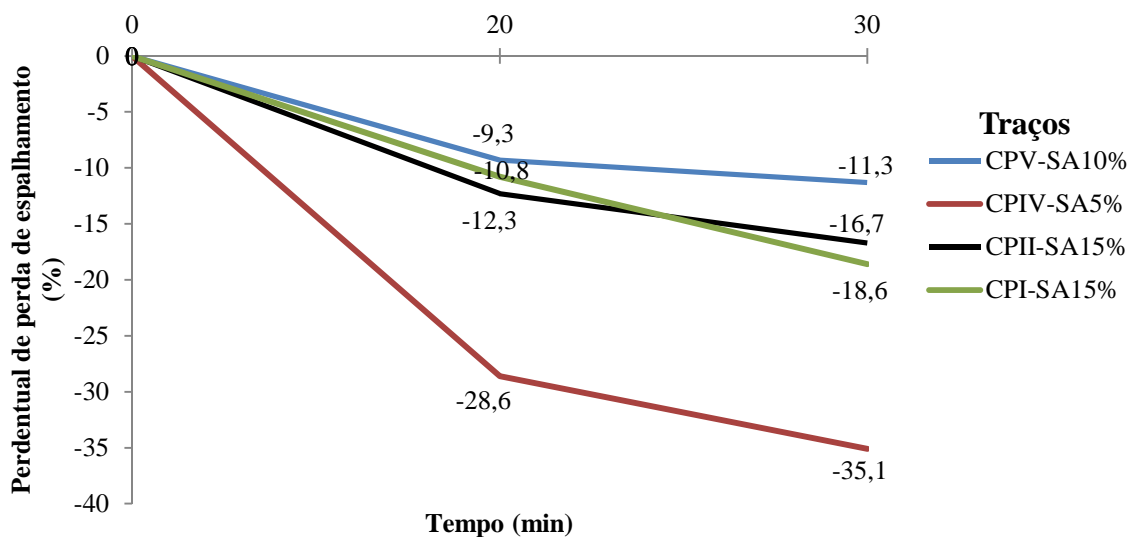


Figura 4.4 – Percentual de perda de espalhamento ao longo do tempo para cada tipo de cimento com sílica.

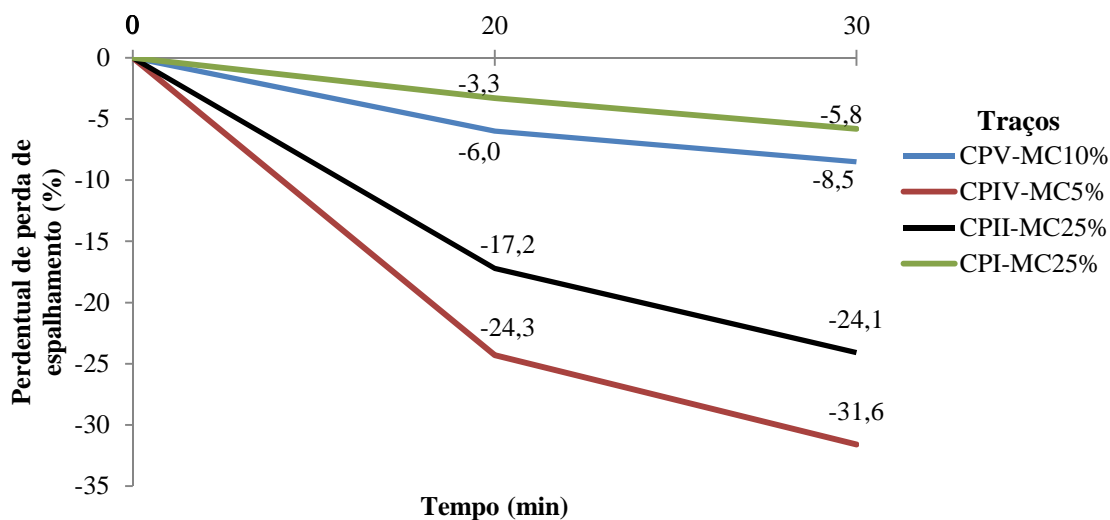


Figura 4.5 - Perda de espalhamento ao longo do tempo para cada tipo de cimento com metacaulim.

A norma C 1708 (ASTM, 2016) não estipula requisitos mínimo ou máximo, mas destaca a necessidade da argamassa apresentar um tempo de retenção de fluxo suficiente a ponto de não comprometer a aplicação e o acabamento do material. Com base na pesquisa de Nenevê (2017) que avaliou parâmetros de desempenho de forma a propor requisitos a ser considerados para ANN, o mesmo observou durante os ensaios que para o tempo de trabalho desejado, a taxa de retenção de fluxo deve ser inferior ou igual a 16%.

Analisando os resultados da Figura 4.4 para os cimentos produzidos com sílica, observa-se que os traços CPV-SA10%, CII-SA15% e CPI-SA15% apresentaram um comportamento parecido na perda de fluidez. A resposta similar se baseia na proximidade da área superficial entre os aglomerantes e do teor de adição de sílica, mostrando pouca diferença de perda de fluxo entre eles aos 20 min.

Nota-se que no traço de referência, CPV-SA10% obteve a menor perda de fluxo aos 20 min (9,3%) e 30 min (11,3%), enquanto no CII-SA15% e CPI-SA15% aos 20 min mostraram-se ainda trabalháveis (12,3% e 10,8%, respectivamente), porém aos 30 min iniciaram um processo de perda de fluidez, ultrapassando um pouco o limite estipulado por Nenevê (2017) de 16%. A justificativa para isso pode ser devido à alta superfície específica da sílica, pois apesar de que quanto mais finas forem as adições, menores são os teores para o aumento da viscosidade e coesão das misturas, ela pode diminuir a trabalhabilidade do material no estado fresco, como observado por Fung e Kwan (2010) e Ahari et al. (2015).

O CPIV-SA5% apresentou uma queda acentuada de retenção de fluxo com o passar do tempo, caracterizando a perda da trabalhabilidade em relação aos demais cimentos com taxas variando de 28,6% e 35,1% aos 20 e 30 min, respectivamente. Apesar do traço possuir o maior teor de Sp, a eficiência não foi a mesma para cada cimento, pois como mencionado por Tutikian e Dal Molin (2008), a eficiência do Sp reduz com o aumento da finura do cimento, devido à diminuição da concentração específica das moléculas absorvidas na superfície dos grãos de cimento.

Assim sendo, a perda de fluidez mais rápida do CP IV está ligado ao fato que o mesmo possui uma área superficial superior entre os aglomerantes, que, combinados com a elevada adição pozolânica em sua composição e os acréscimos de sílica, a interação desses fatores podem ter diminuído a ação do Sp, perdendo a eficiência ao longo do tempo e reduzindo a água livre na argamassa.

Em termos de aplicabilidade, as quedas na retenção de fluxo e no espalhamento prejudicaria o uso dessas argamassas após 20 min, pois dificultariam o bombeamento, podendo levar ao entupimento dos mangotes e comprometendo o acabamento do material.

Analisando os resultados da Figura 4.5 para as argamassas com metacaulim, observa-se que os traços CPV-MC10% e CPI-MC25% apresentaram a menor perda de fluidez e trabalhabilidade aos 20 min (6,0% e 3,3%) e 30 min (8,5% e 5,8%) nesse grupo. Pode-se entender que as adições de metacaulim contribuíram para manter a fluidez, reduzindo a tensão de escoamento do material, pois suas minúsculas partículas dispersas no sistema promovem o deslocamento das moléculas de água vizinhas aos grãos de cimento. Com isso, as moléculas de água presas entre as partículas de cimento floculadas podem ser liberadas e contribuir com a fluidificação da mistura.

O CPI-MC25% apesar de ter um maior teor de metacaulim em relação ao traço de referência, ainda obteve trabalhabilidade devido à própria característica do cimento. Segundo Mehta e Monteiro, (2014) a finura do cimento, também, é um fator que define a velocidade de hidratação do grão e a taxa de pega. Como o CP I não é um dos cimentos mais finos entende-se que tem sua dissolução mais lenta.

Em contrapartida, os traços CPIV-MC5% e CPII-MC25% apresentaram a maior perda de espalhamento durante os 20 min (24,3% e 17,2%) e 30 min (31,6% e 24,1%) ultrapassando o limite recomendado (16%). Assim como houve perda significativa no traço CPIV-SA5%, o mesmo comportamento foi apresentado com a adição de

metacaulim, pela mesma razão mencionada anteriormente com o uso do cimento CPIV nas argamassas, onde o alto teor de finos influenciou na eficiência do aditivo superplastificante.

Em relação ao traço CPII-MC25%, o mesmo apesar de apresentar menor área superficial entre os demais cimentos, este possui alto teor de metacaulim (25%) adicionado que forneceu coesão ao espalhamento inicial. Contudo, com o passar do tempo, houve perda de trabalhabilidade devido às reações de hidratação dos aluminatos que pode ter absorvido a água, pois, quanto maior o teor de metacaulim adicionado, maior foi a taxa de retenção de fluxo quando comparado ao traço de referência.

Já a perda de fluxo é algo inerente do processo e varia de acordo com cada material. A escolha é determinada em função daquele que apresenta melhor comportamento a ponto de não comprometer a aplicação do material. As argamassas que apresentaram um comportamento satisfatório segundo os critérios de Nenevê (2017) foram CPV-SA10%, CPV-MC10%, CPI-MC25% até 20 e 30 min e somente aos 20 min para o CPII-SA15% e CPI-SA15%.

4.2.3 Ensaio de tempo de cura

O ensaio de tempo de cura foi executado conforme as diretrizes da norma C 1708 (ASTM, 2016), na Figura 4.6 apresentam-se os resultados obtidos.

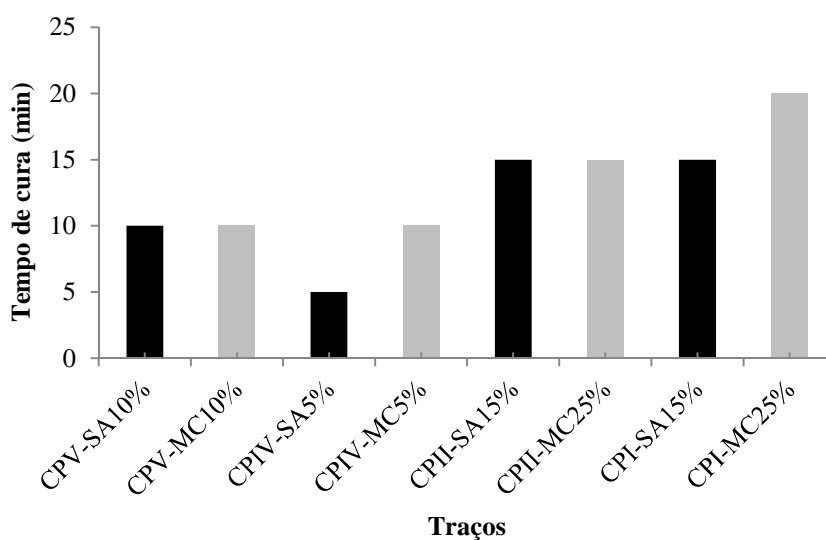


Figura 4.6 – Resultados do tempo de cura das AAN's.

Observa-se na Figura 4.6 que a cura das argamassas autonivelantes produzidas tiveram um tempo em aberto ou tempo de cura variando entre 10 a 20 min. Cichinelli (2012) cita em seu artigo, entre as características técnicas de um contrapiso autonivelante industrializado, o tempo em aberto médio da mistura é de 15 a 20 min. No trabalho de Oliveira (2019) o tempo em aberto entre as argamassas variou de 15 a 25 min e em Mendes (2019) estabeleceu-se dentro de 15 a 20 min.

Nesta pesquisa, os traços utilizando CP V-ARI com sílica ativa e metacaulim e CP IV com sílica estão abaixo do intervalo por elas citado. Essa resposta pode ser relacionada com o enrijecimento ao longo do tempo da argamassa inicialmente fluída, devido as reações de hidratação e a reatividade das fases do cimento por meio das condições de temperatura e pressão da cura bem como o efeito das formações dos produtos hidratados.

O tempo de cura proveniente do CP V-ARI pode estar atrelado a sua composição por conter mais clínquer e ter uma elevada área superficial que o torna mais reativo levando seu processo de cura mais rápida, apresentando pouco tempo de trabalhabilidade na prática.

Em relação ao CPIV-SA5%, observa-se um menor tempo de cura onde se esperava que por conter mais aditivo Sp, o tempo de cura fosse maior como foi para o CPIV-MC5%, pois assim como no trabalho de Chaves (2019), a mesma associou o maior tempo de cura para o traço de referência que levou mais aditivo Sp influenciando no resultado. Pode-se levar em consideração para este resultado a influência da adição de sílica ativa com o CP IV que acelera o processo de cura por ser mais fino e reativo que o metacaulim.

As demais argamassas aprovados com cimento CP II-E e CP I, por sua vez, apresentaram tempo de cura praticamente igual, entre 15 a 20 min, tendo se mostrado maior que o cimento de referência, fato que pode ser também atrelado a menor finura do cimento e maior quantidade de adição mineral, promovendo as reações de hidratação de forma mais lenta.

Como mostrado na Figura 4.6 os resultados dos traços CP IV-MC5%, CPII-SA15%, CPII-MC25%, CPI-SA15% e CPI-MC25% foram mantidos em um intervalo de tempo normal para sua aplicação conforme as autoras Cichinelli (2012), Oliveira (2019) e Mendes (2019).

4.2.4 Ensaio de densidade de massa e teor de ar incorporado

O ensaio da densidade de massa e teor de ar aprisionado foi realizado conforme preconiza a NBR 13278 (ABNT, 2005). A Tabela 4.5 mostra os resultados das AAN's no estado fresco.

Tabela 4.5 - Resultados de densidade e teor de ar incorporado das AAN's.

Traço	Densidade de massa (g/cm ³)	Teor de ar incorporado (%)
CPV-SA10%	1,80	17,0
CPIV-SA5%	1,84	14,9
CPII-SA15%	1,79	17,5
CPI-SA15%	1,87	14,4
CPV-MC10%	1,80	16,5
CPIV-MC5%	1,84	14,9
CPII-MC25%	1,78	18,2
CPI-MC25%	1,80	16,4

Analisando os resultados expressos na Tabela 4.5, as diferenças entre a densidade de massa dos traços com sílica e metacaulim não sofreram grande variabilidade perante a mudança dos materiais. Entre a menor densidade de massa do traço CPII-MC25% e a maior CPI-SA15%, notou-se uma diferença de apenas 4,8%.

Os resultados permitem observar que houve uma gradual redução na densidade de massa das argamassas ao passo que o teor de ar foi sendo aumentado, conforme esperado.

Para os teores de ar incorporado encontrado entre 14,4 % a 18,2%, podem ser comparados aos observados em outros trabalhos disponíveis na literatura como Silva (2016a) com teores de ar incorporado entre 12,0% e 16,0%, Nenevê (2017) que obteve resultados entre 17,9% e 19,8% e Júnior (2016) onde as argamassas que resultaram maiores densidades geraram uma diminuição de ar incorporado no interior das amostras com teores variando entre 8,60% e 13,40%.

Segundo Nenevê (2017), o valor máximo para o teor de ar incorporado equivale a 16%, garantindo aspectos positivos quanto à resistência à entrada de agentes agressivos com suas conseqüentes manifestações patológicas.

A diferença de densidade e o teor de ar incorporado para cada traço pode sofrer influência de uma série de fatores como o tipo de misturador, tempo de mistura, fator

a/c, granulometria do agregado, viscosidade, velocidade de mistura, teor de aditivo, dentre outros. Nesta pesquisa, como o traço é fixo para todas as formulações, assim como o procedimento de mistura, fator a/c e o mesmo intervalo de espalhamento para as argamassas (24 a 26 cm), os resultados para o ensaio de densidade e teor de ar incorporado acompanharam a mesma tendência com pouca variação nos resultados.

A diminuição do teor de ar incorporado com o aumento da densidade das misturas pode ser associada à sua fluidez verificada no ensaio de mini *slump*, onde os traços CPV-SA10%, CPII-SA15%, CPV-MC10%, CPII-MC25%, CPI-MC25% foram os que apresentaram um espalhamento um pouco menor e teor de ar incorporado mais alto em comparação aos CPIV-SA5%, CPI-SA15% e CPIV-MC5%, que apresentaram espalhamento maior e menor teor de ar. Este mesmo comportamento foi observado pelos autores Fortunato et al. (2019), em que os valores de densidade de massa reduziram com o aumento do percentual de substituição de cimento por fino de britagem, e conseqüentemente, houve diminuição da fluidez e aumento do teor de ar incorporado.

Isto pode ser justificado pelo fato de todas as argamassas já apresentarem uma consistência semelhante e ideal para cada tipo de cimento, sem apresentar excesso de água livre disponível, já que foi realizada a correção da exsudação com finos, pois uma argamassa com baixa viscosidade favorece uma maior quantidade de água livre para a formação de bolhas, atuando de forma desfavorável por aumentar a velocidade de deslocamento das bolhas para escaparem na superfície.

Sendo assim, entende-se que a diferença entre os resultados das argamassas que tiveram uma fluidez um pouco mais alta e sem exsudação contribuiu com o empacotamento das partículas preenchendo melhor os vazios.

Considerando que não existe uma norma ou parâmetro específico para a AAN em relação a esse aspecto, mas considerando o parâmetro do autor Nenevê (2017), os traços que atenderam com menor teor de ar igual ou inferior a 16% foram CPIV-SA5%, CPI-SA15% e CPIV-MC5%.

4.2.5 Ensaio de determinação de exsudação

O ensaio de exsudação realizado mediu a quantidade de água que se desprendia das misturas das argamassas, após seu procedimento de mistura. O ensaio foi realizado nas oito argamassas autonivelantes e os resultados são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Valores médios obtidos para o ensaio de exsudação das argamassas.

Traços	CPV- SA10%	CPIV- SA5%	CPII- SA15%	CPI- SA15%	CPV- MC10%	CPIV- MC5%	CPII- MC25%	CPI- MC25%
Taxa de exsudação (%)	5,4	0	3,3	7,1	5,8	0	4,7	7,3

Conforme observado na Tabela 4.6 o valor mínimo e máximo foi de 0% a 7,3% de exsudação. De acordo com a literatura, uma taxa de exsudação adequada seria próxima a um valor nulo. Para os traços de referência nos dois grupos, CPV-SA10% e CPV-MC10%, não houve discrepância nos resultados 5,4% e 5,8%, respectivamente, pois os mesmos foram dosados com os mesmos teores de superplastificante e adições minerais.

Comparando-o com os demais cimentos, os traços utilizando o cimento CP IV foram nulos, este comportamento se deve a elevada área superficial do cimento e adição pozolânica na sua composição que contribuiu para a maior coesão do material. Ademais, este resultado também decorreu do rápido enrijecimento do material e perda de trabalhabilidade das misturas com o passar do tempo, comprovado no ensaio de retenção de fluxo.

Além do CP IV, o CP II-E apresentou baixas taxas de exsudação, observa-se que houve uma pequena diferença da quantidade de água exsudada, onde o CPII-SA15% resultou em uma taxa um pouco menor que 3,3% em relação ao CPII-MC25% com 4,7%, mesmo este último levando mais adição de metacaulim em seu traço. Isso pode ser justificado com base na maior área superficial da sílica em relação ao metacaulim, bem como à sua elevada absorção, que ajudam a moderar a quantidade de água livre da mistura.

Rubin (2015), em sua pesquisa que também empregou este ensaio, obteve resultados nulos, ou seja, sem exsudação para suas formulações por conta do elevado teor de finos. Hamoy (2017) em seu trabalho obteve argamassas com valores para a

quantidade de água exsudada entre 0,15% e 7,20%, enquanto Oliveira (2019) obteve argamassas com taxas de exsudação relativamente baixas, onde não houve grande diferença entre os valores do menor resultado (2,04%) para o maior (2,61%).

Para o CP I, os traços CPI-SA15% e CPI-MC25%, tiveram as maiores taxas de exsudação com 7,1% e 7,3%, respectivamente, ao passo que os resultados para ela encontrados foram mantidos próximos daqueles encontrados por outros autores citados anteriormente. Entretanto, Hamoy (2017) cita que taxas maiores de exsudação possa ser um aspecto negativo, tendo em vista o tipo de aplicação a que esta argamassa se destina, pois, forma uma película de baixa resistência na superfície do piso, contribuindo para o desgaste do material.

Pode-se inferir que apesar dos traços produzidos utilizando CP I possuem área superficial maior em relação ao CP II-E, o mesmo utilizou também um teor de aditivo Sp um pouco maior que o CP II-E em sua dosagem, retendo mais água em suas formulações. No entanto, os traços utilizando CP II-E exsudaram menos que o CP V-ARI o que pode ser explicado pelos maiores teores de finos adicionados e o menor uso de aditivo nos traços.

De maneira geral, todos os traços apresentaram valores consistentes com os apresentados por outras pesquisas citados anteriormente, e por meio deste ensaio, permitiu observar que os traços que menos exsudaram foram com o cimento CP IV e CP II-E.

4.3 Efeito do tipo de cimento no comportamento mecânico

O desenvolvimento do comportamento mecânico das argamassas estudadas ao longo do tempo, expresso em termos de resistência à compressão e à tração na flexão, e variação dimensional são apresentados nos itens 4.3.1, 4.3.2 e 4.3.3, respectivamente.

4.3.1 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado nas argamassas autonivelantes para a idade de 28 dias, conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005). Os resultados foram analisados estatisticamente, excluindo os dados espúrios para os traços

estudados. Na pesquisa foi considerado dado espúrio aquele que não pertencia ao intervalo médio. Os resultados das resistências estão dispostos na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Resistência à compressão das argamassas autonivelantes.

Traços	CPV-SA10%	CPIV-SA5%	CPII-SA15%	CPI-SA15%	CPV-MC10%	CPIV-MC5%	CPII-MC25%	CPI-MC25%
Média (MPa)	49,37	35,62	25,87	41,82	47,76	42,97	27,49	47,45
Desvio padrão (MPa)	2,10	2,98	1,40	2,23	1,89	1,48	2,00	0,89
Coefficiente de variação (%)	4,00	8,00	5,00	5,00	4,00	3,00	7,00	2,00

Na Figura 4.7 é apresentada a distribuição das resistências médias de acordo com o tipo de cimento e teor de finos adicionado. Os mesmos podem ser comparados por meio da Tabela 4.7.

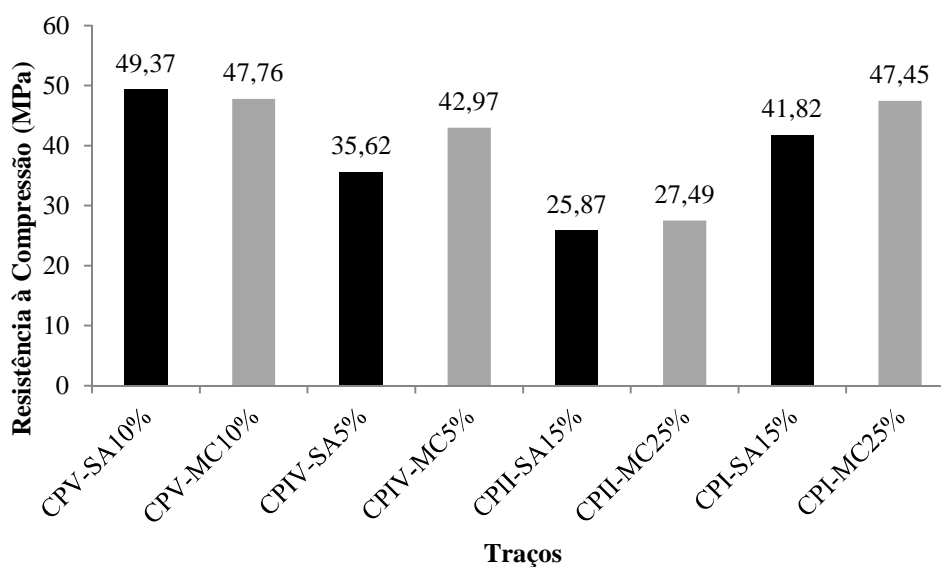


Figura 4.7 - Resistência à compressão nos cimentos aos 28 dias.

De acordo com a norma EFNARC (2001) a resistência à compressão simples de pisos autonivelantes é igual ou maior que 20 MPa. Analisando os resultados alcançados nesta pesquisa, representados na Figura 4.7, verifica-se que todos estão de acordo com a referida norma e com os resultados encontrados por Lopes et al. (2018), que utilizando um traço 1:2 produziram argamassas autonivelantes (AAN's) empregando pó de resíduo proveniente do corte de mármore granito como *filler*, obtendo resistência de 40 MPa.

Outros trabalhos como de Carvalho (2015), que também utilizou o mesmo traço para produzir AAN's utilizando uma mistura ternária de adição de *filler* calcário, cinza volante e resíduo de demolição de construção, alcançaram resistências entre 30 e 35 MPa; Turk (2012) que testou 25 AAN's com misturas binárias e ternárias de sílica ativa e cinza volante, obteve resultados entre 38 MPa e 56 MPa.

Analisando as resistências utilizando o cimento de referência CP V-ARI, observa-se que resultaram em uma das maiores resistências com 49,37 MPa e 47,76 MPa, ambos com 10% de sílica e metacaulim, respectivamente.

Os traços CPV-SA10% e CPV-MC10% apresentaram elevada resistência por ser um cimento puro, sem conter adições e possuir uma moagem fina, levando ao desenvolvimento da alta resistência inicial, uma vez que é um cimento rico em silicato tricálcico (C_3S) que o torna mais reativo, resultando em resistências superiores aos demais.

Observa-se que no CP IV a resistência foi inferior ao de referência, com 35,62 MPa para o traço CPIV-SA5% e 42,97 MPa para o traço CPIV-MC5%. Este comportamento pode ser justificado com base na hidratação do cimento pozolânico que ocorre de forma mais lenta, afetando diretamente a porosidade do material, e, conseqüentemente, a resistência à compressão. Neste sentido, a resistência final ainda não foi atingida aos 28 dias, sendo inferior ao CP V-ARI devido a fatores relacionados com a velocidade das reações de hidratação do cimento, a menor quantidade de clínquer na composição em função da substituição por pozolanas, bem como o menor teor de C_3S .

Em pesquisas de alguns autores como Güneyisi et al. (2012), Mardani-Aghabaglou, Sezer e Ramyar (2014) e Chu e Kwan (2019) descobriram que, às vezes, o metacaulim tem uma maior eficiência de cimentação e, às vezes, é a sílica ativa. Contudo, segundo Ding e Li (2002), Tafraoui; Escadeillas e Vidal (2016); Akcay e Tasdemir (2018) na maioria dos casos, as eficiências de cimentação utilizando metacaulim e sílica eram mais ou menos as mesmas. Para o CP IV nesta pesquisa, percebe-se a melhor eficiência do metacaulim no incremento na resistência do que a sílica.

Verificou-se que as resistências para o cimento CP II-E difere significativamente das demais AAN's, devido ao seu baixo teor de clínquer e a sua menor área específica

sendo menos reativa, pois segundo Bauer (2013) quanto maior for a finura, melhor será a resistência.

As resistências do CP II-E, mesmo sendo inferiores ao CP V-ARI atenderam aos requisitos, onde o traço da argamassa CII-SA15% alcançou uma resistência à compressão de 25,87 MPa, sendo um pouco menor em relação ao CII-MC25% com 27,49 MPa. Além disso, é possível que o CP II-E ainda não tenha atingido sua resistência final aos 28 dias, pois como é um cimento de baixo calor de hidratação sua reatividade é mais lenta, ainda mais com a incorporação de pozolanas como a sílica e metacaulim.

Em relação ao CP I, assim como o cimento CP V-ARI, o mesmo também é um cimento puro e sem adições, onde o CPI-SA15% e CPI-MC25% alcançaram resistência próximas (41,82 MPa e 47,45 MPa, respectivamente) do traço de referência, mesmo o CP I contendo menor área específica em comparação, é um cimento que também oferece alta resistência pelo alto teor de clínquer em sua composição que contribuiu juntamente com a adição minerais.

Esse resultado pode ser atribuído tanto ao efeito físico devido à superfície específica da sílica e metacaulim como fino provocarem um maior adensamento da mistura pelo refinamento dos poros, deixando-o mais resistente, como também pelo efeito químico quando o hidróxido de cálcio do cimento reage com a sílica da pozolana, formando produtos como os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), comprovando o mesmo efeito em outros estudos de Freitas et al. (2010), Li e Kwan (2014) e Coelho (2016) e conforme demonstrado na revisão.

Portanto, além do melhor preenchimento dos vazios capilares, esses silicatos favoreceram a resistência da matriz cimentícia para o cimento CP I. Como as duas adições apresentaram tamanho de partículas próximas, as resistências de ambas são próximas entre si, valendo para os demais tipos de cimentos.

De forma geral, comparando com os requisitos da EFNARC (2001) todas as argamassas produzidas com sílica quanto com metacaulim apresentaram resultados satisfatórios com resistência mecânica superior a 20 MPa.

Ademais, segundo a NBR 12041 (ABNT, 2012) as resistências das argamassas CPV-SA10%, CPI-SA15%, CPV-MC10%, CPIV-MC5%, CPI-MC15% podem ser consideradas como argamassa autonivelante de alta resistência mecânica para pisos, uma vez que apresentaram resistência superior a 40 MPa, limite mínimo prescrito pela

norma. Para Seifert et al. (2012) a elevada resistência inicial é considerada um parâmetro necessário em argamassas autonivelantes.

Contudo, as elevadas resistências eram esperadas devido o traço ser rico e compatível com as resistências fornecidas pelo fabricante aos 28 dias, apresentados na Tabela 3.4 do subitem 3.2.1.2, na qual pode contribuir para o surgimento de manifestações patológicas, como o deslocamento do material.

4.3.2 Resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado nas argamassas autonivelantes na idade de 28 dias, conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005). Os resultados das resistências estão dispostos na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Resistência à tração na flexão das argamassas autonivelantes.

Traços	CPV-SA10%	CPIV-SA5%	CPII-SA15%	CPI-SA15%	CPV-MC10%	CPIV-MC5%	CPII-MC25%	CPI-MC25%
Média (MPa)	10,71	8,11	8,59	9,35	10,63	9,40	8,95	9,90
Desvio padrão (MPa)	0,60	0,64	0,39	0,57	0,61	0,61	0,13	1,06
Coefficiente de variação (%)	6,00	8,00	4,00	6,00	6,00	7,00	1,00	11,00

Na Figura 4.8 é apresentada a distribuição das resistências médias.

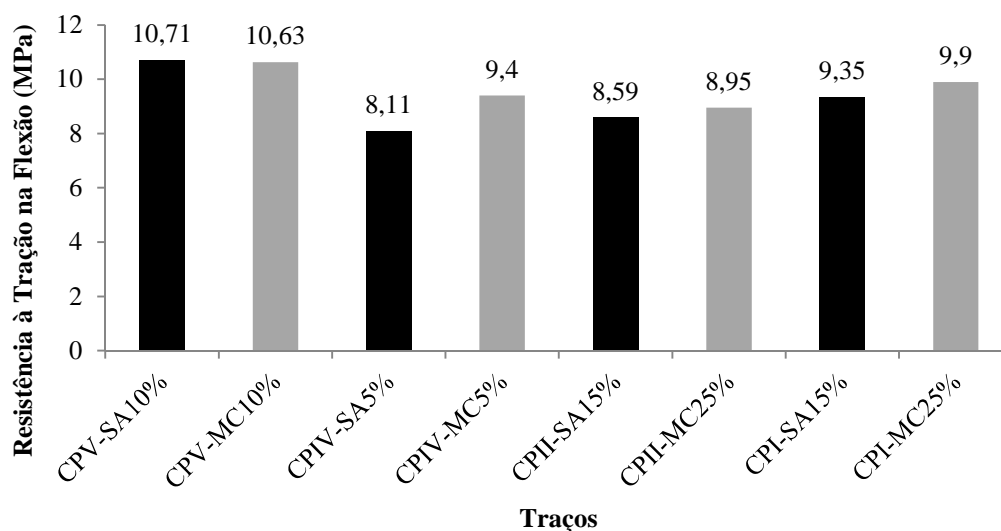


Figura 4.8 - Resistência à tração na flexão aos 28 dias.

Segundo a norma EFNARC (2001), pisos autonivelantes devem ter resistências à flexão maiores ou iguais a 5 MPa. Verifica-se que os resultados desta pesquisa estão dentro da faixa de resistência encontrados na literatura como Silva (2016a), em que a argamassa atingiu resistência média de aproximadamente 7 MPa a 12 MPa; Freitas et al. (2010) que avaliou as propriedades de AAN's com adições minerais de metacaulim e cinza de biomassa da cana-de-açúcar em substituição a uma parcela do cimento, na qual obteve resistências na tração a flexão de 7,5 MPa a 13 MPa; Yang et al. (2019) que obtiveram resistência de aproximadamente 9,5 MPa aos 28 dias.

As argamassas utilizando o cimento de referência CP V-ARI resultaram em uma das maiores resistências para os traços CPV-SA10% com 10,71 MPa e 10,63 MPa para CPV-MC10%, assim como no ensaio de resistência à compressão.

Utilizando o cimento CP IV houve um decréscimo de resistência em comparação ao cimento CP V-ARI, com 8,11MPa e 9,40 MPa para os traços CPIV-SA5% e CPIV-MC10%, respectivamente, porém ainda dentro dos parâmetros da EFNARC (2001). Esse decréscimo está atrelado ao fato que o cimento levou mais adições em sua dosagem sendo que já há um alto teor de pozolana na composição.

À presença de alto teor de pozolana na composição torna o seu calor de hidratação mais baixo, interferindo na velocidade com que a pozolana reagiu (na presença de água) com hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), proveniente da reação de hidratação do cimento mais lenta e o seu ganho final de resistência não tenha sido atingido.

As resistências do CP II-E e também do CP I, assim como nos ensaios de compressão, a mudança de cimento não prejudicou as resistências, mesmo sendo inferiores ao CP V-ARI atenderam aos requisitos, onde o traço da argamassa CPII-SA15% e CPI-SA15% alcançaram uma resistência à tração na flexão de 8,59 MPa e 9,35 MPa, respectivamente, sendo um pouco menor em relação ao CPII-MC25% e CPI-MC25% com 8,85 MPa e 9,90 MPa, respectivamente.

Pode concluir que todos os resultados para as AAN's visto nesta pesquisa, atenderam a resistência na tração na flexão mínima definida na norma EFNARC (2001) variando com valor mínimo de 8,11 MPa até 10,95 MPa.

4.3.3 Variação dimensional

Além dos parâmetros reológicos e de resistência mecânica, é interessante avaliar-se as variações dimensionais dos traços produzidos, pois uma das principais patologias que possa vir a ocorrer ao longo do tempo é o surgimento de fissuras ocasionado pela retração no material.

A Figura 4.9 e 4.10 apresentam os valores médios de retração de cada formulação ensaiada, correspondentes aos dias 1, 7 e 28, de acordo com a NBR 15261 (ABNT, 2005). Todos os demais dados do ensaio estão disponíveis no Apêndice A.

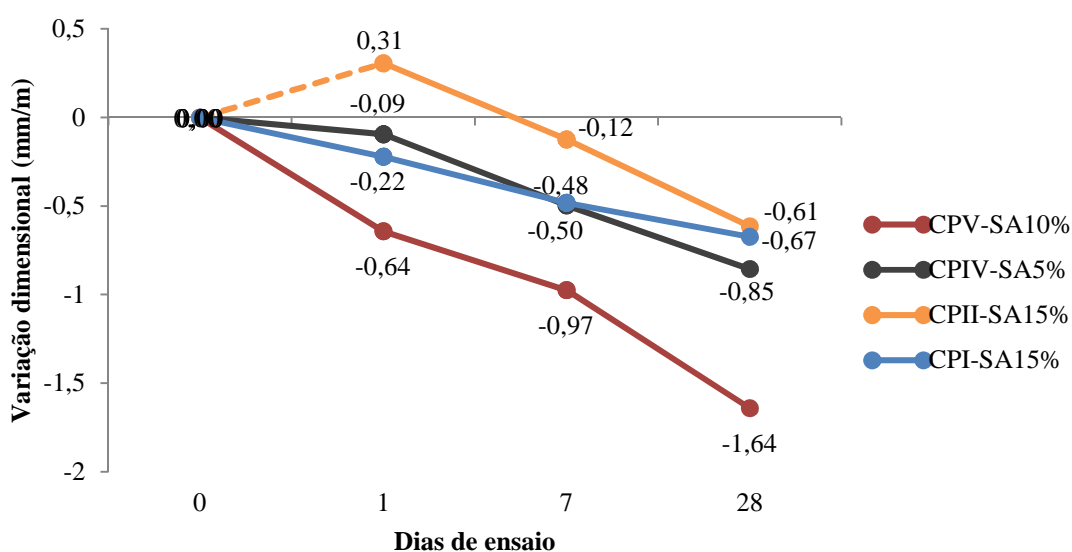


Figura 4.9 - Retração das argamassas autonivelantes com sílica ativa.

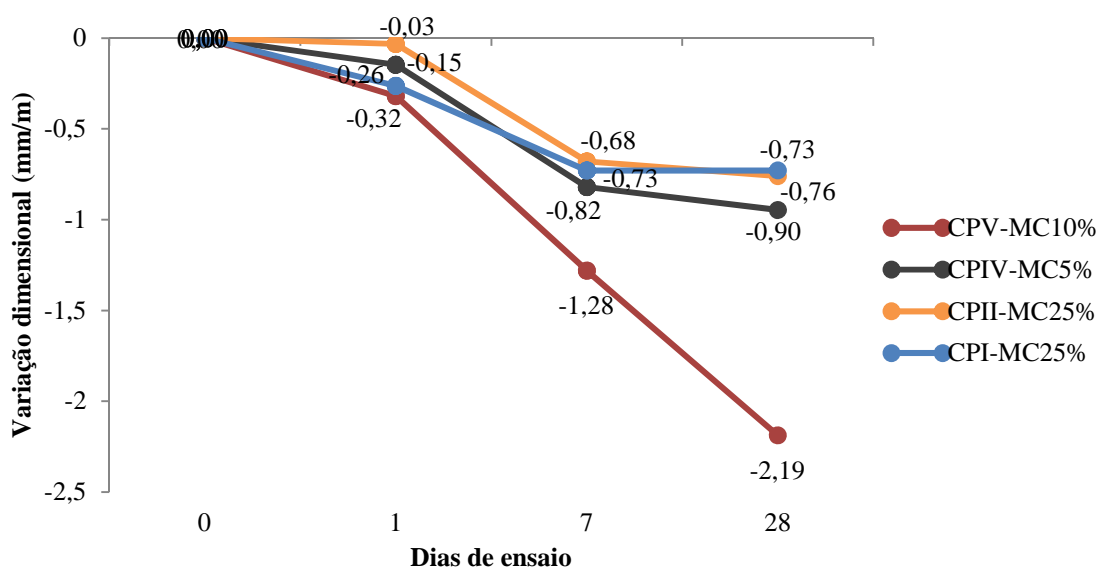


Figura 4.10 - Retração das argamassas autonivelantes com metacaulim.

Compararam-se os resultados expostos na Figura 4.9 e 4.10 nos valores de referência recomendado na literatura obtido por Nenevê (2017), onde o mesmo fez uma síntese com os diversos parâmetros de análise e respectivos valores sugeridos para obtenção de uma AAN que atenda ao padrão de desempenho, baseando-se aos intervalos de valores obtidos das formulações desenvolvidas em seu trabalho e por Silva (2016a), de modo que concluiu que a variação dimensional aos 28 dias deveria ser menor ou igual a 0,80 mm/m.

Observa-se que tanto os traços utilizando sílica quanto metacaulim exibiram um comportamento semelhante para cada tipo de cimento. O CPV-ARI e o CP IV apresentaram variações de deslocamento maiores que 0,80 mm/m aos 28 dias com adição de sílica, 1,64 e 0,85 mm/m e com metacaulim 2,19 e 0,90 mm/m, respectivamente.

Estudos realizados por autores como Onish e Bier (2010) e Benabed et al. (2012) verificaram que a retração em sistemas autonivelantes é influenciada pelo elevado teor de partículas finas necessárias para atingir a fluidez eficaz e que de acordo com Bauer (2005) o elevado consumo de cimento aumenta o módulo de elasticidade deixando-as mais rígidas e, conseqüentemente, com menos capacidade de deformar-se sem romper, gerando um maior risco de fissuração.

Com base na literatura, a elevada retração proveniente do CP V-ARI e CP IV era esperada, devido a propriedade física e química do cimento, pois os cimentos possuem moagem mais fina, resultando em uma alta reatividade nas primeiras horas, provocando o enrijecimento e alterações na consistência inicial pela perda de parte da água de amassamento, originando as fissuras.

Observa-se que, as argamassas que sofreram menor retração foram os cimentos CP II-E e CP I com adições de sílica ativa e metacaulim. Por se tratar de um cimento com menor área superficial específica e próxima entre si em comparação aos demais cimentos já discutidos anteriormente, ambos apresentaram aos 28 dias pequenas diferenças de variações 0,61 e 0,67 mm/m para CP II-E com sílica e metacaulim, respectivamente, e 0,76 e 0,73 mm/m para CP I com sílica e metacaulim, respectivamente, que atenderam ao requisito.

Para o CII-SA25%, observa-se que apresentou valor positivo representado pela linha pontilhada no gráfico da Figura 4.11 da desforma até o 1º dia, indicando expansão do material, sendo este um resultado não esperado. Essa variação pode ter ocorrido,

possivelmente, pelo aumento da umidade do ambiente, justificando a existência da reta ascendente, mas que ao longo do tempo a mesma foi sofrendo retração ou até mesmo por erro na leitura.

Segundo Hamoy (2017) no meio técnico e científico, a redução do clínquer de cimento Portland em um dado cimento reduz de maneira significativa a produção de calor na hidratação do cimento e que segundo esse princípio o cimento Portland composto, CP II é indicado na produção de AAN, pois atende as especificações da EFNARC (2002) com relação à reduzido teor de aluminato tricálcico (C_3A) na sua composição

Diante dos resultados é possível concluir que as argamassas produzidas com CP II-E, CP I e CP IV apresentaram um bom desempenho para os ensaios de retração. Em relação ao CP V-ARI, os traços apresentaram valores mais altos para retração podendo ocasionar problemas de fissuras futuramente, pois assim como afirma os autores Alrifai, et al. (2013) quanto maior a variação de volume gerada no material entre o estado fresco e endurecido, mais acentuada será a retração, e dessa forma, mais significativas tornam-se as fissuras.

4.4 Desempenho das AAN's

Várias informações foram coletadas através dos ensaios de caracterização da argamassa autonivelante (AAN), e assim buscou-se sintetizar as respostas de vários aspectos avaliados, organizando tais análises e indicando o mais recomendável.

Vale salientar que ainda não existe uma normatização brasileira para os ensaios aplicados na AAN, o que pode resultar em divergências no meio técnico quanto às especificações e medidas. Contudo, a maioria dos autores abordados nesta pesquisa utilizaram os mesmos testes, porém podendo variar nas medidas e intervalos.

O Quadro 4.1 apresenta uma visão geral dos resultados alcançados.

Quadro 4.1-Síntese dos resultados das propriedades das argamassas autonivelantes.

Ensaio		Mini <i>slump</i> e mini funil-V	Retenção de fluxo	Tempo de cura	Teor de ar incorporado	Determinação de exsudação	Resistência mecânica	Varição dimensional
Adição de sílica	CPV-SA10%							
	CPIV-SA5%							
	CPII-SA15%							
	CPI-SA15%							
Adição de Metacaulim	CPV-MC10%							
	CPIV-MC5%							
	CPII-MC25%							
	CPI-MC25%							
Requisitos/Desempenho	Ótimo	≥ 24 e ≤ 26 cm e ≥ 7 e ≤ 11 s	$\leq 16\%$	20 min	$\leq 16\%$	0	≥ 20 MPa à compressão e ≥ 5 MPa à tração na flexão	< 8 mm
	Bom	-	> 16 e $< 20\%$	15 min	> 16 e $< 20\%$	$< 5\%$	-	$= 8$ mm
	Ruim	< 24 e > 26 cm e < 7 e > 11 s	$\geq 20\%$	10 min	$\geq 20\%$	$\geq 5\%$	< 20 MPa à compressão e < 5 MPa à tração na flexão	> 8 mm

Algumas das principais características que uma AAN deve apresentar é a elevada capacidade de fluir com coesão, ter resistência à segregação e apresentar pouca retração. Analisando os resultados das argamassas produzidas, observa-se que a maioria das amostras atingiu desempenho variando de ótimo a bom, oscilando para ruim em alguns aspectos.

No ensaio de mini *slump* e mini funil-V, todos os traços utilizando a sílica ativa e metacaulim como adição mineral, atenderam aos parâmetros da EFNARC (2002). Em relação à retenção de fluxo, a maioria dos traços teve um desempenho ótimo a bom,

com exceção das argamassas produzidas com CP IV que tiveram um desempenho ruim, pois o mesmo teve a maior perda de fluxo ao longo do tempo.

No ensaio de tempo de cura, as argamassas produzidas com CP V-ARI tiveram um desempenho considerado ruim, uma vez que teve um tempo de cura muito rápido que poderá comprometer a trabalhabilidade da argamassa. Em relação ao teor de ar incorporado, as AAN's que apresentaram desempenho ótimo foram CP IV-SA5%, CPI-SA15% e CPV-MC10% com uma taxa de até 16%. As demais argamassas apresentaram uma pequena variação, enquadrando-as como desempenho bom.

No ensaio de determinação de exsudação não existe nenhum parâmetro determinado por norma, porém entende-se que quanto menor a taxa de exsudação, mais adequado é o resultado. Neste trabalho sugere que o melhor desempenho obtido foram os traços com taxas de exsudação menor que 5%, ou seja, as argamassas utilizando o CP IV e CP II-E.

No estado endurecido, todas as amostras alcançaram desempenho ótimo com altas resistências. Na variação dimensional, todos os traços apresentaram resultados considerados desempenho ótimo a bom, com exceção das argamassas com CP V-ARI E CP IV que tiveram a maior retração, mostrando que, apesar de ter apresentado boa fluidez e resistência, a elevada retração pode gerar fissuras no produto final ao longo do tempo.

Os traços que obtiveram os melhores resultados utilizando a sílica ativa em primeiro lugar foi CPIX-SA15%, seguido do CPI-SA15%, do CPIX-SA15%, e por último CPV-SA10% e para os traços com metacaulim em primeiro lugar foi CPIX-MC25%, seguido do CPI-MC25%, CPIX-MC15%, e CPV-MC10%.

De uma forma geral, pode-se inferir que todas as argamassas autonivelantes produzidas nesta pesquisa poderiam ser utilizadas de acordo com sua aplicação, devendo-se levar em consideração seus pontos positivos e negativos que possa vir a interferir no produto.

Vale ressaltar que os traços produzidos com CP II-E e CP IV são altamente recomendáveis, uma vez que, além do ótimo desempenho, são cimentos locais, e que, utilizados na AAN, tornam-se produtos alternativos em substituição ao CPV-ARI, cimento difícil de ser encontrado na região. Outro ponto a ser considerado, é o uso da adição mineral de sílica e metacaulim no lugar do aditivo modificador de viscosidade, que demonstrou ser excelente nas propriedades das argamassas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa possibilitou avaliar o comportamento da argamassa autonivelante no estado fresco e endurecido. Com os devidos ajustes para cada material, todos os traços utilizando diferentes cimentos e adições puderam compor as AAN's, atendendo as normatizações da EFNARC (2002), evidenciando que o método adaptado de Tutikian (2004) adaptado por Lopes et al. (2018) foi satisfatório na dosagem das argamassas.

Os resultados dos ensaios no estado fresco atenderam aos parâmetros de espalhamento entre 24 a 26 cm e tempo de fluxo entre 7 a 11 segundos estabelecidos pela EFNARC (2002), além de não apresentarem exsudação e/ou segregação na dosagem final, viabilizando dar prosseguimento às demais avaliações.

A influência do tipo de cimento na dosagem do Sp foram significativas, onde a área superficial de cada material foi fator determinante em sua dosagem, mostrando que quanto maior fosse a finura, mais aditivo era necessário para atingir a fluidez da argamassa, na qual o cimento que mais necessitou de Sp foi o CP IV e o que menos precisou foi o CP II-E.

O incremento de adições minerais nas AAN's apresentou a tendência a reduzir as propriedades de fluidez e aumentar a viscosidade à medida que se aumentava o teor de adição na correção da segregação, onde as adições se revelaram um excelente modificador de viscosidade para corrigir a exsudação.

Observou-se que, para a dosagem dos finos nas AAN's dependeu da finura do material, pois quanto mais fina era a adição mineral, menor era a sua necessidade para que haja o aumento da coesão da mistura.

Constatou-se também a influência da finura dos cimentos, onde os cimentos com menores áreas superficiais (CP I e CP II-E) precisaram de mais adição, em contrapartida cimentos como CP IV e CP V-ARI que possuem as maiores áreas superficiais levaram menos adição.

No estado endurecido ao empregar adições de metacaulim e sílica em substituição ao cimento, colaborou no maior desempenho nas propriedades mecânicas das argamassas, atendendo aos requisitos da NBR 13279 (ABNT, 2005). Na retração, todas as argamassas tiveram baixas variações dimensionais, com exceção das argamassas produzidas com CP V-ARI pelo seu alto calor de hidratação.

Através dos resultados, pode-se concluir que as argamassas produzidas com cimentos locais, CP II-E e CP IV, proporcionaram resultados satisfatórios utilizando tanto a sílica quanto metacaulim, demonstrando a sua viabilidade como uma nova alternativa em comparação ao CP V-ARI. Portanto, constatou-se que é possível produzir AAN utilizando diferentes cimentos, os quais terão efeitos distintos devido as suas propriedades intrínsecas, mas que com os devidos ajustes, podem satisfazer suas características reológicas e mecânicas.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Recomendam-se para trabalhos futuros os itens que seguem:

- Desenvolver o mesmo estudo utilizando diferentes adições minerais e/ou um estudo com emprego de misturas binárias de adições;
- Caracterizar os materiais pelo ensaio de DRX;
- Testar outros traços de forma a reduzir o consumo de cimento, mas que mantenham as características autonivelantes;
- Avaliar propriedades mecânicas das AAN's não analisados no presente estudo, como: resistência de aderência à tração e absorção de água por capilaridade, por exemplo;
- Verificar a aplicação na prática em contrapisos para as formulações desenvolvidas nesta pesquisa ou em outras dosagens;
- Avaliar micro estruturalmente as argamassas no seu estado endurecido através da análise de MEV.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

_____.**NBR 13279**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. 2005.

_____.**NBR 16697**. Cimento Portland – Requisitos. 2018.

_____.**NBR 12041**. Argamassa de alta resistência mecânica para pisos — Determinação da resistência à compressão simples e tração por compressão diametral. 2012.

_____.**NBR 15261**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da variação dimensional (retratação ou expansão linear). 2005.

_____.**NBR 13278**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. 2005.

_____.**NBR 5558**. Concreto - Determinação da exsudação. 2008.

_____.**NBR 12653**. Materiais pozolânicos — Requisitos. 2015.

_____.**NBR 16605**. Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. 2017.

_____.**NBR 7211**: Agregados para Concreto – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____.**NBR 13276**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. 2016.

_____.**NBR NM 52**. Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. 2009.

_____.**NBR NM 248**. Agregados - Determinação da composição granulométrica. 2003.

_____.**NBR NM 45**. Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. 2006.

_____.**NBR NM 30**. Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. 2001.

_____.**ASTM C1708/C1708M-16**. Standard Test Methods for Self-leveling Mortars Containing Hydraulic Cements. 2012.

AENOR - ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. **UNE-EN 13813**. Pastas autonivelantes y pastas autonivelantes para suelos. Características y especificaciones. 2003.

AFAM - ASOCIACIÓN NACIONAL DE FABRICANTES DE MORTERO. **Guía Morteros especiales**. 1ª Edición: Madrid, marzo de 2005.

AÏTCIN, P.C.; NEVILLE, A. **How the water-cement ratio affects concrete strength.** Concrete International, Detroit, v. 25, n. 8, p. 51-58, Aug. 2003.

ABOUTALEB, D.; SAFI, B.; CHAHOUR, K.; BELAID, A. Use of refractory bricks as sand replacement in self-compacting mortar. **Cogent Engineering**, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 1–8, 2017. Disponível em: <<http://doi.org/10.1080/23311916.2017.1360235>>. Acesso em: 20 maio. 2018.

AHARI, R.S.; ERDEM, T.K.; RAMYAR, K. Thixotropy and structural breakdown properties of self consolidating concrete containing various supplementary cementitious materials, **Cem. Concr. Compos.** 59 (2015) 26e37. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp>>. Acesso em: 9 set. 2018.

AKCAY, B.; TASDEMIR, M. A. Performance evaluation of silica fume and metakaolin with identical finenesses in self compacting and fiber reinforced concretes. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 185, p. 436–444, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.061>>. Acesso em: 29 abr. 2018.

ALRIFAI, A.; AGGOUN, S.; KADRI, A.; KENAI, S.; KADRI, E.H. Paste and mortar studies on the influence of mix design parameters on autogenous shrinkage of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 969-976, 2013.

ALVES, N. J. D. **Avaliação dos aditivos incorporadores de ar em argamassas de revestimento.** 2002, 175p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2002.

AVET, F.; LI, X.; SCRIVENER, K. Determination of the amount of reacted metakaolin in calcined clay blends. **Cement and Concrete Research**, Switzerland, v. 106, n. February, p. 40–48, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.01.009>>. Acesso em: 9 set. 2018.

BAHIA, L. L. M.; SABBATINI, F. H. **Projeto e Execução de Revestimentos de Argamassa.** 4ª Ed. São Paulo: Nome da Rosa, (Coleção primeiros passos da qualidade no canteiro de obras). 2008, 89 p.

BANFILL, P. F. G. **Rheological methods for assessing the flow properties of mortar and related materials.** Construction and Building Materials, v. 8, n. 1, p. 43-49, 1994.

BARBAR, J. S. **Influência do teor de ar incorporado no desempenho de concretos com diferentes teores de agregados** **Influência do teor de ar incorporado no desempenho de concretos com diferentes teores de agregados.** 2016. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

BARLUENGA, G. e OLIVARES, F. H. Self-levelling cement mortar containing grounded slate from quarrying waste. **Construction and Building Materials**, v.24, p.1601–1607, 2010.

BARBOSA, M. P.; MACIEL, G. F.; CASTRO, A. L.; REIS, J. F. A.; LEMOS, K. A. A.

Determinação de parâmetros reológicos de argamassas. **IBRACON Structures and Materials Journal**, Brazil, v. 4, n. 3, p. 440–480, 2011.

BATTAGIN, A.F. **Cimento Portland**. In: G. C., ISAIA (Ed.), *Concreto: ciência e Tecnologia*, Inst. Brasil. Concr., S. Paulo/SP (2011) 185-232.

BAUER, E.; SOUSA, J. G. G., **Materiais constituintes e suas funções**. *in*: Elton Bauer (org.), *Revestimentos de Argamassa: Características e Peculiaridades*. Brasília: LEM-UnB; Sinduscon, p. 23-29, 2005.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. vol. 2. 5ed. Revisada, Rio de Janeiro. 2005.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de Construção**. 5ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

BENABED, B.; KADRI, E. H.; AZZOUZ, L.; KENAI, S. Properties of self-compacting mortar made with various types of sand. **Cement and Concrete Composites**, Algeria, v. 34, n. 10, p. 1167–1173, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.07.007>>. Acesso em: 21 set. 2018.

BEZERRA, I. M. T. **Cinza da casca do arroz utilizada em argamassas de assentamento e revestimento**. 2010. 108p. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, UFCG, Campina Grande - PB.

CABRAL, S. C.; MATOS, A. A.; TEIXEIRA, C. A.; DUTRA, D. T.; MATOS, I. O.; SÁ, R. B. De; MORAIS, L. N. **Fabricação de traços de argamassa auto adensável utilizando areia artificial**. [s. l.], v. 10, p. 1–11, 2016.

CANBAZ, M.; TOPÇU, I. B.; ATEŞİN, O. Effect of admixture ratio and aggregate type on self-leveling screed properties. **Construction and Building Materials**, Turkey, v. 116, p. 321–325, 2016.

CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. 2v. 1712 p. Cap 26.

CARDOSO, F. A.; FUJII, A. L.; PILEGGI, R. G.; CHAOUICHE, M. Parallel-plate rotational rheometry of cement paste: Influence of the squeeze velocity during gap positioning. **Cement and Concrete Research**, Brazil, v. 75, p. 66–74, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.04.010>>. Acesso em: 21 ago. 2018.

CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. Rheological behavior of mortars under different squeezing rates. **Cement and Concrete Research**, Brazil, v. 39, n. 9, p. 748–753, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.05.014>>. Acesso em: 19 jul. 2018.

CARVALHO, H. D. S. **Análise da Retração por Secagem em Argamassas Autonivelantes Utilizando Adições Mineraias Como Substitutos Parciais do Cimento Portland**. 2015. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

CASTRO, Alexandre Lorenzetti de. **Aplicação de Conceitos Reológicos na Tecnologia dos Concretos de Alto Desempenho**. 2007. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos/instituto de Física de São Carlos/instituto de Química de São Carlos, São Carlos, 2007.

CAVALCANTI, D. J. H. **Contribuição ao estudo de propriedades do concreto auto-adensável visando sua aplicação em elementos estruturais**. 2006. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Alagoas. 141p, Macéio, 2006.

CHAVES, P. da S. **Argamassa autonivelante com adição mineral (fíler) de resíduo de beneficiamento de mármore e granito**. 2019. Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

CICHINELLI, G. (2012). Execução de contrapiso autonivelante industrial. Revista Técnica, Edição 192.

CHU, S. H.; KWAN, A. K. H. Co-addition of metakaolin and silica fume in mortar: effects and advantages. **Construction and Building Materials**, China, v. 197, p. 716–724, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.244>>. Acesso em: 22 ago. 2018.

COSTA, C.; CARVALHO, P.; BORDADO, J.; NUNES, A. Estudo de Argamassas de Base Cimentícia por Microscopia Electrónica de Varrimento. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, Portugal, v. 21, n. 3–4, p. 31–35, 2009.

DIAZ, P. S.; VENDRUSCOLO, C. T.; VENDRUSCOLO, J. L. S. **Reologia de Xantana**: uma revisão sobre a influência de eletrólitos na viscosidade de soluções aquosas de gomas xantana. *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas*, Brasil, v. 25, n. 1, p. 15, 2004.

DING, J. T.; LI, Z. Effects of metakaolin and silica fume on properties of concrete. **ACI Materials Journal**, [s. l.], v. 99, n. 4, p. 393–398, 2002.

EFNARC. Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. **Report from EFNARC**, [s. l.], v. 44, n. February, p. 32, 2002. Disponível em: <<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Specification+and+Guidelines+for+Self-Compacting+Concrete#0>>. Acesso em: 21 maio. 2017.

FERRARA, L.; CREMONESI, M.; TREGGER, N.; FRANGI, A.; SHAH, S. P. On the identification of rheological properties of cement suspensions: Rheometry, Computational Fluid Dynamics modeling and field test measurements. **Cement and Concrete Research**, Italy, v. 42, n. 8, p. 1134–1146, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.05.007>>. Acesso em: 25 maio. 2019.

FERRARIS C.; MINDESS, S.; SKALNY, J. **Reologia do concreto fresco**: desenvolvimentos recentes reimpressos da ciência dos materiais do concreto VI, Sociedade Americana de Cerâmica, Westerville (OH). 2001.

FIorentin, T. R. **Influência do Aditivo Modificador de Viscosidade e do Fíler Calcário no Comportamento de Argamassas de Concreto Auto-Adensável**. 2011. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2011.

FOCHS, G. R.; RECENA, F. A. P.; SILVA, I. N. L. Da. Review: métodos experimentais de dosagem de concreto autoadensável (CAA) desenvolvidos no Brasil. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, Brasil, v. 14, n. 21, p. 99–110, 2013.

FORTUNATO, M.; MARTINS, B.H. R.; CASALI, J. M.; COLLODETTI, G.; BETIOLI, A. M. Estudo da substituição de cimento portland pelo fino de britagem em argamassa autoadensável. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**. ISSN 2358-5420 – Ed. Especial – Fevereiro, 2019.

FREITAS, E. R.; BORJA, E. V. De; ANJOS, M. A. Dos; PEREIRA, A. D. C.; VIANA, J. S. **Estudo das adições e aditivos minerais nas propriedades de argamassas autonivelantes**. Natal, 2010.

FUNG, W. W. S.; KWAN, A. K. H. Role of water film thickness in rheology of CSF mortar. **Cement and Concrete Composites**, china, v. 32, n. 4, p. 255–264, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.01.005>>. Acesso em: 27 dez. 2018.

GIROTTTO, L. S. **Investigação da retração plástica e da fissuração da argamassa do concreto auto-adensável**. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista, 2012.

GOMES, A. O.; GONÇALVES, J. P. Inovações tecnológicas em canteiros de obras, **X Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassa (SBTA)**. Fortaleza, 2013.

GOMES, P.C.C., BARROS, A.R. **Métodos de Dosagem de Concreto Autoadensável**. 1ª ed. Editora PINI. 2009.

GUIMARÃES, M. B. Polímeros dispersíveis para argamassas autonivelantes. **X SBTA - Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassa**. Fortaleza, 2013.

GUGELMIN, L. A. M. Contrapiso Autonivelante. **X SBTA - Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassa**. Fortaleza, 2013.

GÜNEYISI, E.; GESOĞLU, M.; KARAOĞLU, S.; MERMERDAŞ, K. Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes. **Construction and Building Materials**, Gaziantep, Turkey, v. 34, p. 120–130, 2012.

INÉIA, A. **Viabilização da substituição da areia natural pelo pó de pedra basáltica na argamassa autonivelante**. 2017. Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, 2017.

JAWAHAR, J. G., SASHIDHARA, C., REDDY, I. V. R., & PETER, J. A. Optimization of superplasticiser and viscosity modifying agent in self compacting mortar. **Asian Journal of Civil Engineering**, 14 (1), 71-86. 2013.

JÚNIOR, L. U. D. T. **Desenvolvimento de argamassas autonivelantes com ativação alcalina de precursores residuais**. 2016. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

KANNING, R. C. **Utilização de cinza de folha de bananeira como adição em argamassas de cimento Portland**. 2013. Tese (doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais (PIPE), UFPR, 194p. Curitiba, 2013.

KATSIADRAMIS, N. J.; SOTIROPOULOU, A. B.; PANDERMARAKIS, Z. G. Rheological and Mechanical Response Modifications for a Self-Leveling Mortar. **EPJ Web of Conferences**, Greece, v. 6, p. 23002, 2010. Disponível em: <<http://www.epj-conferences.org/10.1051/epjconf/20100623002>>. Acesso em: 15 set. 2018.

KHAYAT, K.; GHEZAL, A. Effect of viscosity-modifying admixtures superplasticizer and mechanical response modifications for a self-leveling mortar. **EPJ Web of Conferences**, Vol. 6, 2010.

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, pp. 1-11, 2008.

KWAN, A. K. H.; FUNG, W. W. S. Roles of water film thickness and SP dosage in rheology and cohesiveness of mortar. **Cement and Concrete Composites**, china, v. 34, n. 2, p. 121–130, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.09.016>>. Acesso em: 9 maio. 2019.

LE-BIHAN, T.; GEORGIN, J. F.; MICHEL, M.; AMBROISE, J.; MORESTIN, F. Measurements and modeling of cement base materials deformation at early age: The case of sulfo-aluminous cement. **Cement and Concrete Research**, France, v. 42, n. 8, p. 1055–1065, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.04.004>>. Acesso em: 20 out. 2018.

LESSA, F.; COUTINHO, M. **Weber Saint-Gobain**. X SBTA - Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassa. Fortaleza, 2013.

LIBRE, N.A.; KHOSHNAZAR, R.; SHEKARCHI, M. **Relationship between fluidity and stability of self-consolidating mortar incorporating chemical and mineral admixtures**. *Construction and Building Materials*, v. 24, p. 1262-1271, 2010.

LOPES, A.; RAMOS, A.; CORDEIRO, L.; PAES, I. Dosagem de argamassa autonivelante com resíduo do corte de mármore e granito (rcmg) para contrapiso. 3º Simpósio. Argamassas e soluções térmicas de revestimento, Coimbra, out. 2018.

MADANDOUST, R.; MOHSENI, E.; MOUSAVI, S. Y.; NAMNEVIS, M. An experimental investigation on the durability of self-compacting mortar containing nano-SiO₂, nano-Fe₂O₃ and nano-CuO. **Construction and Building Materials**, Iran, v. 86, p. 44–50, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.100>>. Acesso em: 25 set. 2019.

MANSUR, A. A. P.; MANSUR, H. S. Avaliação do teor de ar incorporado em argamassas modificadas com poli (álcool vinílico). **17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, Foz do Iguaçu, 2006.

MARDANI-AGHABAGLOU, A.; INAN SEZER, G.; RAMYAR, K. Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 70, p. 17–25, 2014.

MARTINS, E. J. **Procedimento Para Dosagem De Pastas Para Argamassa Autonivelante**. Universidade Federal Do Paraná, 2009.

MEHDIPOUR, I.; RAZZAGHI, M. S.; AMINI, K.; SHEKARCHI, M. Effect of mineral admixtures on fluidity and stability of self-consolidating mortar subjected to prolonged mixing time. **Construction and Building Materials**, Iran, v. 40, p. 1029–1037, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.108>>. Acesso em: 18 mar. 2018.

MELO, L. L. F. De. **Dosagem de argamassa autonivelante para contrapiso**. 2015. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.

MENDES, G. A. **Dosagem de argamassa autonivelante com adição de Resíduos do Corte de Mármore e Graníticos (RCMG): Análise das propriedades físicas e mecânicas**. 2019. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de ciências tecnológicas – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Joinville, 2019.

NAKAKURA, E. H.; CINCOTTO, M. A. Análise dos requisitos de classificação de argamassas de assentamento e revestimento. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP– BT/PCC/359*. São Paulo, 2004.

NENEVÊ, B. L. **Desenvolvimento de formulações de argamassas autonivelantes para contrapiso e proposição de requisitos de desempenho**. 2017. Universidade Federal do Paraná, 2017.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. Bookman Editora. 2ed. 466 p. 2013.

OLIVEIRA, T. V.; COSTA, M. C.; SOUSA, M. S.; CORDEIRO, L. D. N. P.; Avaliação do Efeito do Uso de Diferentes Cimentos e de Combinações Distintas de Aditivos sobre a Reologia de Argamassas Autonivelantes. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: IBRACON, 2018, ISSN 2175-8182.

OLIVEIRA, T. V. **Formulações de Argamassas Autonivelantes para Contrapiso com Incorporação Parcial de Agregado Reciclado de Concreto**. 2019. Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

ONISHI, K.; BIER, T. Investigation into relations among technological properties, hydration kinetics and early age hydration of self-leveling underlayments. **Cement and Concrete Research**, v.40, p. 1034-1040, 2010.

OTTONI, T. P. **Estudo da influência do aditivo alvenarit nas propriedades das Argamassas de revestimento**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Maria, 2017.

OULDKHAOUA, Y.; BENABED, B.; ABOUSNINA, R.; KADRI, E. H. Experimental study on the reuse of cathode ray tubes funnel glass as fine aggregate for developing an ecological self-compacting mortar incorporating metakaolin. **Journal of Building Engineering**, Australia, v. 27, n. September 2019, p. 100951, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100951>>. Acesso em: 28 jan. 2020.

PAIVA, H.; ESTEVES, L. P.; CACHIM, P. B.; FERREIRA, V. M. Rheology and hardened properties of single-coat render mortars with different types of water retaining agents. **Construction and Building Materials**, Portugal, v. 23, n. 2, p. 1141–1146, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.06.001>>. Acesso em: 12 set. 2019.

PARANDE, A. K.; BABU, B. R.; KARTHIK, M. A.; KUMAA R. D. Study on strength and corrosion performance for steel embedded in metakaolin blended concrete/mortar. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 127-134, 2008.

PEREIRA, H. L. B. **Análise da frente de carbonatação natural em concretos à base de cimentos Portland CP IV-32 RS e CP V-ARI RS**. 2018. Trabalho de conclusão de curso. Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco. 2018.

PINHO, G. M. **Viabilidade econômica do uso da argamassa autonivelante para contrapiso**. Goiânia, v. 01, n. 2007, p. 1–13, 2015.

RASHAD, A. M. Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition-A comprehensive overview. **Construction and Building Materials**, Egypt, v. 41, p. 303–318, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.001>>. Acesso em: 6 jul. 2018.

REIS, J. **Determinação de parâmetros reológicos de concretos através do ensaio de abatimento de tronco de cone modificado: estudo de caso**. 2008. Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2008.

RIBEIRO, C.C., PINTO, J. D. S., STARLING, T. **Materiais de Construção Civil**. Belo Horizonte: UFMG, 2006.

RIZWAN, S.A.; BIER, T.A. Blends of limestone powder and fly-ash enhance the response of self-compacting mortars. **Construction and Building Materials**, v. 27, p. 398-403, 2012.

ROCHA, G. G. N. **Estudo do Desempenho das Argamassas Hidráulicas**. 2005.

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

RUBIN, A. P. **Argamassas autonivelantes industrializadas para contrapiso : análise do desempenho físico-mecânico frente às argamassas dosadas em obra.** 2015. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

SABIR, B. B.; WILD, S.; BAI, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*, v. 23, n. 6, 2001. p 441-454

SAFI, B.; SAIDI, M.; DAOUI, A.; BELLAL, A.; MECHEKAK, A.; TOUMI, K. The use of seashells as a fine aggregate (by sand substitution) in self-compacting mortar (SCM). *Construction and Building Materials*, Algeria, v. 78, p. 430–438, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.009>>. Acesso:11 mai 2018.

SAFIUDDIN, M.D.; SALAM, M.A.; JUMAAT, M.Z. **Effects of recycled concrete aggregate on the fresh properties of self-consolidating concrete.** *Archives of Civil and Mechanical Engineering* v. XI, p. 1023-1041, 2011.

SAKANO, V. K. **Metodologia para aquisição de sinal elétrico e tratamento de dados em reômetros servo controlados.** 2016. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

SCHAEFER, C. O. **Valorização de fonte alternativa de sulfato de cálcio para a produção de argamassas autonivelantes.** 2013. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/123140>>. Acessado em: 15 abr. 2018.

SEIFERT, S.; NEUBAUER, J.; GOETZ-NEUNHOEFFER, F. Spatially resolved quantitative in-situ phase analysis of a self-leveling compound. *Cement and Concrete Research*, Germany, v. 42, n. 7, p. 919–927, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.03.012>>. Acesso em: 14 out. 2017.

SILVA, A. S. **Desenvolvimento de formulações de argamassas autonivelantes para pisos e avaliação da retração por secagem.** 2016a. Universidade Federal do Paraná, 2016.

SILVA, J. H. Da. **Influência da adição de sílica ativa sobre a resistência mecânica e a tenacidade à fratura de concretos de cimento portland para utilização em pavimentos rígidos rodoviários.** 2016b. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

SILVA, N. G.; CAMPITELI V. C. **Módulo de elasticidade dinâmico de argamassa de revestimento.** 2º Encontro de engenharia e tecnologia dos Campos Gerais, 2008.

SOUZA, N. C. **Análise de desempenho do contrapiso autonivelante em relação ao sistema convencional.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em construção civil. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2013.

SOUZA, A. S.; FERREIRA, A. Z.; AZEVEDO, B. L. O. **Estudo para o desenvolvimento de argamassa autonivelante para contrapiso**. Trabalho de Final de Curso de Engenharia Civil – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

SOUZA, J. G. G.; BAUER, E. Estudo da Reologia das Argamassa de Revestimento no Estado Fresco. **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais**, Natal, Brasil, p. 7, 2002. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbecimat/2002/arqs_pdf/pdf_100/tc105-004.pdf>. Acesso em: 30 out. 2019.

STOLZ, C. M. **Influência da interação entre os parâmetros reológicos de argamassas e a área potencial de contato de substratos na aderência de argamassas de revestimento**. 2011. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

STOLZ, C. M.; MASUERO, A. B. Influence of grains distribution on the rheological behavior of mortars. **Construction and Building Materials**, Brazil, v. 177, p. 261–271, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.131>>. Acesso em: 21 jun. 2019.

TAFRAOUI, A.; ESCADEILLAS, G.; VIDAL, T. Durability of the Ultra High Performances Concrete containing metakaolin. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 112, p. 980–987, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.169>>. Acesso em: 20 jul. 2019.

TOMAZINI, V. Contrapiso autonivelante proporciona ganho em produtividade. Disponível em: <<http://https://www.aecweb.com.br/revista/materias/contrapiso-autonivelante-proporciona-ganho-em-produtividade/12186>>. Acesso em: 30 ago. 2018.

TRISTÃO, F. A. **Influência dos parâmetros texturais das areias nas propriedades das argamassas mistas de revestimento**. 2005. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

TURK, K. Viscosity and hardened properties of self-compacting mortars with binary and ternary cementitious blends of fly ash and silica fume. **Construction and Building Materials**, v.37, p. 326–334, 2012.

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, p. 148, 2004. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/3918>>. Acesso em: 30 dez. 2017.

WALLEVIK, O. H.; WALLEVIK, J. E. Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes. **Cement and Concrete Research**, Iceland, v. 41, n. 12, p. 1279–1288, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.01.009>>. Acesso em: 10 jan. 2018.

YANG, J.; LIU, L.; LIAO, Q.; WU, J.; LI, J.; ZHANG, L. Effect of superabsorbent polymers on the drying and autogenous shrinkage properties of self-leveling mortar.

Construction and Building Materials, China, v. 201, p. 401–407, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.197>>. Acesso em: 20 mar. 2019.

ZHANG, S.; XU, X.; MEMON, S. A.; DONG, Z.; LI, D.; CUI, H. Effect of calcium sulfate type and dosage on properties of calcium aluminate cement-based self-leveling mortar. **Construction and Building Materials**, China, v. 167, p. 253–262, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.146>>. Acesso em: 10 jun. 2018.

ZHU, W.; BARTOS, P. J. M. Permeation properties of self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**, Scotland, v. 33, n. 6, p. 921–926, 2003.

Yamada K, Hanehara S. **Mecanismo de trabalho do superplastificante de policarboxilato, considerando a estrutura química e as características do cimento**. In: 11º congresso internacional sobre a contribuição do cimento para a química do cimento (ICCC) para o desenvolvimento no século XXI. Durban, África do Sul. p. 538-49. 2003.

YAMADA K. A summary of important characteristics of cement and superplasticizers. **9th CANMET/ACI International Conference Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concret**. Seville, Spain. 2009. Acesso em: 10 jun. 2018.

YAMADA K. Basics of analytical methods used for the investigation of interaction mechanism between cements and superplasticizers. **Cem Concr Res.**, 41, pp. 793-798, 2011. Acesso em: 19 jun. 2018.

APÊNDICE A

A.1 Teor de superplastificante

A.1 - Resultados da dosagem do superplastificante.

Traço	Cimento	Areia	a/c	Sp	Espalhamento médio (cm)
CP V-ARI	1	2	0,50	0,0030	22,5
CP V-ARI	1	2	0,50	0,0035	23,6
CP V-ARI	1	2	0,50	0,0040	24,3,
CP V-ARI	1	2	0,50	0,0045	25,7
CP V-ARI	1	2	0,50	0,0050	26,7
CP IV	1	2	0,50	0,0030	16,7

CP IV	1	2	0,50	0,0035	17,3
CP IV	1	2	0,50	0,0040	18,0
CP IV	1	2	0,50	0,0045	18,6
CP IV	1	2	0,50	0,0050	19,4
CP IV	1	2	0,50	0,0060	20,5
CP IV	1	2	0,50	0,0065	21,3
CP IV	1	2	0,50	0,0070	22,0
CP IV	1	2	0,50	0,0075	22,6
CP IV	1	2	0,50	0,0080	23,3
CP IV	1	2	0,50	0,0085	24,1
CP IV	1	2	0,50	0,0090	25,5
CP IV	1	2	0,50	0,0095	26,2
CP IV	1	2	0,50	0,0100	27,1
CP IV	1	2	0,50	0,0125	28,7
CP II-E	1	2	0,50	0,0030	24,9
CP II-E	1	2	0,50	0,0035	26,3
CP I	1	2	0,50	0,0030	23,8
CP I	1	2	0,50	0,0035	25,7
CP I	1	2	0,50	0,0040	27,6

A.2 Ensaio de mini slump e mini funil-V.

A.2 - Resultados de mini-slump e mini funil-V

Traço	Parâmetros da EFNARC (2002)		Parâmetros de Martins (2009)	
	Esp. médio: 24 a 26 cm	Tempo de fluxo: 7 a 11 s	Bordas: U/D	Segregação: SS/CS
CPV-SA5%	25,6		U	CS
CPV-SA10%	24,8	8,60	U	SS
CPIV-SA5%	25,9	7,30	U	SS
CPII-SA5%	26,9		D	CS
CPII-SA10%	26,2		U	CS

CPII-SA15%	25,2	7,65	U	SS
CPI-SA5%	26,9		U	CS
CPI-SA10%	26,7		U	CS
CPI-SA15%	25,7	7,56	U	SS
CPV-MC5%	25,6		U	CS
CPV-MC10%	24,8	8,58	U	SS
CPIV-MC5%	25,9	7,35	U	SS
CPII-MC5%	27,0		D	CS
CPII-MC10%	26,6		D	CS
CPII-MC15%	25,8		U	CS
CPII-MC20%	25,1		U	CS
CPII-MC25%	24,4	8,68	U	SS
CPI-MC5%	27,4		U	CS
CPI-MC10%	26,7		U	CS
CPI-MC15%	26,3		U	CS
CPI-MC20%	25,5		U	CS
CPI-MC25%	24,2	8,77	U	SS

Legenda: U= Uniforme; D= Desuniforme; SS= Sem Segregação; CS= Com Segregação.



Figura A.1.- Argamassa CPI-SA5%.



Figura A.2 - Argamassa CPI-SA15%.

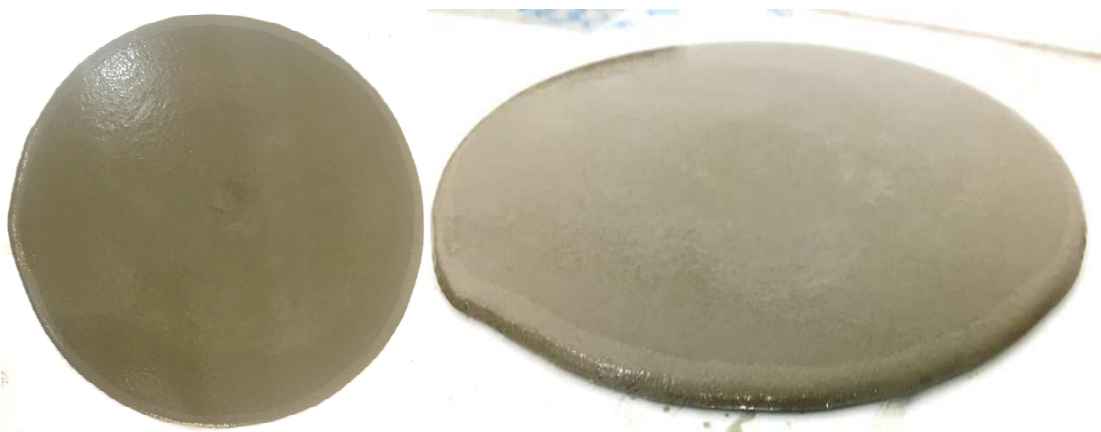


Figura A.3 - Argamassa CPI-MC5%.



Figura A.4 - Argamassa CPI-MC25%.



Figura A.5 - Argamassa CPII-SA5%.

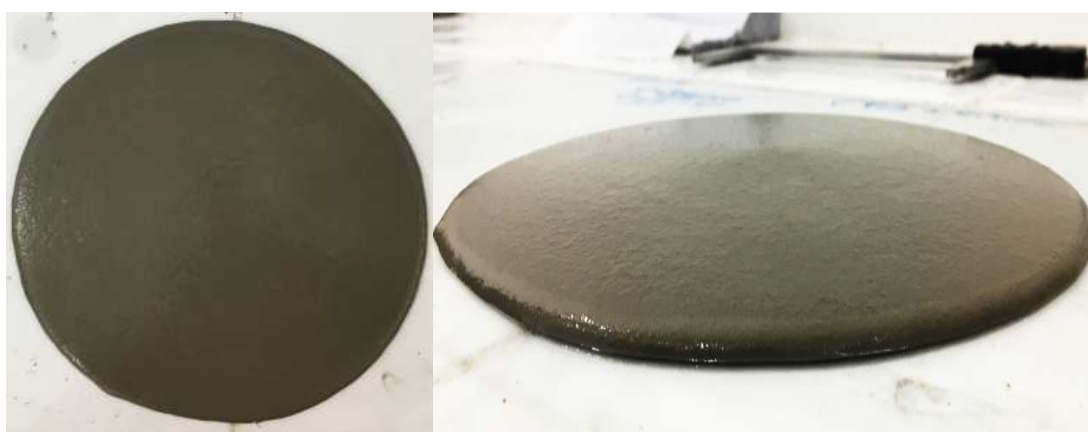


Figura A.6 - Argamassa CPII-SA15%.

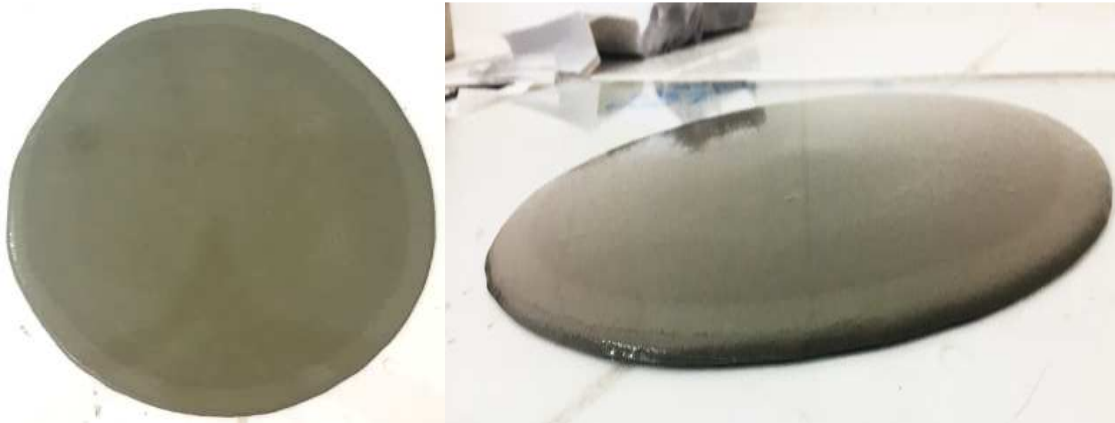


Figura A.7 - Argamassa CII-MC5%.



Figura A.8 - Argamassa CII-MC25%

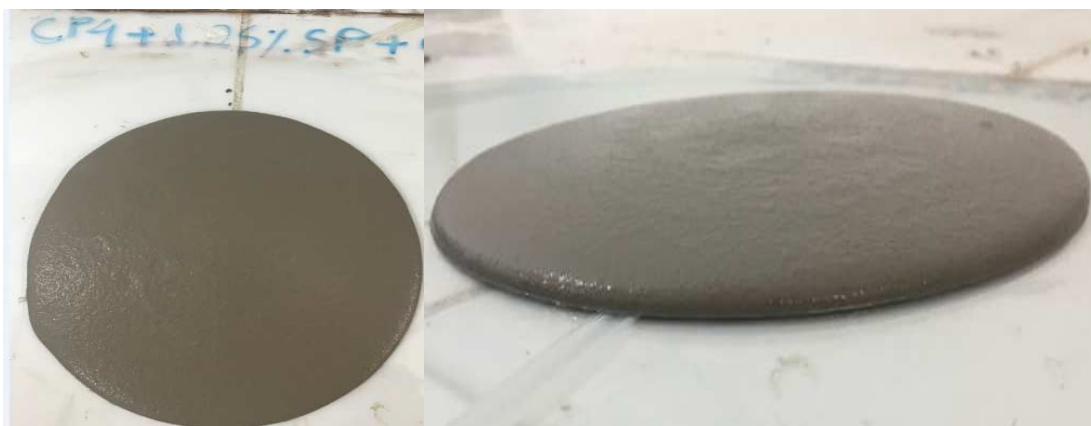


Figura A.9 - Argamassa CIV-SA5%.

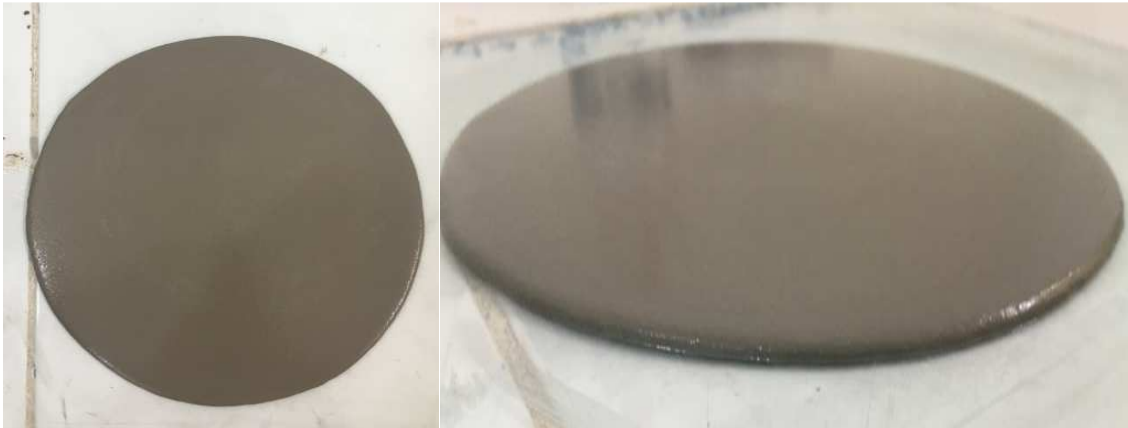


Figura A.10 - C-PIV-MC5%.

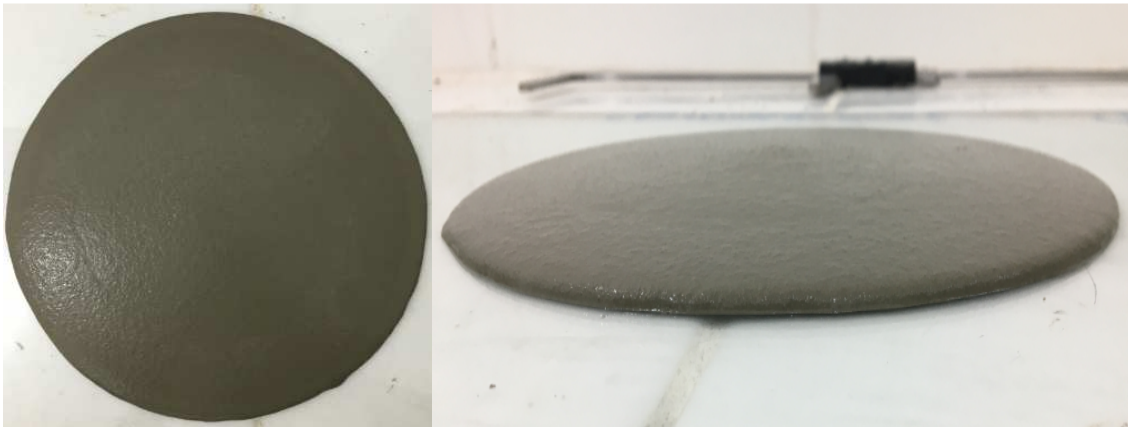


Figura A.11 - Argamassa CPV-SA5%.



Figura A.12 - Argamassa CPV-SA10%.



Figura A.13 - Argamassa CPV-MC5%.



Figura A.14 - Argamassa CPV-MC10%.

A.3 Ensaio de retenção de fluxo

Tabela A.3 - Consistências individuais obtidas no ensaio de retenção de fluxo.

Traços	Diâmetro de espalhamento aos 20 min			Diâmetro de espalhamento aos 30 min		
	D1 (cm)	D2 (cm)	Dmédio (cm)	D1 (cm)	D2 (cm)	Dmédio (cm)
CPV-SA10%	22,8	22,2	22,5	21,7	22,3	22,0
CPIV-SA5%	18,5	18,5	18,5	16,7	16,8	16,8
CPII-SA15%	22,4	21,8	22,1	20,9	21,1	21,0
CPI-SA15%	23,1	22,7	22,9	20,5	21,3	20,9
CPV-MC10%	23,5	23,1	23,3	22,7	22,7	22,7
CPIV-MC5%	20,1	19,1	19,6	17,8	17,6	17,7
CPII-MC25%	20,0	20,3	20,2	19,0	18,0	18,5
CPI-MC25%	23,5	23,3	23,4	22,9	22,6	22,8

A.4 Ensaio de determinação da exsudação

Tabela A. 4 – Resultados de massa da água exsudada nas argamassas autonivelantes.

Tempo de leitura	Massa de água exsudada (g)							
	CPV-SA10%	CPIV-SA5%	CPII-SA15%	CPI-SA15%	CPV-MC10%	CPIV-MC5%	CPII-MC25%	CPI-MC25%
10min	0	0	0	0	0	0	0	0
20min	3,7	0	3,6	2,5	2,9	0	2,5	3,6
30min	2,1	0	1,9	2,4	3,0	0	1,5	3,5
40min	1,4	0	1,1	2,6	2,2	0	1,5	2,3
50min	1,6	0	1,7	2,6	1,7	0	1,6	2,4
1hr	1,6	0	1,2	2,4	1,8	0	1,4	2,4
1hr10min	1,6	0,1	1,1	2,6	1,4	0	1,5	1,3
1hr20min	0,6	0,1	0,7	1,3	0,4	0	0,2	1,4
1hr30min	0,1	0,2	0,4	0,3	0,2	0	0,8	0,3
Total	12,7	0,5	11,8	16,7	13,6	0	11,1	17,2

A.5 Resistência à compressão

Tabela A. 5 - Resultados individuais do ensaio de resistência à compressão simples.

Traços	CP1-SA3	CP1-MC5	CP2-SA3	CP2-MC5	CP4-SA1	CP4-MC1	CP5-SA2	CP5-MC2
Amostra 1	40,09	46,48	25,88	29,46	38,15	44,58	51,70	46,27
Amostra 2	41,03	47,64	27,26	25,48	38,54	44,04	47,60	49,89
Amostra 3	44,34	48,23	24,45	27,52	36,37	43,60	48,82	47,12
Média (MPa)	41,82	47,45	25,87	27,49	37,69	44,08	49,37	47,76
Desvio padrão (MPa)	2,61	1,06	1,72	2,43	1,35	0,60	2,95	1,79
Coefficiente de variação (%)	6,23	2,22	6,66	8,85	3,58	1,35	5,97	3,75

A.6 Resistência à tração na flexão

Tabela A.6 - Resultados individuais do ensaio de resistência à tração na flexão.

Traços	CP1-SA3	CP1-MC5	CP2-SA3	CP2-MC5	CP4-SA1	CP4-MC1	CP5-SA2	CP5-MC2
Amostra 1	8,86	9,86	9,44	10,01	11,10	8,09	11,06	7,49
Amostra 2	9,20	8,86	10,79	12,28	14,10	9,78	10,21	8,06
Amostra 3	9,97	10,98	11,55	10,56	11,06	8,68	10,55	8,78
Média (MPa)	10,71	8,11	8,59	9,35	10,63	9,40	8,95	9,90
Desvio padrão (MPa)	0,60	0,64	0,39	0,57	0,61	0,61	0,13	1,06
Coefficiente de variação (%)	6,00	8,00	4,00	6,00	6,00	7,00	1,00	11,00

A.7 Variação Dimensional

Tabela A.7 - Resultados individuais do ensaio de variação dimensional.

Traços	Leitura (mm)				Média	Desvio padrão	Coeficiente de variação
	ϵ_0	ϵ_1	ϵ_7	ϵ_{28}			
CPV-SA10%	0,00	-0,64	-0,97	-1,64	-1,08	0,51	-0,47
CPIV-SA5%	0,00	-0,09	-0,50	-0,85	-0,48	0,38	-0,79
CPII-SA15%	0,00	0,31	-0,12	-0,61	-0,14	0,46	-3,22
CPI-SA15%	0,00	-0,22	-0,48	-0,67	-0,46	0,23	-0,49
CPV-MC10%	0,00	-0,32	-1,28	-2,19	-1,26	0,93	-0,74
CPIV-MC5%	0,00	-0,15	-0,82	-0,95	-0,64	0,43	-0,67
CPII-MC25%	0,00	-0,03	-0,68	-0,76	-0,49	0,40	-0,81
CPI-MC25%	0,00	-0,26	-0,73	-0,73	-0,57	0,27	-0,47

Legenda: ϵ_n – variação dimensional; n – idade de leitura.