

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO
CIVIL – PPGECC

SARAH HONORATO LOPES DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE FORMULAÇÕES DE ARGAMASSAS
AUTONIVELANTES PARA PISOS E AVALIAÇÃO DA RETRAÇÃO POR
SECAGEM**

CURITIBA
2016

SARAH HONORATO LOPES DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE FORMULAÇÕES DE ARGAMASSAS
AUTONIVELANTES PARA PISOS E AVALIAÇÃO DA RETRAÇÃO POR
SECAGEM**

Dissertação apresentada como requisito à obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil, no Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Marianne do Rocio de Mello Maron da Costa

CURITIBA

20

Lopes da Silva, Sarah Honorato
Desenvolvimento de formulações de argamassas autonivelantes
para pisos e avaliação da retração por secagem / Sarah Honorato
Lopes da Silva. – Curitiba, 2016.
117 f. : il.; tabs.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor
de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Construção Civil, 2016

Orientadora: Marienne do Rocio de Mello Maron da Costa
Bibliografia: p.102-110

1. Argamassa. 2. Fibras. 3. Secagem. I. Costa, Marienne do
Rocio de Mello Maron da. II. Título.

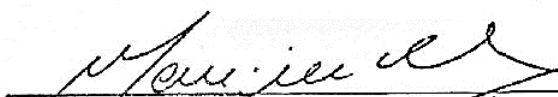
CDD 620.135

TERMO DE APROVAÇÃO

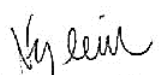
SARAH HONORATO LOPES DA SILVA

DESENVOLVIMENTO DE FORMULAÇÕES DE ARGAMASSAS AUTONIVELANTES PARA
PISOS E AVALIAÇÃO DA RETRAÇÃO POR SECAGEM

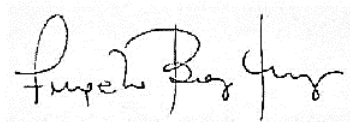
Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:



Prof.^a. Dr.^a. Marienne do Rocio de Mello Maron da Costa
Orientadora – Departamento de Construção Civil, UFPR



Prof.^a. Dr.^a. Nayara Soares Klein
Departamento de Construção Civil, UFPR



Prof.^a. Dr.^a. Angela Borges Masuero
Departamento de Engenharia Civil, UFRGS

Curitiba, 15 de abril de 2016.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pela permissão de viver esta vida abençoada e pela Divina Luz concedida. Aos Mestres Sagrados, por toda proteção e orientação.

Aos meus pais, pelo amor sincero e apoio incondicional. Muito obrigada por serem meus exemplos e por me incentivarem e trilharem junto comigo o caminho maravilhoso do conhecimento. Agradeço ao meu irmão e a todos familiares que de suas formas se fizeram presentes nessa conquista.

À minha querida orientadora, Professora Doutora Marienne do Rocio de Mello Maron da Costa, que não mediu esforços para me transmitir conhecimentos, pelo carinho e paciência de uma mãe que me permitiram sustentar a pesquisa até o fim. Obrigada por me aceitar como sua orientanda.

Ao Professor Paulo Sérgio Resende de Oliveira e aos demais professores da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, que me orientaram e encorajaram a fazer o mestrado.

Ao Mauro Tamura, pelo amor, carinho e compreensão, e pelo apoio incondicional. Muito obrigada por ter sido a “minha dupla” em todos os momentos.

Aos meus amados amigos de Goiânia, pelas orações, pelo carinho e por se fazerem tão presentes mesmo estando tão longe. Em especial, agradeço às “Coromilhas” pelo cuidado e pelos conselhos sempre.

À minha amiga Keiko e minha sobrinha de coração Naomi, por estarem literalmente ao meu lado todos os dias. Obrigada a vocês que me concederam luz, alegria, incentivo e chá nos momentos que eu mais precisei. Vocês serão sempre parte da minha família!

Aos professores pelos conhecimentos compartilhados. E a todos os colegas e amigos do PPGCEC pelos momentos vividos, sem a ajuda de vocês eu não teria chegado ao fim. Obrigada Aninha, Carol, Elaine, Eric, Gabriel, Gi, Ligia e Maria Clara, cada um do seu jeito conquistou minha amizade para toda vida!

À “Família Mahikari”, por me ajudar a trilhar o caminho da fé dirigida a Deus e por ter me acolhido em Curitiba. Obrigada Leonardo Bispo de Carvalho, se não fosse pela sua indicação e ajuda eu não estaria fazendo esta pesquisa. E obrigada “Amigos Yokoshi” por me protegerem e ajudarem a me tornar cada vez mais positiva.

Aos meus queridos alunos de iniciação científica Lucas Machado e Giulia Grando, por não medirem esforços para me ajudar na realização deste trabalho. A força de vontade e

a competência de vocês são incríveis e, com certeza, por isso terão muito sucesso na vida. Obrigada mesmo por me acompanharem nessa jornada.

Aos técnicos Douglas Mancini e Ricardo Volert, pelo auxílio no laboratório.

À CAPES e ao CNPQ, pela bolsa de estudo que me permitiu dedicar integralmente a esta pesquisa e alcançar a honra deste título.

À Itambé, pela doação do cimento utilizado nestas pesquisas, e às demais empresas pela doação dos outros insumos para produção das argamassas.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização e materialização deste sonho. Muito obrigada!

“A flor desabrocha quando o desejo é intenso. ”
(Shinmin Sakamura)

RESUMO

LOPES DA SILVA, S. H. *Desenvolvimento de formulações de argamassas autonivelantes para pisos e avaliação da retração por secagem*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFPR. Curitiba, 2016.

Uma argamassa autonivelante deve apresentar como principais propriedades a alta fluidez e elevada resistência à segregação. Isto se torna possível devido ao equilíbrio entre a alta fluidez, viscosidade moderada e a coesão entre as partículas que a compõem. Souza et al. (2013), com base em aplicações em campo, constataram que devido ao rápido início de pega e mesmo utilizando o processo de cura úmida, o material pode apresentar fissuras ocasionadas pelo processo de retração após transcorridas as primeiras idades. A retração pode ocorrer em razão do processo de evaporação da água que compõe a estrutura cimentícia gerando tensões capilares, ocasionando a perda de volume e consequentemente provocando a fissuração. Este efeito é amplamente visto em placas que têm grandes áreas expostas, tais como lajes de pavimento. Sendo assim, uma das possíveis soluções para esse problema é a adição de fibras ou a substituição parcial do cimento por adições minerais. A adição de fibras em uma matriz de cimento tem como efeito primário o controle da propagação de fissuras, bem como alterar o comportamento do material após a fissuração. E as adições minerais em substituição do cimento podem, entre outras formas, compor a curva granulométrica da argamassa de modo a diminuir porosidade e consequentemente a retração de secagem que é regida pela movimentação da água da mistura pelos vazios capilares. Portanto, visando preservar a durabilidade das argamassas autonivelantes, o presente trabalho tem por objetivo desenvolver formulações de argamassas autonivelantes para pisos e avaliar a influência da adição de fibras e adições minerais na retração por secagem. Os resultados permitiram observar que as fibras podem reduzir os efeitos de retração por secagem da argamassa. E que não houve impacto prejudicial dessas fibras na fluidez da argamassa. A substituição parcial do cimento por adição mineral por sua vez, só foi eficaz para controle da fissuração para formulação com 50% de substituição. Além disso, foram atingidas altas resistências para maioria das argamassas formuladas direcionando a aplicação dessas para pisos de alta resistência. A argamassa com 50% de substituição de cinza volante aos 28 dias não alcançou a resistência à compressão mínima esperada para argamassas de alta resistência, fato que é explicado pela ação pozolânica da cinza volante que só confere resistência mecânica ao material nas idades mais avançadas.

Palavras-chave: argamassa autonivelante, retração, fibras, adição mineral

ABSTRACT

LOPES DA SILVA, S. H. *Development of self-leveling mortar formulations for floors and evaluation of dry shrinkage*. Master's Thesis. Graduate Program in Civil Engineering, UFPR. Curitiba, 2016.

A self-leveling mortar must present main properties as high fluidity and high resistance to segregation. This becomes possible due to the balance between high flow, moderate viscosity and cohesion between the particles that compose it. Souza et al. (2013), based on field applications, noted that due to the rapid onset of grip and even using moist curing process, the material can show cracks caused by shrinkage process elapsed after the earliest ages. Retraction may occur due to the evaporation process of the water that makes up the cementitious capillary structure generating tensions, causing the loss of volume and consequently causing cracking. This effect is widely seen in plates that are large exposed areas such as floor slabs. Thus, one possible solution to this problem is the addition of fibers or partial replacement of cement with mineral additions. The addition of fibers in a cement matrix has the primary effect of controlling the spread of cracks, and change the material behavior after cracking. The mineral additions in cement replacement may, among other ways, comprise the grading curve of the mortar in order to reduce porosity and consequently drying shrinkage that is governed by the movement of water from the mixture by capillary voids. Therefore, to preserve the durability of self-leveling mortars, this study aims to develop self-leveling mortar formulations for floors and evaluate the influence of the addition of fibers and mineral additions on shrinkage control. Results showed that the fibers could reduce the effects of drying shrinkage of mortar. Moreover, there was no detrimental impact of these fibers in the fluidity of the mortar. The partial replacement of cement with mineral addition in turn, was only effective for crack control for formulation with 50% substitution. In addition, it achieved high resistance to most mortars formulated directing the application of these to high strength levels. The mortar with 50% fly ash replacement at 28 days did not reach the minimum expected resistance to compression for high-strength mortar, a fact that is explained by pozzolanic action of fly ash that only gives strength to the material at older ages.

Keywords: self-leveling mortar, shrinkage, fibers, mineral admixture

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Execução de contrapiso com argamassa autonivelante.	17
Figura 1.2 – Retirada do ar incorporado pela haste de metal.	17
Figura 2.1 – Dispersão das partículas componentes da argamassa autonivelante.....	22
Figura 2.2 – Molécula de policarboxilato.....	25
Figura 2.3 – Ação química do VMA nos grãos de cimento.	26
Figura 2.4 – Formação do menisco de equilíbrio entre a pressão atmosférica e a tensão superficial da água no tubo capilar de raio R.	37
Figura 2.5 – Representação esquemática da adsorção da água entre as lamelas de C-S-H.	39
Figura 2.6 – Mecanismo de retração total.	39
Figura 2.7 – Gráfico Tensão x Deformação de uma matriz cimentícia.....	47
Figura 2.8 – Gráfico Tensão x Deformação de uma matriz cimentícia reforçada com fibras de polipropileno.....	47
Figura 2.9 – Esquema representativo da ação das fibras nos compósitos cimentícios.....	48
Figura 2.10 – Exemplo do aspecto visual das fibras de polipropileno.....	50
Figura 2.11 – Exemplo do aspecto visual das fibras de PVA.....	51
Figura 2.12 – Representação da fibra de celulose.	53
Figura 3.1 – Fissuras no piso endurecido decorrentes do fenômeno de retração.	54
Figura 3.2 – Fluxograma das etapas de ensaio.	55
Figura 3.3 – Representação esquemática das variáveis de estudo.....	56
Figura 3.4 – Granulometria do CPV ARI.....	58
Figura 3.5 – Granulometria da cinza volante.	59
Figura 3.6 – Curvas granulométricas do Cimento CP V – ARI e da Cinza Volante.....	60
Figura 3.7 – Difrátograma da amostra de cinza volante.....	60
Figura 3.8 - Granulometria agregado miúdo.	61
Figura 3.9 – Cone de Kantro (medidas em mm).	65
Figura 3.10 – Condições de uniformidade visual da borda da argamassa escoada.	66
Figura 3.11 – Argamassa autonivelante com segregação.....	67
Figura 3.12 – Análise visual da argamassa escoada quanto à segregação.	67
Figura 3.13 – Argamassa autonivelante com exsudação.	68
Figura 3.14 – Procedimento de mistura padrão das formulações de argamassa autonivelante.	71

Figura 3.15 – Ensaio de variação dimensional – leitura do corpo de prova.....	72
Figura 3.16 – Ensaio de variação dimensional - calibração com a barra padrão.	72
Figura 3.17 – Ensaio de retenção de fluxo – Obtenção diâmetro médio de espalhamento pela média dos diâmetro ortogonais nos tempos 0 e i min, sendo i os tempos determinados para leitura.	75
Figura 4.1 – Granulometria das argamassas REF, REF30S e REF50S.....	81
Figura 4.2 – Diâmetro médio de espalhamento das argamassas formuladas com cinza volante e da argamassa comercial e de referência.....	82
Figura 4.3 – Diâmetro médio de espalhamento das argamassas com fibras.	83
Figura 4.4 – Variação dimensional média das argamassas autonivelantes*.	85
Figura 4.5 - Variação dimensional e controle da umidade média da câmara seca das argamassas com fibra de PVA em diferentes teores.....	86
Figura 4.6 – Dados de teor de ar incorporado e densidade.....	89
Figura 4.7 – Retenção de fluxo das argamassas autonivelantes.....	90
Figura 4.8 – Dados de resistência à compressão e teor de ar incorporado das argamassas autonivelantes a 28 dias.....	91
Figura 4.9 – Dados de resistência à tração na flexão e teor de ar incorporado das argamassas autonivelantes a 28 dias.....	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Pastas autonivelantes e ensaios aplicáveis..	32
Tabela 2.2 - Requisitos de desempenho da EFNARC (2001) para pisos cimentícios autonivelantes modificados com polímeros.	34
Tabela 3.1 - Características químicas do CPV ARI	57
Tabela 3.2 - Características físicas do CPV ARI	57
Tabela 3.3 - Área específica do CPV ARI.....	58
Tabela 3.4 - Características químicas da cinza volante.	59
Tabela 3.5 - Características físicas e resultado do Chappelle modificado da cinza volante.	59
Tabela 3.6 - Minerais encontrados na amostra de cinza volante	60
Tabela 3.7 - Características da areia natural.....	61
Tabela 3.8 - Dados técnicos do aditivo SP Powerflow 4000.....	62
Tabela 3.9 - Dados técnicos aditivo VMA Centrament Stabi 520.	62
Tabela 3.10 - Dados técnicos das fibras.	62
Tabela 3.11 – Características físicas da AI.....	63
Tabela 3.12 – Características físicas da AIA.....	63
Tabela 3.13 - Caracterização das argamassas autonivelantes formuladas nesta pesquisa. .	64
Tabela 3.14 - Proporção em massa (kg) das formulações de Souza <i>et al.</i> (2013).....	65
Tabela 3.15 – Códigos e descrições das formulações de argamassas.	69
Tabela 4.1 - Proporção em massa e diâmetro médio de espalhamento formulações com aumento da quantidade de SP.....	77
Tabela 4.2 - Proporção em massa e diâmetro médio de espalhamento formulações com aumento da quantidade de SP e VMA.....	78
Tabela 4.3 – Proporção em massa e diâmetro médio de espalhamento das formulações desenvolvidas.	79
Tabela 4.4 – Formulação de referência em massa.....	80
Tabela 4.5 – Formulações das argamassas de referência e com substituição de cinza volantes, em massa .	81
Tabela 4.6 – Análise de variância dos resultados de diâmetros médios de espalhamento das argamassas PP011, PP013, PVA 011 e PVA013.	84
Tabela 4.7 – Retração por secagem aos 28 dias das argamassas formuladas.....	87

Tabela 4.8 – Análise de variância dos resultados de retração das argamassas PP011, PP013, PVA 011 e PVA013.	88
Tabela 4.10 – Análise de variância dos resultados de resistência à compressão das argamassas PP011, PP013, PVA 011 e PVA013.	93
Tabela 4.11 – Análise de variância dos resultados de resistência à tração na flexão das argamassas PP011, PP013, PVA 011 e PVA013.	95
Tabela 4.12 – Custos por m ² das argamassas autonivelantes e das argamassa industrializadas.	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a/c	Relação água/cimento
a/ms	Relação água/materiais secos
AI	Argamassa Industrializada
C	Fibra de celulose
C011	Adição de fibra de celulose em 0,11% da massa de cimento
C013	Adição de fibra de celulose em 0,13% da massa de cimento
C200	Adição de fibra de celulose em 2,00% da massa de cimento
CO70	Adição de fibra de celulose em 0,70% da massa de cimento
CP	Corpo de prova
FRC	Fiber-Reinforced Cement Composites
LAME	Laboratório de Materiais e Estruturas
LAMIR	Laboratório de Minerais e Rochas
LATECA	Laboratório de Tecnologia de Argamassas
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma do Mercosul
PP	Fibra de polipropileno
PP011	Adição de fibra de polipropileno em 0,11% da massa de cimento
PP013	Adição de fibra de polipropileno em 0,13% da massa de cimento
PVA	Fibra de acetato de polivinila
PVA011	Adição de fibra de acetato de polivinila em 0,11% da massa de cimento
PVA013	Adição de fibra de acetato de polivinila em 0,13% da massa de cimento
REF	Formulação referência
REF30S	Formulação de referência com 30% de substituição de cinza volante
REF50S	Formulação de referência com 50% de substituição de cinza volante
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
SP	Aditivo superplastificante
UFOB	Universidade Federal do Oeste da Bahia
UFPR	Universidade Federal do Paraná
VMA	Aditivo modificador de viscosidade

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	08
LISTA DE TABELAS.....	10
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	12
1 INTRODUÇÃO	16
1.1. OBJETIVO.....	19
1.2. JUSTIFICATIVAS.....	19
1.2.1. Tecnológica	19
1.2.2. Econômica e Ambiental	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1. COMPOSIÇÃO DA ARGAMASSA AUTONIVELANTE.....	22
2.1.1. Cimento	23
2.1.2. Agregado	24
2.1.3. Adições minerais	24
2.1.4. Aditivos químicos.....	25
2.1.5. Estudos da formulação de argamassas autonivelantes	27
2.2. PROPRIEDADES DA ARGAMASSA AUTONIVELANTE	29
2.2.1. Estado fresco	29
2.2.2. Estado Endurecido.....	32
2.2.3. Fenômeno da retração	35
2.3. ESTRUTURA CIMENTÍCIA REFORÇADA COM FIBRAS	45
2.3.1. Mecanismo de ação	46
2.3.2. O efeito das fibras sintéticas.....	48
2.3.3. O efeito das fibras naturais.....	52
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	54
3.1. VARIÁVEIS DE ESTUDO	56
3.2. MATERIAIS	57
3.2.1. Cimento	57

3.2.2.	Cinza Volante	58
3.2.3.	Agregado miúdo	61
3.2.4.	Aditivos	61
3.2.5.	Fibras	62
3.2.6.	Água de amassamento	63
3.2.7.	Argamassas industrializadas.....	63
3.3.	MÉTODOS.....	64
3.3.1.	Etapa 1: Ajuste da formulação	64
3.3.2.	Etapa 2: Análise da variação dimensional.....	71
3.3.3.	Etapa 3: Ensaio de caracterização.....	73
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	76
4.1.	ETAPA 1 – AJUSTE DA FORMULAÇÃO.....	76
4.1.1.	Dosagem dos aditivos SP e VMA	76
4.1.2.	Emprego de cinza volante	80
4.1.3.	Emprego de fibras	82
4.2.	ETAPA 2 – VARIAÇÃO DIMENSIONAL	85
4.3.	ETAPA 3 – CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS E ANÁLISE DE CUSTO.....	89
4.3.1.	Estado fresco	89
4.3.2.	Estado Endurecido.....	91
4.3.3.	Análise de custo.....	95
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	97
5.1.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	98
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100

1 INTRODUÇÃO

A argamassa autonivelante é um material ainda pouco pesquisado, principalmente no Brasil, portanto, grande parte da literatura existente e disponível trata sobre concretos auto adensáveis. Segundo Martins (2009), a argamassa autonivelante é derivada da argamassa auto adensável, sendo que ela obrigatoriamente deve apresentar uma superfície lisa e regular, sendo aceito apenas um desnível de 1 mm a cada 4m de comprimento do elemento estrutural.

Essa argamassa recentemente inserida na construção civil, se destaca por ser um material de elevada fluidez e que permite obter como produto final um piso mais homogêneo e até menos espesso. A sua aplicação é realizada através de um processo rápido e que permite a diminuição de mão de obra, pois devido ao fato de ser lançada sobre a superfície com o auxílio de uma mangueira, esse material tem a capacidade de se espalhar em fôrmas, moldes ou em lonas, sem que haja necessidade de uma energia de espalhamento (MARTINS, 2009).

Por ter como propriedade alto índice de fluidez e de se auto nivelar sem a necessidade de esforços externos, o processo de execução de piso e contrapiso com argamassa autonivelante é simples e eficaz, pois esta pode ser transportada até a obra por caminhão betoneira e lançada sobre a laje por bombeamento. Em geral, sua aplicação é realizada por uma mangueira que permite o espalhamento sobre a superfície, sendo então, de fácil e rápida execução com redução de mão de obra (FREITAS, 2009).

Na Europa, as argamassas autonivelantes são frequentemente utilizadas nas construções e estão sendo produzidas por indústrias como Lafarge, Belitex, Agilia Sols, Anhysol, Duoflow, entre outras. O material é produzido em uma central dosadora e levado ao canteiro de obras através de caminhões betoneira (SHAEFER, 2013). Além das vantagens de produção e transporte, essas argamassas possuem uma maior aderência ao substrato quando comparadas às argamassas convencionais de execução de piso e contrapiso.

O processo executivo da argamassa autonivelante consiste basicamente no lançamento do material sobre a superfície respeitando o nível que é controlado por tripés de nivelção a laser (Figura 1.1). Ao final, promove-se a retirada das bolhas de ar incorporadas no processo de aplicação do material por meio de um rodo ou uma espécie de haste de metal, como está representado na Figura 1.2.

Figura 1.1 - Execução de contrapiso com argamassa autonivelante.



Fonte: HOBIMIX (2008)

Figura 1.2 – Retirada do ar incorporado pela haste de metal.



Fonte: HOBIMIX (2008)

Essa argamassa, assim como o concreto auto adensável, tem como principais propriedades alta fluidez e deformabilidade, e elevada resistência à segregação no estado fresco. Isto se torna possível devido ao equilíbrio entre a alta fluidez, viscosidade moderada e a coesão entre as partículas que a compõem.

No entanto, Souza et al. (2013), com base em aplicações em campo, constataram que devido ao rápido início de pega e mesmo utilizando o processo de cura úmida, o material pode apresentar fissuras ocasionadas pelo processo de retração total (retração química, plástica, de secagem, entre outros) após transcorridas as primeiras idades.

Giroto et al. (2014) afirmam que as argamassas de concreto auto adensável, que têm comportamento similar às argamassas autonivelantes, podem retrair tanto no estado plástico quanto no endurecido, e consistem basicamente de uma combinação em geral de características como geometria da estrutura, dosagem do material e condições climáticas.

A retração por secagem pode ocorrer em razão do processo de evaporação da água que compõe a estrutura cimentícia gerando tensões capilares, ocasionando a perda de volume

e conseqüentemente provocando a fissuração. Este efeito é amplamente visto em placas que têm grandes áreas expostas, tais como lajes de pavimento. Balaguru e Shah (1992) afirmam que uma das possíveis soluções para esse problema é a adição de fibras poliméricas que podem reduzir os efeitos da retração plástica.

Atualmente tem crescido o interesse pela utilização das composições cimentícias reforçadas com fibras (*Fiber-Reinforced Cement Composites* – FRC) com o intuito de aumentar a durabilidade e resistência dessas para servirem como auxílio para a indústria da construção civil. Silva et al. (2012) explicam que os FRC são resultantes da dispersão de fibras dentro de uma matriz de cimento. Ademais, relatam que tal reforço pode apresentar melhora no comportamento mecânico do compósito, aumentando assim a ductilidade, tenacidade, resistência ao impacto, à flexão e ao cisalhamento, e que, portanto, pode ser aplicado em vigas, lajes e contrapisos.

Silva et al. (2012) ainda reforçam que a adição de fibras em uma matriz de cimento tem como efeitos primários o controle da propagação de fissuras, e a alteração do comportamento do material após a fissuração. A função das fibras é atuar como ponte entre as microfissuras impedindo que elas aumentem.

Veiga (2008) também afirma que a adição de fibras beneficia o comportamento pós-fissuração das argamassas e funciona como ponte de transferência de tensões. Silva et al. (2012) complementam que as fibras sintéticas oferecem qualidades como: resistência química e à corrosão, e menor fissuração durante a retração plástica dos compósitos imaturos.

Portanto, para o contexto das argamassas autonivelantes e com a preocupação com sua durabilidade, o presente trabalho tem por objetivo desenvolver formulações de argamassas autonivelantes para pisos e avaliar qual a influência da adição de fibras no processo de retração por secagem dessas argamassas. Serão utilizadas fibras poliméricas sintéticas e naturais, sendo estas de polipropileno e acetato de polivinila (PVA), e as de celulose, respectivamente.

Parte-se da hipótese de que estas fibras podem reduzir os efeitos de retração por secagem da argamassa. Para tanto, também é importante a avaliação do impacto dessas fibras no comportamento da argamassa no estado fresco quanto à trabalhabilidade, pois a característica autonivelante deve ser mantida mesmo com a adição de fibras na mistura.

1.1. OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo desenvolver formulações de argamassas autonivelantes para pisos com base em metodologia proposta e avaliar a retração por secagem a partir da inclusão de fibras sintéticas na mistura e substituição parcial do cimento por adição mineral.

1.2. JUSTIFICATIVAS

1.2.1. Tecnológica

Devido ao seu alto índice de fluidez, a argamassa autonivelante apresenta a capacidade de se adensar, sem prejuízo de segregação e/ou exsudação, sem a necessidade da aplicação de forças externas, ou seja, o adensamento é obtido com a ação do seu peso próprio.

Nakakura e Bucher (1997) também citam outras vantagens das argamassas autonivelantes tais como:

- redução da espessura do contrapiso, o que conseqüentemente reduz o peso próprio dele e até o consumo de cimento;
- redução da fissuração pela inclusão de aditivos químicos retentores de água e de fibras;
- aumento da produtividade em relação à argamassa convencional, já que o material é bombeado e não há necessidade de desempenho;
- a cura da argamassa autonivelante é mais rápida, promovida pelo tipo de cimento e a combinação de aditivos e adições.

Além disso, o emprego de fibras em materiais cimentícios proporciona o controle da fissuração resultante dos diversos tipos de retração. Isso ocorre, pois elas atuam dentro dos compostos como ponte de transferência de tensões. Assim, a argamassa pode apresentar apenas uma microfissuração superficial devido à contenção a propagação de microfissuras, o que resulta em um material com melhor desempenho com relação aos processos de retração e com maior durabilidade conseqüentemente.

O emprego de fibras sintéticas, como as de polipropileno e acetato de polivinila (PVA), e de origem vegetal, é vantajoso em relação aos demais tipos de fibras como as metálicas e de vidro, pois essas não sofrem processo corrosivo e tampouco são atacadas pelo

meio alcalino do cimento (BENTUR e MINDESS, 1990). Também, as fibras sintéticas não estão sujeitas ao ataque de organismos xilófagos por não terem a mesma característica orgânica natural das fibras de celulose. Por fim, as fibras quando adicionadas a matrizes cimentícias, promovem o aumento da tenacidade e da resistência mecânica do material (CAMPELLO, 2013).

No entanto, a dispersão de fibras em compósitos cimentícios aumenta a resistência ao escoamento do fluido. Ou seja, se torna importante o estudo de um teor ótimo de adição de fibras que reduza o grau de fissuração da argamassa autonivelante ocasionada pela retração por secagem, sem que prejudique a sua fluidez.

1.2.2. Econômica e Ambiental

As argamassas autonivelantes, dependendo da complexidade da formulação, podem apresentar alto custo em razão da escolha de mais de um tipo de cimento e de muitos tipos de aditivos químicos. No entanto, no que tange o custo de aplicação, tem-se uma economia considerável devido a necessidade de pouca mão de obra. Além disso, como o processo de aplicação é simplificado, há o aumento significativo da produtividade que consequentemente reduz os gastos com aplicação. Sendo assim, pode-se dizer que a escolha dessas argamassas para produção de piso e contrapiso resulta em um processo construtivo mais econômico em relação aos métodos convencionais.

De La Peña (2011) constatou que o custo da argamassa autonivelante é mais baixo devido à sua aplicação devido à necessidade de quantidade reduzida de mão de obra. Para mais, apresentou outras vantagens que reduzem o custo de produção, como:

- aplicação rápida permitindo a redução do tempo de obra;
- alta qualidade e durabilidade;
- superfícies sem falhas.

Por outro lado, o reforço com fibras em compósitos cimentícios proporciona o aumento da resistência mecânica e resistência ao impacto, melhoria do comportamento à deformação e tenacidade, e principalmente, maior controle de fissuração decorrente dos processos de retração (SILVA, 2006; AHMED e MIHASHI, 2011).

Sendo assim, pode-se inferir que as argamassas autonivelantes reforçadas com fibras apresentarão provavelmente maior durabilidade se controlado o referido processo de

fissuração, consequência da retração. Dessa forma, é de se esperar que a adição de fibras resulte na redução da necessidade de reparos futuros no piso decorrentes de fissurações.

Ainda mais, o aumento da durabilidade do material em estudo também proporcionará uma contribuição ambiental. Isto porque, a referida supressão propiciará a diminuição da geração de resíduos sólidos. E além desta contribuição, a redução da necessidade de uma nova produção da argamassa para reparo do piso diminuirá também a quantidade de consumo de cimento. A indústria de cimento é responsável por cerca de 6% de todas as emissões de dióxido de carbono (CO₂), que é o principal gás responsável pelo aquecimento global (WBCSD, 2012). Portanto, argamassas autonivelantes reforçadas com fibras também poderão contribuir com a redução de emissão de CO₂ para o meio ambiente.

Nesse mesmo sentido, a argamassa autonivelante, independentemente de sua formulação, permite a produção de pisos menos espessos, enquanto que os métodos convencionais produzem pisos de espessura entre 8 e 15 mm. O método autonivelante permite a redução da espessura para 5 a 10 mm. Sendo assim, Barros e Sabbatini (1991) fizeram um estudo comparativo em que com a redução de 20 mm na espessura do piso foi possível diminuir o consumo de cimento em aproximadamente 40%. Redução essa considerável por se tratar também de uma supressão direta no impacto ambiental causado pela produção de cimento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

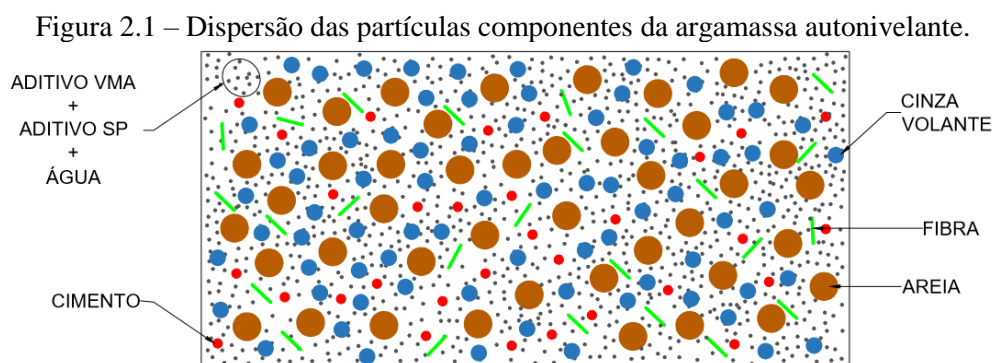
2.1. COMPOSIÇÃO DA ARGAMASSA AUTONIVELANTE

A argamassa autonivelante possui uma composição básica similar ao concreto auto adensável já que ambos apresentam o mesmo princípio de adensamento por ação da gravidade e se caracterizam por uma estrutura cimentícia modificada por aditivos e adições minerais. Portanto, a composição se dá da seguinte forma: aglomerante (cimento), agregado miúdo (areia), aditivo superplastificante que visa modificar a fluidez e o adensamento do composto, adição de finos ou materiais pozolânicos, e, enfim, os aditivos modificadores de viscosidade para controlar a exsudação e a segregação (ZHU e BARTOS, 2003; ANJOS, 2009).

Nakakura e Bucher (1997) indicam que a água de amassamento se constitui entre 20 e 30 % da massa de materiais secos do composto. No entanto, a dosagem ideal para composição das argamassas autonivelantes terá que ser definida pela otimização de seus compostos para que se atinja a trabalhabilidade especificada em projeto de acordo com a aplicação (FELEKOĞLU *et al.*, 2006).

Logo, espera-se que a dosagem correta dos compostos autonivelantes permita 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 *et al.*, 2011).

Sendo assim, no que se refere à microestrutura da argamassa autonivelante (exemplificada na Figura 2.1), o equilíbrio da suspensão de partículas exerce influência no desempenho reológico da argamassa por se tratar de uma concentração de sólidos.



Fonte: Adaptado de Martins (2009).

2.1.1. Cimento

Alguns pesquisadores indicam que para se obter uma argamassa autonivelante deve-se utilizar cimento Portland de alta resistência inicial (de 25 a 50% da massa total). Os restantes 10 a 15% da massa devem ser compostos pelos aditivos químicos e adições minerais (LUNDHOLM *et al.*, 1990; NAKAKURA e BUCHER, 1997).

Apesar disso, não há um consenso na literatura sobre qual cimento a ser adotado para a execução do referido material. Por conseguinte, ressalta-se que os cimentos mais finos propiciam que as reações de hidratação ocorram mais rapidamente deixando o material mais suscetível ao processo de retração e a conseqüente fissuração. Além disso, Bauer e Sousa (2005) alertam que é preciso cuidado com o consumo de cimento, pois as argamassas com grande consumo são menos deformáveis e também apresentam um risco maior de fissuração.

Ainda, o processo de fabricação dos grãos de cimento faz com que tenham grande tendência a aglomerar devido à ação das forças de Van der Waals que são forças eletrostáticas entre as regiões de cargas opostas. Essa aglomeração proporciona, portanto, o aumento da viscosidade da argamassa, reduzindo a fluidez por aprisionar parte da água de amassamento que estaria disponível para fluidificação da mistura (MONTE, 2003). Por causa disso, são utilizados os aditivos superplastificantes para promover a dispersão dos grãos.

Schaefer (2013), de modo inédito, realizou uma pesquisa sobre a valorização de uma fonte alternativa de sulfato de cálcio para a produção de argamassas autonivelantes. Diferentemente das pesquisas apresentadas, esse estudo propôs argamassas à base de sulfato de cálcio que possuem rápido endurecimento, pouca retração e fissuração, mas que são sensíveis à umidade. Verificou-se que é possível utilizar o fosfogesso na produção de argamassas autonivelantes, desde que sejam feitas misturas ternárias de sulfato de cálcio, cimento aluminoso e cimento Portland. Em contrapartida, para esse tipo de composição pretende-se promover a formação da etringita ($C_3A.3CS.H_{32}$) que é responsável pelo rápido endurecimento do material, mas que por sua vez influi na estabilidade dimensional dos materiais sendo indispensável o controle da expansão resultante desse processo.

2.1.2. Agregado

Segundo Martins (2009), a escolha do agregado miúdo a ser utilizado nas formulações das argamassas autonivelantes deve ser em função da granulometria, de preferência contínua, por esta propriedade ser responsável pela coesão e viscosidade do material.

Katsiadramis et. al (2010) esclarecem que os agregados que possuem frações mais grossas podem aumentar a viscosidade da matriz. Essa propriedade é importante, pois a alta viscosidade pode comprometer o espalhamento e até o bombeamento da argamassa, e por outro lado, materiais pouco viscosos tendem a ter problemas de segregação e exsudação.

Christianto (2004) recomenda que para que haja a auto compactação dos componentes da mistura, o volume de areia em relação à argamassa deve ser de 40%. Em contrapartida, pesquisadores como Nakakura e Bucher (1997) e Lundholm *et al.* (1990) mostraram que esse valor pode variar de 40 a 70%.

2.1.3. Adições minerais

A adição de materiais finos permite que estes atuem na quebra da inércia do sistema promovendo a rápida reação das partículas de cimento com a água. Dessa forma, segundo Helene e Terzian *apud* Tutikan e Dal Molin (2008)¹, quanto mais finas forem as adições, menores os teores de adição necessários, pois o aumento da frequência de contato entre as partículas em determinado volume proporciona o aumento da viscosidade e coesão da mistura. Isto é, promove o equilíbrio necessário para que a argamassa seja autonivelante evitando também a ocorrência de segregação e exsudação.

Nakakura e Bucher (1997) e Sahmaran *et al.* (2006) comentam que a adição de minerais reativos pode substituir parte do volume de cimento, oportunizando a redução do custo do material. Isso é possível, pois as partículas das adições possuem tamanho médio entre as partículas de agregado miúdo e cimento promovendo o efeito fíler de preenchimento dos vazios. No entanto, há também um limite no uso das adições minerais dependente da formulação do composto, pois a presença de finos requer maior consumo de água em função do aumento da área específica.

¹ HELENE, P; TERZIAN, P. *Manual de dosagem e controle do concreto*. Pini, São Paulo, 1992.

Sendo assim, a resistência mecânica pode ser afetada com o aumento do volume de água na mistura, mas para evitar isso utilizam-se os aditivos superplastificantes na mistura para que os sólidos se tornem bem dispersos, sem a necessidade de adicionar mais água para envolvê-los e permitir que haja uma boa trabalhabilidade.

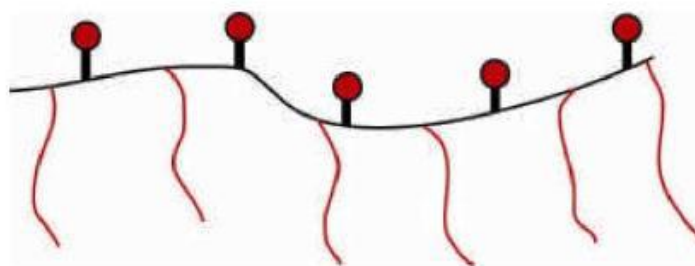
Ademais, as adições trazem outras melhorias como redução da permeabilidade e porosidade capilar o que resulta no aumento da resistividade físico-mecânica aos agentes agressivos (TUTIKAN, 2004). Também, alteram a viscosidade aumentando a densidade e coesão da argamassa controlando assim a exsudação e a segregação.

2.1.4. Aditivos químicos

Para a produção deste material também são necessários aditivos superplastificantes (SP), em geral aqueles que são à base de carboxilatos, pois promovem uma melhor dispersão das partículas de cimento. Isso ocorre porque as partículas de cimento absorvem as partículas dos superplastificantes que por sua vez possuem base polimérica. Portanto, como os polímeros aumentam a carga negativa do cimento, fazem com que suas partículas se dispersem por repulsão elétrica diminuindo assim a quantidade de água necessária para fluidificar a pasta (TUTIKAN e DAL MOLIN, 2008).

Esses aditivos além de agirem por repulsão eletrostática, agem na forma de repulsão estérica, pois em vários pontos da cadeia principal há uma ramificação de uma cadeia longa que promove um forte efeito dispersante (Figura 2.2). Sendo assim, ocorre o impedimento do entrelaçamento das cadeias laterais das moléculas dos diferentes aditivos do composto, criando uma capa de adsorção de grande volume que impede a aproximação das partículas de cimento (GETTU e RONCERO, 1998).

Figura 2.2 – Molécula de policarboxilato.

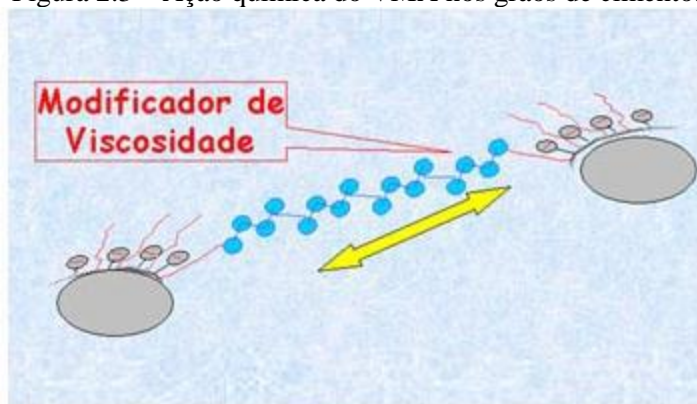


Fonte: Fracalossi (2011).

Portanto, esse impedimento físico pela capa de adsorção em volta dos grãos de cimento impede sua floculação e também altera a tensão superficial da água (HARTMANN, 2002). No entanto, ocorrem casos em que a ação do aditivo é reversa resultando na aglomeração das partículas sólidas. Isso pode ocorrer por dois motivos, sendo eles a incompatibilidade entre o aditivo e o cimento, e a dosagem do aditivo. A incompatibilidade pode ocorrer devido à composição química tanto do aditivo quanto do próprio cimento ou das adições minerais no composto. Já a dosagem, em excesso, faz com que ocorra a segregação e exsudação na mistura, e em falta o aditivo não será eficaz na dispersão das partículas.

A adição de aditivos modificadores de viscosidade (VMA) também é usual na produção de argamassas autonivelantes. Isso porque esses são à base de polissacarídeos que quando adicionados ao material, melhoram a coesão no estado fresco o que impede a segregação e perda de água por exsudação (TUTIKAN e DAL MOLIN, 2008). O VMA promove a viscosidade por meio da formação de rede que contém a água da mistura e mantém suspensas as partículas finas do composto, aumentando a coesão (Figura 2.3).

Figura 2.3 – Ação química do VMA nos grãos de cimento.



Fonte: Basf *apud* Souza *et al.* (2013)².

Esse aditivo reduz a viscosidade dos concretos e argamassas em função do aumento da taxa de cisalhamento aplicada, ou seja, caracteriza-se por promover um comportamento pseudoplástico. Portanto, para o caso da argamassa autonivelante, por se tratar de um material fluido, com o aumento da taxa de cisalhamento e a redução da viscosidade aumenta-se a capacidade de reter água e manter a sustentabilidade das partículas (MELO, 2005).

² BASF. *Rheomac VMA*. Disponível em: <<http://www.basf-cc.com.br/>> Acesso em 2013.

Porém, na literatura são encontradas algumas desvantagens do VMA tais como: incorporação de ar, devido à redução da tensão superficial da água da mistura; incompatibilidade com alguns aditivos superplastificantes, pela capacidade de adsorção dos grãos de cimento; em doses elevadas aumenta a retração por secagem (RIXOM e MAILVAGANAM, 1999; REPETTE, 2005).

2.1.5. Estudos da formulação de argamassas autonivelantes

No Brasil, o estudo sobre argamassas autonivelantes começou com Nakakura e Bucher (1997) que introduziram conceitos sobre esse material. Nessa pesquisa foram apresentados parâmetros de desempenho de argamassa autonivelante para os estados fresco e endurecido e qual devia ser o quantitativo médio dos materiais componentes dessas argamassas.

Sendo assim, iniciou-se na UFPR uma sequência de pesquisas sobre formulações de argamassa autonivelante que certamente foram adotadas como base para o presente trabalho. Esse estudo teve início com Martins (2009) que estabeleceu um procedimento para dosagem de pastas para argamassa autonivelante, tendo em vista a importância do desempenho a fresco da pasta na fluidez dessa argamassa. Para efeito de análise reológica da pasta através do viscosímetro e da realização de ensaios em um equipamento vindo da Europa chamado “Cilindro Espanhol”, nesta pesquisa foram propostas diversas formulações do material contendo adição de sílica ativa, aditivo modificador de viscosidade (VMA) e aditivo superplastificante (SP). Dessa forma, indicou para pasta fluida e sem segregação, teores de 0,9% de VMA e 0,5% de SP em relação à porção de cimento. Essa definição foi baseada primeiramente na análise das condições de uniformidade da borda do material escoado através do Cilindro Espanhol, em conjunto com a análise do desempenho do material no viscosímetro.

Dando prosseguimento ao estudo de Martins (2009), Souza *et. al.* (2013) desenvolveram uma técnica para formulação da argamassa autonivelante com os mesmos insumos utilizados nas pastas de Martins (2009), acrescidos de areia. Nessa pesquisa os autores promoveram a formulação das argamassas com principal análise a caracterização no estado fresco quanto à fluidez e a condição visual do material escoado. Foram adotados os preceitos de Martins (2009) de análise de borda e de existência de segregação e exsudação para garantir um desempenho adequado das argamassas no estado fresco.

No entanto, para essa caracterização das argamassas foi utilizado o cone de Kantro (KANTRO, 1980). Ressalte-se que esse ensaio originalmente foi desenvolvido para caracterização de pastas, mas que devido à fluidez os autores seguiram a indicação de Nakakura e Bucher (1997) para o emprego em argamassas autonivelantes. Dessa pesquisa, na etapa final de aplicação prática do material em obra notou-se a presença incisiva de fissuras, fato este que norteou o tema da dissertação de mestrado aqui apresentada.

Ainda mais, Freitas (2009) que já havia identificado efeitos significativos de retração em argamassas autonivelantes, propôs o emprego de aditivos redutores de retração, visando sanar o problema de retração aos quais os pisos autonivelantes estão sujeitos em função de sua composição, da alta relação entre a superfície exposta ao meio externo e da espessura. O problema da retração também pode ser controlado através de adição de fibras ao composto, solução esta que foi avaliada no presente trabalho.

Além dessas pesquisas, Freitas et al. (2010) também realizaram pesquisa sobre as adições e aditivos minerais nas propriedades de argamassas autonivelantes. O estudo propôs as adições minerais de metaculim e cinza de biomassa da cana-de-açúcar, em substituição a uma quantidade de 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 a presença do teor de sílica proporcionou o aumento da resistência à compressão.

Somando às demais, Schaefer (2013), de modo inédito, realizou uma pesquisa sobre a valorização de uma fonte alternativa de sulfato de cálcio para a produção de argamassas autonivelantes. Diferentemente das pesquisas apresentadas, esse estudo propôs argamassas à base de sulfato de cálcio que possuem rápido endurecimento, pouca retração e fissuração, mas que são sensíveis à umidade. Verificou-se que é possível utilizar o fosfogesso na produção de argamassas autonivelantes e desde que sejam feitas misturas ternárias de sulfato de cálcio, cimento aluminoso e cimento Portland.

Também houve uma pesquisa sobre o emprego de ligantes orgânicos que promovem a flexibilidade, resistência à abrasão e de aderência dessas argamassas (GUIMARÃES, 2013). Dessa pesquisa, constatou-se a produção de superfícies mais lisas e a redução de exsudação e segregação, características essas de suma importância para materiais aplicados a pisos.

Quanto as pesquisas internacionais, Zhu et al. (2013), Turk (2012) e Sahmaran et al. (2006) pesquisaram a argamassa autonivelante com a adição de sílica ativa e cinza volante. Em resumo, os resultados dessas pesquisas também atestaram que as adições minerais aumentaram significativamente a trabalhabilidade do material, propiciando maior fluidez, por influenciarem no processo de hidratação do cimento.

Ademais, os estudos realizados por Do e Soh (2003) e Gasparo et al. (2009) sugeriram a adição de polímeros à composição das argamassas autonivelantes. Desta forma, comprovaram que a dispersão dos polímeros altera a consistência do material, porém que protegem a camada superior milimétrica da argamassa devido à alteração da porosidade.

2.2. PROPRIEDADES DA ARGAMASSA AUTONIVELANTE

2.2.1. Estado fresco

Como citado anteriormente, as argamassas autonivelantes têm como características convencionais a alta fluidez e estabilidade, resistindo à segregação e exsudação, e a capacidade de preenchimento de espaços com ação apenas do seu peso próprio sem o auxílio de adensamento manual ou mecânico (TVIKSTA, 2000; REPETTE, 2005).

Essas características são influenciadas pelas suas características reológicas, pautadas na tensão de escoamento e na viscosidade plástica. A tensão de escoamento é a tensão de cisalhamento mínima necessária para que se inicie o escoamento do fluido e que depende fortemente do estado de aglomeração e dispersão das partículas. A viscosidade é representada pela reta ascendente do gráfico de tensão por taxa de cisalhamento, indicando, então, a estabilidade da mistura (BANFILL, 1994).

A fluidez da mistura depende diretamente da ação do aditivo superplastificante que promoverá a dispersão das partículas, ou seja, o afastamento das mesmas, permitindo assim que a mistura aumente a fluidez. Todavia, o uso do aditivo tem um limite que se ultrapassado promoverá a exsudação da água e a segregação da mistura, ou seja, com o afastamento total dos grãos, perde-se o equilíbrio na microestrutura resultando na separação entre fase sólida e fase líquida da mistura.

A existência de um limite de adição de aditivo superplastificante foi comprovada por GOWDA *et al.* (2011) que realizaram um estudo sobre a formulação de argamassas autonivelantes alterando as quantidades dos seus componentes. Esses pesquisadores

avaliaram a argamassa no estado fresco fazendo o espalhamento da mesma pelo cone de Kantro (KANTRO, 1980). Pelo método de “tentativa e erro”, foram variando os consumos de cimento, dos aditivos superplastificante e promotor de viscosidade e a relação água/cimento (a/c), para avaliar o diâmetro de abertura e as condições de borda. Por fim, puderam verificar que quando a quantidade de superplastificante era alta, a mistura apresentava muita segregação e exsudação.

De forma similar, nesse mesmo estudo, os autores concluíram que o ajuste do aditivo promotor de viscosidade permitiu a uniformidade visual das partículas que é adquirida pela ideal coesão entre as mesmas.

Nakakura e Bucher (1997) ao avaliarem a fluidez, apontaram que as consistências (obtidas pelo espalhamento com o cone de Kantro) para as aplicações das argamassas autonivelantes devem ser:

- material para regularização: 130 a 140 mm;
- argamassas para acabamento: 160 a 165 mm.

Para complementar, como visto anteriormente, as adições minerais também são responsáveis por promover a fluidez através do efeito fíler de preenchimento dos vazios existentes entre as partículas de maior e menor dimensão. Nesse sentido, pesquisadores como Safiuddin *et al.* (2011) e Khaleel e Razak (2012) verificaram que adição de cinza volante, devido à sua forma esférica que permite que as partículas rolem entre si facilmente, reduz a fricção entre as demais partículas sólidas resultando no aumento da fluidez de pastas cimentícias. No entanto, estes pesquisadores puderam constatar que o emprego excessivo das adições minerais aumentou a segregação e exsudação das argamassas auto adensáveis.

Nesse mesmo sentido, Safiuddin *et al.* (2011) indicam para avaliação dessas propriedades a análise visual do material espalhado. Assim, é possível perceber a exsudação pelo excesso de água na superfície do material fresco, e identificar a segregação se houver a presença de sólidos aglomerados. Portanto, entende-se por segregação a separação da parte sólida da líquida que pode ocorrer por diversos fatores como a dosagem incorreta do composto. A exsudação, por sua vez, é o fenômeno de migração da água da mistura para superfície levando consigo partículas de cimento.

As argamassas em geral estão também sujeitas à restrições térmicas e hídricas que contribuem fortemente para seu envelhecimento. Portanto, quando a água da mistura evapora ou é absorvida pelo substrato rapidamente a hidratação dos grãos de cimento é prejudicada diminuindo, conseqüentemente, a resistência mecânica do material. Sendo assim, a

capacidade do material de reter água é de substancial importância. Esta propriedade é controlada pela própria composição do material. Por exemplo, como visto anteriormente, a presença de materiais finos pode contribuir na retenção da água da mistura (SÉBAÏBI *et al.*, 2003). A retenção de água pode ser avaliada pelo método prescrito pela ABNT NBR 13277 (2005).

Ainda mais, a dosagem da argamassa autonivelante influencia sobremaneira as propriedades de auto adensabilidade e retenção de água. A primeira é a capacidade do material de se espalhar e auto consolidar sem a necessidade de aplicação de energia externa, e sem que haja separação significativa dos componentes da mistura. Para que isso ocorra o material deve apresentar uma característica de estabilidade estática que é a capacidade da mistura de resistir a exsudação e segregação que são influenciados pela gravidade com o tempo (PANESAR e SHINDMAN, 2011; MEHDIPOUR *et al.*, 2013).

Enfim, a fluidez promovida pela citada dispersão das partículas e a coesão combinada com o aumento controlado da viscosidade, permitem que o material seja adensado somente pela ação da força gravitacional. Também, a coesão que tem ligação com a trabalhabilidade, e a rapidez de solidificação da mistura, controlam a retenção de fluxo inicial e final, respectivamente. O escoamento da argamassa no momento da aplicação vai depender da viscosidade que se for alta vai dificultar o preenchimento das áreas e a obtenção de espessuras desejadas. A perda da trabalhabilidade ocasionada pelo endurecimento do material, influenciado por um tempo de pega acelerado, pode comprometer o bombeamento do material em função do tempo de aplicação.

ASTM C 1708 (2012) é a norma que prescreve o ensaio de retenção de fluxo através da avaliação do diâmetro médio de espalhamento após 20 e 30 min do lançamento do material através de um cone metálico. A norma apresenta que a importância da retenção de fluxo está numa taxa de espalhamento crítica para argamassas autonivelantes que pode garantir que estas mantenham sua propriedade de auto nivelamento. Se a fluidez diminuir ao longo do tempo o material terá seu nivelamento comprometido. Sendo assim, com esse ensaio é possível determinar o tempo de manuseio das argamassas.

Nesse sentido, muitos 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. Para mais, Mehdipour *et al.* (2013) avaliaram para diversas formulações de argamassas autonivelantes a retenção de fluxo, e o comportamento comum para todas formulações foi que a taxa de

escoamento aumenta até o 30 min de ensaio e depois se estabiliza. Este resultado pode explicar o tempo limite de manuseio apresentado pelos produtores de argamassas autonivelantes.

Sendo assim, ressalta-se que a capacidade de retenção de água das argamassas autonivelantes também precisa ser bem controlada de modo que não prejudique na perda da trabalhabilidade e conseqüentemente na retenção de fluxo.

Por fim, ressalta-se que não há normas brasileiras para argamassas autonivelantes. As normas estrangeiras direcionadas para argamassas autonivelantes não estipulam parâmetros para as propriedades no estado fresco.

2.2.2. Estado Endurecido

A norma europeia para pastas autonivelantes EN 13813 (UNE, 2002) 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. Assim, seguem apresentadas especificações apenas para pasta cimentícia na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Pastas autonivelantes e ensaios aplicáveis.

Materiais das pastas	Resistência a compressão	Resistência à flexão	Resistência ao desgaste "Bohme"	Resistência ao desgaste "BCA"	Resistência ao desgaste por rodadura	Dureza superficial	Resistência a 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
Cimento	N	N	N ^a (um dos três)		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.

Fonte: Adaptada da UNE EN 13813 (2002)

Como pode ser visto a referida norma não determina os valores de resultados ideais. Contudo, ela solicita que cada fabricante tenha um controle rigoroso de sua produção e de

seus produtos, a começar pelo recebimento das matérias-primas, as inspeções regulares dos equipamentos e ensaios nos produtos produzidos.

Nakakura e Bucher (1997) propõem limites de resistência baseados na norma brasileira para produção de pisos. As indicações são as seguintes:

- Resistência à compressão: 25 a 35 MPa;
- Resistência à tração na flexão: 8 a 11 MPa;
- Resistência ao arranchamento por tração:
 - Pisos residenciais: 1 MPa (cura de 28 dias), 0,5 MPa (cura de 28 dias com 10.000 ciclos de passagem de carga de 25 N);
 - Pisos de locais públicos e indústrias leves: 2,0 MPa (após 28 dias de cura ao ar) e de 1,0 MPa (28 dias de cura e mais 10.000 aplicações de carga de 250 N com rodízios);
 - Pisos industriais submetidos à ação de rodas maciças de carregadeiras: > 3,0 MPa (28 dias de cura e mais 10.000 aplicações de 2.000 N).
- Resistência à abrasão (pelo método de ensaio de abrasão na máquina de Böhme): 6,0 cm³/50 cm² ou 1,2 mm de espessura;

Além dessas propriedades, as argamassas autonivelantes também devem apresentar, no estado endurecido, uma superfície pouco porosa, principalmente se o material for aplicado para piso acabado. Isso porque esta superfície estará em contato direto com o meio externo, estando assim susceptível ao ataque de agentes agressivos, seja pela limpeza do piso, ou até mesmo pelas intempéries, mas principalmente por estar sujeito ao desgaste por abrasão devido ao tráfego de equipamentos, ou maquinários, e pessoas. Essa propriedade pode ser obtida facilmente através das adições que permitem o refinamento de poros.

Ainda mais, essas argamassas também não devem apresentar fissuras pelo mesmo motivo de ataque de agentes agressivos. Mas, essas manifestações patológicas são decorrentes de uma série de fatores como as alterações volumétricas do material que provocam o fenômeno da retração. Esse tem sido um dos principais problemas das argamassas autonivelantes aplicadas em pisos principalmente pela relação de área exposta e espessura, como dito anteriormente. Também, como visto no item dos aditivos, o uso do aditivo redutor de retração pode amenizar esse problema, bem como o uso de fibras poliméricas que é o foco deste trabalho.

Apresenta-se na Tabela 2.2 os ensaios e os requisitos de qualidade prescritos pela Federação Europeia para Construções Específicas de Sistemas Químicos e de Concreto que é uma associação nacional que reúne empreiteiros, fabricantes e fornecedores de matéria prima e consultores da indústria da construção civil europeia e de outros países. Essa associação publicou um documento específico para pisos cimentícios autonivelantes modificado por polímeros, de uso industrial e comercial (EFNARC, 2001).

Tabela 2.2 - Requisitos de desempenho da EFNARC (2001) para pisos cimentícios autonivelantes modificados com polímeros.

Classificação conforme uso pretendido	Características de desempenho	Método de ensaio especificado	Requisitos
A	Resistência a compressão	EN 13892-2	≥ 20 MPa
A	Resistência a flexão	EN 13892-2	≥ 5 MPa
A	Resistência a abrasão	EN 13892-4 (BCA)	$\geq 0,2$ mm de desgaste por ano, ou melhor
A	Resistência de arrancamento ao substrato	EN 1542, usando como referência EN 1766 para substratos de concreto (relatar a área de ruptura)	≥ 1.0 MPa
A	Resistência ao impacto	ISO 6272 (quando ligado a uma superfície de concreto de acordo com a EN 13892-1)	≥ 4 Nm
B	Consistência (para misturas bombeadas)	EN 13454-2 ou EN 12706	≥ 220 mm ≥ 130 mm
B	Resistência ao escorregamento (molhado)	EN 13036-4 (Pêndulo de deslizamento)	≥ 40 , quando testado molhado
B	Permeabilidade ao vapor da água	EN 12086	≤ 4 g/(m ² .d)

Classificação para uso pretendido:

A – Requisito obrigatório para todas utilizações previstas – métodos de testes padrão e limites de desempenho são especificados.

B – Exigência especial para situações particulares – métodos de teste padrão é especificado e os limites de desempenho especificados ou o resultado declarado no pedido.

Fonte: Adaptado de EFNARC (2001).

No Brasil ainda há uma lacuna no conhecimento sobre essa nova tecnologia e o fato de não ter suas propriedades normatizadas ainda são os maiores fatores que impedem a disseminação do produto em larga escala. Apesar de já ser empregada em obras fora do país, o entendimento do comportamento mecânico dessas argamassas se faz necessário,

principalmente nos produtos que estão sendo lançados no mercado, já que muitas manifestações patológicas com o material, como problemas de segregação, fissuras, retração e falta de aderência, estão sendo relatadas por empresas usuárias do produto (GOMES & GONÇALVES, 2013).

Nesse sentido, Souza *et. al.* (2013) realizaram a aplicação prática em uma edificação de uma de suas argamassas formuladas. Para efeito de controle dos efeitos possíveis da retração no estado plástico os pesquisadores realizaram a cura úmida do material aplicado.

No entanto, nas primeiras idades já foram identificadas fissuras comprovando a intensidade do processo de retração do material. Esse fenômeno foi primordialmente justificado pelo alto consumo de cimento da formulação. Grandes quantidades de grãos de cimento promovem a aceleração da formação dos hidratos que possuem tamanho menor que os grãos ocasionando na retração total do material e conseqüentemente gerando fissuras devido à incapacidade do mesmo de resistir a esse movimento interno da estrutura.

Além disso, as argamassas autonivelantes, assim como lajes de concreto, possuem uma relação entre espessura e área aplicada do material alta o que potencializa os efeitos de retração pela susceptibilidade de perda rápida de água para o meio externo e para o substrato. E da perda de água, os capilares internos a estrutura também retraem resultando em fissuras.

2.2.3. Fenômeno da retração

É de comum consenso na literatura que ocorrem constantes alterações volumétricas nos compósitos cimentícios após a adição de água, em função do tempo devido à movimentação da água no interior da mistura e das reações de hidratação do cimento. Isto porque à medida que o corpo poroso perde água para o meio externo ou tem sua água consumida pelas reações, ocorre o fenômeno de contração.

O principal indicativo do processo de retração é o aparecimento de fissuras que estão relacionadas a muitos problemas de durabilidade dos materiais, como por exemplo facilitar o ataque de agentes agressivos ao material. A retração sempre vai ocorrer, em maior ou menor escala, podendo ocorrer a fissuração que depende, dentre outros, das dimensões da peça, da resistência do material, do grau de restrição às deformações e principalmente da tendência do material em retrair (NEVILLE,1997). Porém, são muitos e complexos os

fenômenos envolvidos na retração dos materiais cimentícios, por possuírem variáveis de comportamento e fatores dinâmicos (NETO, 2008).

Logo após a aplicação de uma argamassa, a força da gravidade bem como as condições ambientais do local começa a atuar na estrutura do material. De maneira geral, pode-se dizer que a geometria da estrutura, a dosagem do material e as condições climáticas combinadas levam à retração dos materiais cimentícios. Esse processo também é diretamente proporcional ao volume de pasta para diferentes relações água/cimento (a/c) (NEVILLE, 1981; MASSAZA, 1993; BISSONNETTE et al., 1999).

No entanto, existem dois momentos em que isso ocorre, no estado plástico e no estado endurecido. Esses são definidos pela rigidez que por sua vez é efeito de diferentes reações químicas e que muda com tempo. Alguns pesquisadores (HOLT, 2001; HOLT e LEIVO, 2004; ESPING, 2007) separam esses dois estágios em: antes de 24 horas e depois de 24 horas após a mistura.

Hammer (2007) afirma que a mudança de volume nos dois estágios é a combinação das seguintes ocorrências: retração autógena que é resultante da retração química; saída do ar do interior do concreto; exsudação da água da superfície; perda de água por evaporação; deformação do concreto causada pela reabsorção de parte da água exsudada; dilatação térmica devido ao calor de hidratação do cimento.

Por fim, Girotto (2012) apresenta as características que de modo geral levam os materiais cimentícios a retrair:

- geometria da estrutura: em peças como pisos, pavimentos e lajes de concreto a perda de água para o meio externo se dá muito rápida devido à elevada relação entre a superfície exposta e o volume total da peça. Placas cada vez maiores e mais esbeltas ficam cada vez mais suscetíveis ao processo de retração;
- dosagem do material: a granulometria, o tipo e a dimensão máxima do agregado, a relação a/c, a quantidade de água de amassamento e o uso de adições minerais e aditivos químicos podem afetar consideravelmente a retração. Os agregados com maior grau de deformação e uma distribuição granulométrica contínua propiciam a redução do referido processo. Precisa-se utilizar uma quantidade de água de amassamento mínima e também evitar o emprego de agregados com excesso de material pulverulento e argila;

- condições climáticas: a retração é em grande parte regida pela perda de água para o ambiente. Os principais fatores climáticos que tiram água do material cimentício são a alta temperatura, a velocidade do vento incidente e a baixa umidade relativa do ar. Por exemplo, na fase plástica, antes das 24 horas, a secagem rápida no estado fresco provoca a retração quando a taxa de perda de água da superfície, por evaporação, excede a taxa disponível de exsudação. Portanto, como nesse estágio o material possui baixa resistência à tração as fissuras tendem a aparecer.

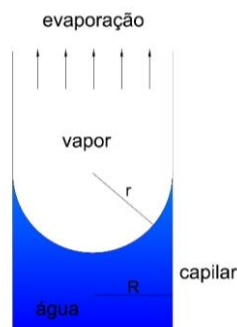
2.2.2.1 – Mecanismos da Retração

Como citado anteriormente, além dos conceitos básicos da estrutura dos materiais cimentícios, é preciso conhecer os mecanismos que regem o processo de retração. Isto posto, Hua et al. (1995) citam os três principais, sendo estes:

- Tensão capilar (Depressão capilar): é a tensão ao qual o líquido no interior de um vazio capilar semi saturado está submetido. Assim, Taylor (1990) esclarece que quando o líquido evapora, as paredes do poro tendem a retrair, como apresentado na Figura 2.4.

Segundo as leis de Kelvin e Laplace (apresentadas nas equações 1 e 2 respectivamente), quanto menor a umidade relativa do ambiente, menor será o raio de curvatura do menisco (r) e, portanto, maior será a pressão entre as fases líquida e gasosa, ou seja, a tensão capilar. Sendo assim, os vasos seriam contraídos para manter o equilíbrio e assim acontece a retração. (Silva, 2009).

Figura 2.4 – Formação do menisco de equilíbrio entre a pressão atmosférica e a tensão superficial da água no tubo capilar de raio R .



Fonte: Adaptado de Freitas (2009).

$$p_c - p_v = \frac{RT}{Mv} \ln(h) \quad (1)$$

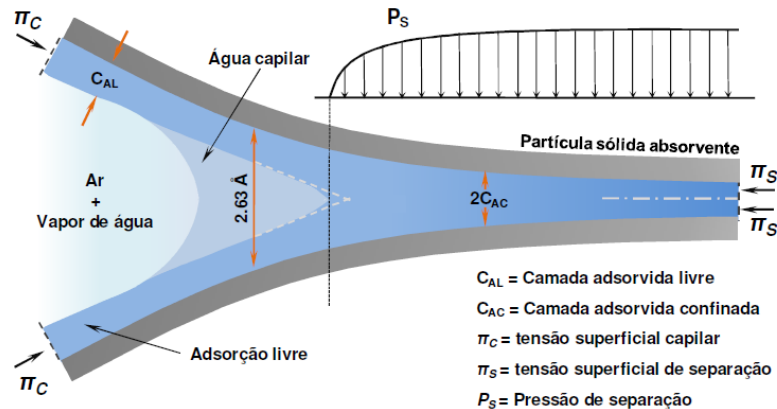
$$p_c - p_v = \frac{\sigma}{\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{R}\right)} \quad (2)$$

Onde:

p_c – pressão da água;	v – volume específico da água;
p_v – pressão do vapor de água;	h – umidade;
R – constante geral dos gases perfeitos;	σ – tensão superficial na interface;
T – temperatura;	r – raio de curvatura do menisco;
M – massa de um mol de água;	R – raio de curvatura do capilar.

- Variação da tensão superficial: é resultado do desequilíbrio de forças superficiais dos materiais, decorrente de cargas não neutralizadas da superfície da peça (MELO NETO, 2002). Os átomos da superfície dos sólidos comprimem a estrutura interna por ainda possuírem ligações incompletas. Esses se reorganizam gerando uma tensão superficial que por sua vez pode ser aliviada pela adsorção da água da superfície do sólido, por exemplo. No entanto, quando da queda da umidade relativa ocorre a dessorção das moléculas de água, surgem as tensões de compressão causando retração.
- Variação da pressão de desligamento: esta ocorre entre duas moléculas sólidas com as lamelas de C-S-H que possuem a água interlamelar adsorvida entre elas. Então, a pressão de desligamento é a pressão repulsiva entre as duas superfícies sólidas, como apresentado na Figura 2.5. Todavia, quando a umidade relativa é baixa, a pressão de desligamento se torna nula provocando uma contração do sistema e resultando também na retração do material.

Figura 2.5 – Representação esquemática da adsorção da água entre as lamelas de C-S-H.



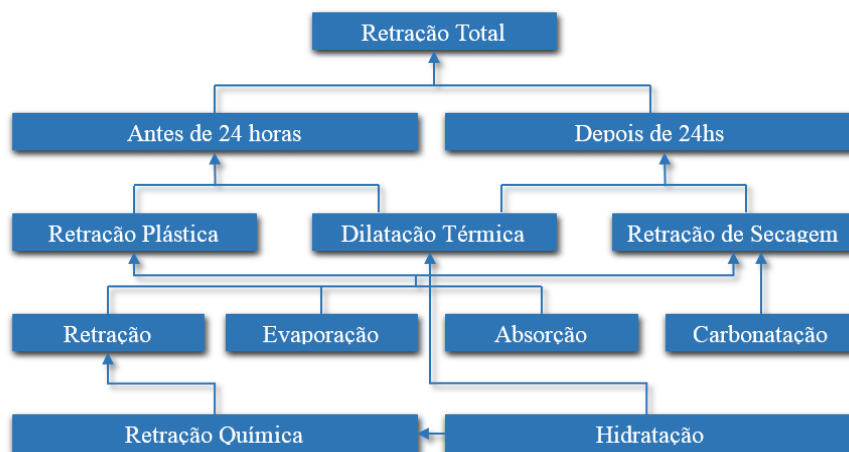
Fonte: Bazant adaptado por Neto (2008)³.

Enfim, pode-se concluir que o processo de retração é regido principalmente pelos movimentos da água nos compostos cimentícios seja no estado fresco ou endurecido. Por sua vez, esses movimentos são controlados essencialmente pela umidade relativa e tem grande relação com as reações de hidratação do cimento.

2.2.2.2 – Tipos de Retração

Os tipos de retração ocorrem no âmbito da estrutura cimentícia e alguns em estágios diferentes (estado fresco e endurecido). Existem cinco principais tipos de retração que ocorrem nos dois estágios sendo eles: plástica, química, autógena, por secagem e de carbonatação. Segundo Esping (2007), o processo de retração total é dado por uma sequência de mecanismos e retrações independentes, como apresentado na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Mecanismo de retração total.



Fonte: adaptado de Esping (2007).

³ BAZANT, Z. P. Thermodynamics of hindered adsorption and its implications for hardened cement past and concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 2, p. 1-16, 1972.

Segundo Mihashi e Leite (2004), para o fenômeno de retração é preciso considerar cada fator de causa separadamente, o que remete aos diferentes tipos de retração. Sendo assim, apresenta-se na equação 3 a retração total (ε_T) durante um tempo (t).

$$\varepsilon_T(t) = \varepsilon_{plástica}(t) + \varepsilon_{química}(t) + \varepsilon_{secagem}(t) + \varepsilon_{térmica}(t) \quad (3)$$

Onde:

$\varepsilon_{plástica}$ – retração plástica;

$\varepsilon_{química}$ – retração química;

$\varepsilon_{secagem}$ – retração por secagem;

$\varepsilon_{térmica}$ – retração térmica.

Nesse sentido, a identificação individual de cada tipo é imprescindível até para que se escolha o melhor método de redução desses processos e suas consequências na durabilidade dos materiais.

A retração química é a redução do volume consequente da reação entre a água e os compostos do cimento, em que o produto de hidratação possui menor volume que o volume dos materiais anidros do composto (CHEN; BROUWERS, 2007). Consequentemente esse evento promove a retração do material.

Esse processo acontece tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, isso porque está ligado a reação de hidratação do cimento que continua acontecendo até que todos os grãos de cimento anidros sejam consumindo, podendo levar anos. De acordo com Hasparyk et al. (2005), no estágio antes das 24 horas não se pode afirmar que há uma retração, pois não há poros, mas o correto é afirmar que há uma diminuição do volume do material que tende a puxar água para adaptar-se à forma que foi aplicado, e sua denominação nesse estágio é contração de Le Chatelier.

Muitos pesquisadores afirmam que a retração química é soma da contração de Le Chatelier e da retração autógena, e que portanto esta é a diminuição do volume aparente e é resultante do efeito de auto-secagem (TAZAWA et al., 1995; HUA et al., 1995; TAZAWA et al., 2000; JENSEN e HANSEN, 2001; HASPARYK et al., 2005; NETO, 2008). A auto-secagem é o próprio consumo da água dos capilares em razão das reações de hidratação, sem perda para o meio externo.

Ao contrário desses pesquisadores, Nawa e Horita (2005) apresentam uma relação entre as retrações química e autógena. Os autores explicam que quando a pasta de cimento está no estado fresco há a variação no volume aparente devido à retração autógena, que

coincide com a diminuição do volume absoluto resultante da retração química. Assim, com o desenvolvimento da hidratação do cimento a estrutura se torna mais rígida permitindo então suportar mais as tensões existentes e a retração autógena não corresponde mais à química. Por fim, há o aumento do volume de ar nos poros capilares.

Finalmente, um indicado método para controle dos processos de retração química e autógena é a incorporação de aditivos químicos, podendo ser feita a combinação de aditivos expansivos e redutores de retração, e a abundância de água externa para hidratação do cimento.

Outro método, seria utilizar a cura interna e para isso podem ser adicionadas fibras de celulose que funcionam como micro tubos capilares controlando as movimentações de água dentro do composto, desacelerando assim as reações de hidratação e reduzindo a retração. Porém, Repette (2005) alerta que a cura para evitar a retração autógena só será eficaz em peças com pequenas espessuras.

A retração plástica ocorre no estado fresco, anteriormente definido como sendo o estágio antes de 24 horas da produção do material. Esta ocorre pela perda da água livre (presente nos macroporos) que é exsudada para superfície após a aplicação do material. Vale lembrar que esta perda também pode ocorrer pela sucção do substrato pela diferença de umidade entre este e o material. Esta sofre influência dos seguintes fatores: temperatura ambiente e do concreto ou argamassa; umidade relativa; e velocidade do vento incidente na superfície (ACI 224, 1998).

Em estudo realizado com concreto auto adensável foi verificado quando a taxa de evaporação é mediana, a retração plástica ocorre durante o tempo de pega, porém quando a taxa de evaporação é alta este processo ocorre antes do início da pega (TURCRY e LOUKILI, 2006). Nesse sentido, pode-se compreender que a retração plástica é mais prejudicial ao material em casos de taxa de evaporação alta, pois no estágio em que ela ocorre o grau de hidratação ainda é pequeno o que significa que a resistência mecânica do mesmo ainda é baixa. Segundo recomendação de Neville (1997), a taxa de evaporação não deve exceder o valor de 1 kg/m² por hora, e que a temperatura da reação de hidratação do material cimentício que deve ser menor que a temperatura ambiente.

Conforme Metha e Monteiro (2008), as fissuras irregulares, profundas e paralelas entre si são características da retração plástica, surgem no período de 30 minutos a 6 horas, e a localização usual é em pisos e lajes.

Assim como visto para as retrações química e autógena, a dosagem do material também influencia na retração plástica. Deste modo, o refinamento dos poros por meio de adições ou aditivos pode acrescer o referido processo pelo mesmo motivo do aumento das tensões capilares. Além disso, a composição do cimento é de extrema importância, pois como já apresentado, a velocidade e também a temperatura de hidratação se controladas podem atenuar a retração.

Por fim, a cura adequada também é um método para controlar esse tipo de retração por proporcionar a blindagem evitando a evaporação da água. Além disso, desde a década de 70, foram desenvolvidas fibras poliméricas para serem adicionadas em baixo teor (média de 0,1%) com o objetivo de conter a retração plástica (BALAGURU e SHAH, 1992). O uso das fibras permite que estas funcionem como ponte de transferência de tensões já que a estrutura cimentícia não está formada o suficiente para comportar as tensões provenientes da retração.

Quanto à retração por carbonatação, geralmente ocorre na superfície dos materiais que estando exposta ao meio externo está sujeita ao ataque do gás carbônico (CO_2). O fenômeno da carbonatação consiste na penetração do gás CO_2 nos poros do material cimentício, diluindo-se com a água presente nos mesmos e formando assim o ácido carbônico (H_2CO_3). Dessa maneira, esse ácido reage com os componentes hidratados da pasta de cimento ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ – hidróxido de cálcio) resultando em água e carbonato de cálcio (CaCO_3).

A referida umidade liberada deve sofrer a difusão no sistema para manter o equilíbrio higroscópico entre os meios externo e interno do material. Portanto, como explica Neville (1982), a retração por carbonatação ocorre pela dissolução dos cristais de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que estavam sob tensão de compressão devido a saída de água, e pela deposição do CaCO_3 nos vazios que não estão sujeitos às tensões.

Essa retração é mais comum aos materiais que ficam expostos diretamente ao meio externo, como argamassas de revestimento. Devido a isso, a espessura do material aplicado é importante, pois se a difusão da água liberada for lenta, caso em que a espessura é maior, a pressão de vapor interior ao composto se eleva até a saturação, e a penetração do CO_2 é praticamente paralisada.

Sobre a retração térmica, por esta estar embutida nos demais tipos de retração que ocorrem durante o tempo de hidratação do cimento. Esse tipo de retração é proveniente da

queda da temperatura quando da diminuição das reações de hidratação e da variação de temperatura externa (MOHAMED e HANSEN, 1996).

Holt (2001) mostra que no primeiro momento em que as reações de hidratação estão em alta, o calor resultante das mesmas provoca uma expansão do sistema, por outro lado, quando do resfriamento ocorre a contração. Essas mudanças volumétricas dependem da variação térmica e do coeficiente de dilatação térmica (αT). Sendo assim Buffo-Lacariere (2007), propõem a equação 3 que determina as variações de deformações (ϵ) em função do tempo sob o efeito da temperatura (T).

$$\epsilon = \alpha T \cdot T \quad (4)$$

Analisando a equação, pode-se perceber quão significativa é a influência da temperatura na variação da deformação. Todavia, Laplante e Boulay (1994) apresentaram resultados experimentais em que o coeficiente de dilatação se estabiliza por volta das 16 horas após a aplicação do concreto.

De forma análoga às demais retrações, e mais ainda mais importante nesse caso, o controle das reações de hidratação são o meio para amenizar a retração térmica.

Enfim, apresenta-se a retração por secagem que assim como na retração plástica, ocorre pela perda de água para o meio externo. No entanto, a retração por secagem ocorre já no segundo estágio (após as 24 horas). Seu mecanismo de ocorrência se dá devido à redução dimensional dos tubos capilares pela variação da tensão capilar, da pressão de desligamento e da variação da tensão superficial com a evaporação da água dos poros do material cimentício para o ambiente externo. De modo geral, as argamassas e concretos auto adensáveis, onde se pode incluir a argamassa autonivelante que é foco da presente pesquisa, são utilizados aditivos superplastificantes e uma grande quantidade de finos para evitar a exsudação. Esse tipo de composição proporciona a formação de poros vazios capilares mais estreitos, propiciando o fenômeno de retração por secagem.

De acordo com Mindess e Young (1981), uma característica dessa retração é que ela possui uma parcela reversível e outra irreversível. A definição destas parcelas e seus limites é importante para definição de qual prática escolher para melhoria da estabilidade dimensional. Essa classificação se dá devido a adoção de um processo de cura com ciclos de molhagem em que grande parte da retração que ocorre antes da primeira molhagem é

irreversível, e uma pequena parte dos poros do material consegue expandir de volta ao seu tamanho original que é a parcela reversível.

Wittmann et al. (2009) avaliaram a influência do teor de álcalis e do teor de cal livre em matrizes cimentícias de argamassas e concretos frente à retração por secagem. Desse modo, comprovaram um aumento direto do fenômeno de retração com o aumento do teor de álcalis. Os autores esclarecem que a tensão superficial do poro não foi alterada, contudo os íons álcalis (Na e K) em solução aquosa, são envolvidos pelos hidratos de cimento, originando um componente de pressão de disjunção. Porém, se a tensão da superfície é modificada significativamente, a retração permanece inalterada. Com relação ao teor de cal, também se observou uma relação direta com a retração por secagem. Através dos resultados obtidos pode-se perceber que com a redução do teor de cálcio, através da adição de pozolanas, ocorre também um decréscimo dos íons adsorvidos na superfície dos hidratos e dos íons de cálcio. Essa redução também promove a pressão de disjunção e, conseqüentemente, reduz a retração.

Kaufmann et al. (2004) puderam comprovar que características como a finura do cimento e a adição de diferentes fíllers reduziram, significativamente, o processo de retração total de pastas cimentícias. Essa pesquisa mostrou que o emprego de cimentos mais finos, conjuntamente à aplicação de condições de cura apropriada, propicia a redução da retração por secagem, e resultando em uma melhora das propriedades mecânicas do material.

Sendo assim, a cura por saturação, a cura química, que cria uma película de proteção e a cobertura da superfície por lonas impermeáveis propiciam a redução da retração por secagem (REPETTE, 2005). A presente pesquisa, visa, portanto, amenizar os efeitos deste tipo de retração com a utilização de fibras sintéticas que permitirão atuar na resistência às tensões internas geradas pela movimentação da água na estrutura. E também com adição microfibras de celulose que poderão conter uma parte de água livre do material diminuindo assim a perda excessiva de água seja por evaporação ou sucção do substrato.

A retração por secagem que assim como na retração plástica, ocorre pela perda de água para o meio externo. No entanto, a retração por secagem ocorre já no segundo estágio (após as 24 horas). Seu mecanismo de ocorrência se dá devido à redução dimensional dos tubos capilares pela variação da tensão capilar, da pressão de desligamento e da variação da tensão superficial com a evaporação da água dos poros do material cimentício para o ambiente externo. De modo geral, as argamassas e concretos auto adensáveis, onde se pode incluir a argamassa autonivelante que é foco da presente pesquisa, são utilizados aditivos

superplastificantes e uma grande quantidade de finos para evitar a exsudação. Esse tipo de composição proporciona a formação de poros vazios capilares mais estreitos, propiciando o fenômeno de retração por secagem.

A presente pesquisa visa, portanto, amenizar os efeitos deste tipo de retração com a utilização de fibras sintéticas que permitirão atuar nas resistências às tensões internas geradas pela movimentação da água na estrutura. E também com adição de microfibras de celulose que poderão conter uma parte de água livre do material diminuindo assim a perda excessiva de água, seja por evaporação ou sucção do substrato. Ainda mais, propõe-se formulações com substituição parcial do cimento com intuito de reduzir os efeitos da hidratação do mesmo no mecanismo de retração.

2.3. ESTRUTURA CIMENTÍCIA REFORÇADA COM FIBRAS

O reforço de argamassas e concretos de cimento Portland com fibras é um meio eficiente para reduzir a fragilidade na ruptura destes materiais, aumentar a durabilidade e conferir propriedades mecânicas não encontradas nas argamassas e concretos convencionais, relacionadas à capacidade de deformação e absorção (URIBE, 2010).

A utilização desse reforço em materiais cimentícios iniciou-se no início da década de 60. À princípio só eram utilizadas fibras de aço para execução de pavimentos e pisos industriais, e o avanço para época era o aumento da ductilidade das fraturas normais aos processos de endurecimento e secagem do concreto. No entanto, os maiores problemas eram a dificuldade de mistura e com a trabalhabilidade, pois quando adicionadas as fibras ao concreto estas não se dispersavam e, pelo contrário, formavam “novelos” dentro do composto, fenômeno observado principalmente para fibras mais longas (BALAGURU e SHAH, 1992).

Já na década de 70, implantou-se a utilização de fibras poliméricas em baixo teor (média de 0,1% da massa de cimento) com o objetivo de controlar a retração plástica que ocorre geralmente nas três primeiras horas após a produção do material. Assim, desenvolveu-se a utilização das fibras de polipropileno, de poliéster e de celulose (BALAGURU e SHAH, 1992).

Alguns pesquisadores como Ahmed e Mihashi (2011) e Silva (2006) comprovaram que o uso de fibras em argamassas pode beneficiar o comportamento pós-fissuração do composto. Segundo Wang et al. (2009), a argamassa reforçada com fibras é um composto

estrutural em escala microscópica. Suas características dependem da matriz do material, agregado, fibra e da zona de interface entres estes dois.

No entanto, vale ressaltar que adição de fibras também pode promover resultados indesejados, como já citada a formação de novelos devido as forças de atrações por atrito entre os filamentos. Para mais, a incorporação destas favorece a incorporação de ar no composto o que resultará na redução da resistência à tração do material e ainda, ao contrário do que se espera, essa incorporação de ar em demasia aumentando a porosidade interna do material pode contribuir com o fenômeno da retração. Dessa forma, a definição do teor de adição e tipo da fibra deve ser bem criteriosa.

Lima *et al.* (2010) verificaram esse desempenho negativo com emprego de fibras de polipropileno variando o teor de 0 a 900 g/m³ de concreto para pisos. Nessa pesquisa, demonstrou-se que mesmo com teores diversos de adição de fibras os fenômenos de retração de secagem livre e restringida não foram contidos ainda mais que todas as formulações pesquisadas, com e sem fibras, apresentaram fissuras de similar dimensão.

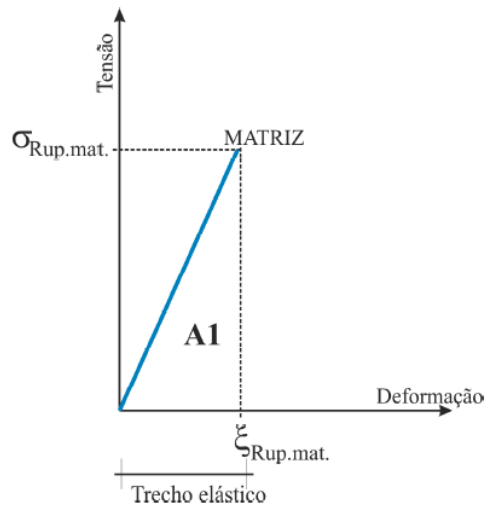
Sendo assim, a compreensão do mecanismo de ação de cada tipo fibra, frente aos componentes da formulação das argamassas e concretos é imprescindível.

2.3.1. Mecanismo de ação

As fibras adicionadas à matriz de cimento funcionam como ponte de transferência de tensões contribuindo para o aumento das capacidades resistente e de deformação, e aumento da tenacidade do compósito. Desse modo, a argamassa que apresentava fissuras frágeis devido à rigidez (fissuras geralmente repentinas), pode apresentar fissuras com maior ductilidade, ou seja, as fibras podem controlar o processo de fissuração do material, reduzindo o surgimento de microfissuras e aumentando de certa forma a microfissuração.

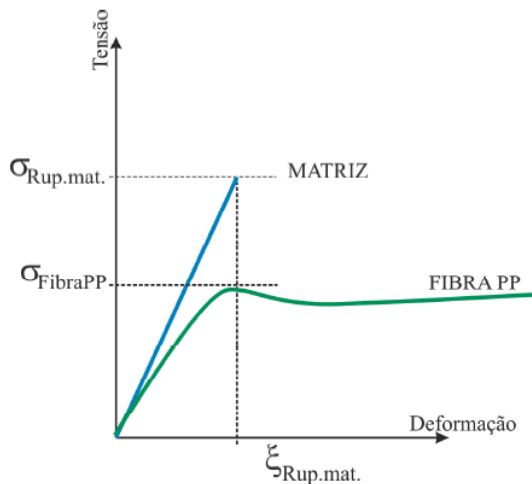
Na Figura 2.7 apresenta-se o comportamento da ruptura da matriz, que pela característica da reta no gráfico Tensão x Deformação é frágil. Na Figura 2.8, porém, apresenta-se o comportamento de um compósito com fibras de polipropileno em que além do trecho elástico característico da matriz, também apresenta um trecho plástico, fazendo assim que o material seja “pseudo-dúctil” (FIGUEIREDO, 2000).

Figura 2.7 – Gráfico Tensão x Deformação de uma matriz cimentícia.



Fonte: Adaptado de Figueiredo (2000).

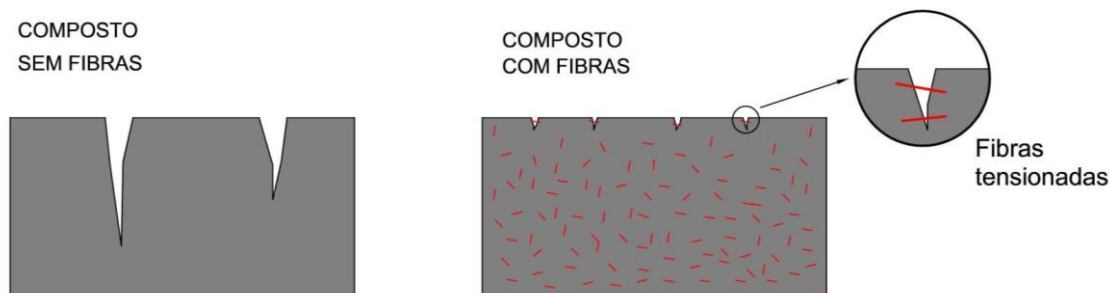
Figura 2.8 – Gráfico Tensão x Deformação de uma matriz cimentícia reforçada com fibras de polipropileno.



Fonte: Adaptado de Figueiredo (2000).

Vale ressaltar que a adição de fibras não tem por objetivo extinguir a fissuração dos compósitos cimentícios. Sua real função é conter a propagação das fissuras e controlar a abertura das mesmas decorrentes dos diversos tipos de retração, como representado na Figura 2.9. Assim, as fibras exercem sua função após a fissuração do compósito contendo a abertura das fissuras provocadas pelos esforços de tração nos locais fissurados.

Figura 2.9 – Esquema representativo da ação das fibras nos compósitos cimentícios.



Fonte: O autor.

2.3.2. O efeito das fibras sintéticas

Para o caso de fibras sintéticas como a de polipropileno (PP) e de acetato de polivinila (PVA), fibras adotadas para a realização da presente pesquisa, devido às suas dimensões são consideradas microfibras e, portanto, são utilizadas no intuito de controlar a fissuração do material decorrente dos processos de retração ao qual os materiais cimentícios estão sujeitos (AGOPYAN, 1988). Além disso, devido a esses benefícios, principalmente para as camadas superficiais da argamassa aplicada, obtém-se também o aumento da resistência à permeabilidade o que evita a penetração de agentes agressivos e que por sua vez aumenta a durabilidade do material.

Apesar de suas possíveis contribuições para as argamassas, se faz necessária a definição dos teores de adição destas fibras, pois, como já citado, a má dispersão decorrente da adoção do teor incorreto de adição das fibras, provoca o “embolamento” das mesmas dentro do composto. Estas quando mal dispersas também deixam partes do material desprovidas de proteção.

Pesquisas como de Oliveira (2001), Silva (2006) e Costa et al. (2006), entre outras, atestaram que a utilização das fibras de PP e PVA traz benefícios para as argamassas. Concluíram que a citada adição promove a retenção de água dos compósitos, influenciam de maneira favorável na forma de ruptura do material, bem como também alteram o comportamento reológico das argamassas, pois, por exemplo, modificam o teor de ar incorporado que conseqüentemente altera a propriedade mecânica.

A difícil dispersão das fibras é decorrente da estrutura química das fibras sintéticas por também serem hidrofóbicas em relação à matriz de cimento, o que leva à redução da adesão do cimento na superfície das mesmas (BENTUR e MINDESS, 1990). Assim sendo, é de suma importância um traço em que o teor de fibras seja bem definido.

Segundo Balaguru *apud* Campello (2013)⁴, após desenvolvido um extenso programa de ensaios com diversos tipos de fibras sintéticas, concluiu-se que:

- possuem comprimento entre 6 a 14 mm;
- a adição mesmo em teores baixos como 0,45 kg/m³ promove alguma redução na quantidade de fissuras;
- reduções mais acentuadas são conseguidas com dosagens entre 0,45 kg/m³ e 0,90 kg/m³;
- para fibras longas, aquelas que apresentam menor módulo de elasticidade são as que propiciam melhor desempenho;
- para dosagens de 0,90 kg/m³, praticamente não se observa fissuras de retração plástica;
- fibras longas apresentam melhor desempenho em argamassas com baixo teor de cimento, enquanto que as microfibras apresentam melhores resultados nas misturas com alto teor de cimento;
- com as fibras sintéticas, não ocorre apenas a redução da quantidade de fissuras, mas também a abertura delas é menor.

Além disso, a concentração volumétrica, orientação, distribuição e as características das fibras sintéticas, como área específica, formato, densidade e rugosidade da superfície, são fatores que favorecem a resistência ao escoamento do fluido. Por isso, estas podem dificultar o manuseio e aplicação do material, o que não deve ocorrer para o contexto das argamassas autonivelantes.

2.3.2.1. Fibras de PP

O polipropileno é um polímero termoplástico, derivado do monômero propileno (C₃H₆) obtido pelo craqueamento do petróleo, através da síntese de elementos orgânicos. Esse polímero possui cadeias longas de alto peso molecular e desenvolvimento helicoidal (TANESI e AGOPYAN, 1997). Sendo assim, as fibras de polipropileno apresentam como característica grande flexibilidade e tenacidade.

⁴ BALAGURU, P. Contribution of fibers to crack reduction of cement composites during the initial and final setting period. *ACI Materials Journal*, v. 91, n. 3, p. 280 – 288, 1994.

Essas fibras são produzidas quando do polímero na forma cristalina, por um arranjo atômico regular da macromolécula, onde passa por um processo de extrusão estirada o qual gera a orientação em paralelo das cadeias de moléculas, aumentando sua resistência longitudinal (BENTUR e MINDESS, 1990).

Na literatura são apresentadas as seguintes características das fibras de polipropileno (BENTUR e MINDES, 1990; HOLLAWAY, 1994; SARVARANTA e MIKKOLA, 1994):

- massa específica baixa, comparadas às fibras de aço, carbono, e amianto, da ordem de 0,91 a 0,97 g/cm³;
- alto ponto de fusão (165 °c), podendo ser utilizadas em temperaturas acima de 100 °c por curtos períodos, para que não haja o encolhimento;
- quimicamente inertes em ambientes alcalinos;
- módulo de elasticidade baixo, comparadas às demais fibras, da ordem de 4 a 15 GPa;
- resistência à tração também considerado baixo, entre 300 e 500 MPa;
- alongamento na ruptura de 10%;
- material hidrofóbico;
- material não magnético e não condutor elétrico.

Sendo assim, as fibras de PP (Figura 2.10) apresentam características que possibilitam sua contribuição no controle de fissuração inerente à retração, por proporcionar maior flexibilidade do composto.

Figura 2.10 – Exemplo do aspecto visual das fibras de polipropileno.



Fonte: Neomatex (2015).

2.3.2.2. Fibras de PVA

O poli acetato de vinila (PVA) é um polímero amorfo e termoplástico proveniente do processo de polimerização do monômero acetato de vinila ($C_4H_6O_2$). Suas principais características, encontradas na literatura, são (ZHENG e FELDMAN, 1995; KURALON, 2015; JUAREZ *et al.*; 2015):

- massa específica da ordem de $1,3 \text{ g/cm}^3$, considerada baixa;
- quimicamente inertes em ambientes alcalinos;
- módulo de elasticidade entre 25 e 41 GPa;
- resistência à tração alta, de 880 a 1600 MPa;
- alongamento na ruptura de 10%;
- material hidrofóbico;
- o material possui muita afinidade química com o hidróxido de cálcio da matriz cimentícia melhorando assim a adsorção dos mesmos.

Sendo assim, pode-se perceber que as características das fibras de PVA (Figura 2.11) são muito similares as das fibras de PP, pela própria natureza sintética das mesmas, o que também possibilita o emprego destas em matrizes cimentícias para controle da retração.

Figura 2.11 – Aspecto visual das fibras de PVA.



Fonte: Joywell (2015).

2.3.3. O efeito das fibras naturais

Além das citadas fibras, o uso de fibras de celulose, que são consideradas como fibras naturais, também é indicado para argamassas autonivelantes, e por isso também foi aplicado neste trabalho. As fibras de celulose também têm um comportamento hidrofóbico que é vantajoso por tornar desnecessário o ajuste da quantidade de água.

Além disso, por ser um material proveniente de vegetais, essa fibra é resistente ao meio alcalino e possui uma melhor aderência entre sua superfície e a matriz cimentícia. Por fim, essa fibra funciona como um tubo capilar que permite distribuir melhor a água livre dentro do composto, armazenar parte da água não utilizada na hidratação do cimento para quando a umidade relativa estiver baixa a liberar e assim prevenir o fenômeno da retração (RETTENMAIER e SÖHNE, 2012)

2.3.3.1. Fibras de celulose

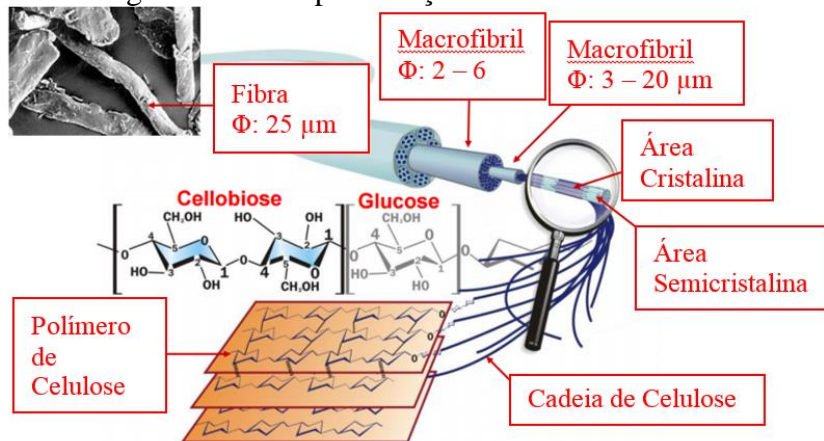
A fibra de celulose é considerada uma matéria-prima renovável com grande disponibilidade no mercado. As principais fontes dessas fibras são derivados da polpação da madeira como o pinus e o eucalipto, e comumente apresentam comprimento de 8 μm . E assim como as fibras sintéticas, esse tipo de fibras desempenham papel importante nos compósitos (NITA, 2006).

Suas características principais são (BENTUR e MINDES, 1990):

- massa específica de 0,5 a 1,5 g/cm^3 , valor mais baixo que das fibras sintéticas;
- módulo de elasticidade entre 10 e 40 GPa;
- resistência à tração entre 125 e 500 MPa.

Vale ressaltar que as fibras de celulose podem atuar no controle da fissuração de maneira análoga às fibras sintéticas, mas ainda podem ser utilizadas para realizar a cura interna dos compósitos. Isto porque essas fibras são como os tubos capilares, como apresentado na Figura 2.12 que pela pressão capilar tender a reter a água livre do composto.

Figura 2.12 – Representação da fibra de celulose.



Fonte: Adaptado de Rettenmaier e Söhne (2012).

Além disso, há uma indicação na literatura de que as fibras de celulose são propícias para uso em compostos autonivelantes por permitirem uma melhor distribuição da água de amassamento sem prejudicar a fluidez do material e por promover o controle das movimentações da água dentro do composto reduzindo o fenômeno da retração (RETTENMAIER e SÖHNE, 2012).

Nesse sentido, pode-se inferir que as fibras de celulose também podem conter o processo de retração total do composto através da retenção da água que diminuirá os movimentos prejudiciais da água da mistura (KAWASHIMA e SHAH, 2011; JONGVISUTTISUN *et al.*, 2013). Ainda mais, essas fibras promovem a cura interna do material controlando a hidratação do cimento e reduzindo também os efeitos de retração causada pela mesma. Ou seja, é possível controlar mais de uma das parcelas da retração total, a retração plástica, química e de secagem.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Esse trabalho visa dar prosseguimento aos estudos de Martins (2009) que desenvolveu um procedimento para obtenção de pasta para argamassa autonivelante, e de Souza *et al.* (2013) que a partir do primeiro estudo desenvolveram algumas formulações de argamassa autonivelante, mas identificaram através da aplicação prática do material em obra, a ocorrência do fenômeno de retração pelo surgimento de fissuras superficiais no estado endurecido do piso aplicado em uma edificação (Figura 3.1). De forma a dar continuidade ao avanço do conhecimento em argamassas autonivelantes e à busca da qualidade, nesta pesquisa foi escolhida a formulação de Souza *et al.* (2013) que apresentou o melhor desempenho no estado fresco, de acordo com a metodologia proposta por Souza *et al.* (2013), 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.

No entanto, o emprego de novos materiais em relação às formulações originais exigiu estudos e adequações de dosagens de forma a se garantir a fluidez desejada.

Figura 3.1 – Fissuras no piso endurecido decorrentes do fenômeno de retração.



Fonte: Souza *et al.* (2013).

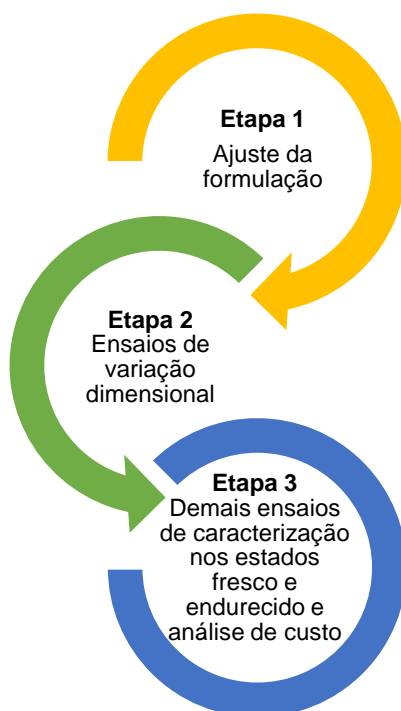
Sendo assim, a primeira etapa deste trabalho consistiu no ajuste de dosagens que possibilitaram o entendimento da influência dos diversos insumos no desempenho a fresco das misturas de argamassa autonivelante, principalmente quanto à influência dos aditivos.

Devido à adição de fibras para algumas das formulações e substituição do cimento por cinza volante para outras, também foi necessário ajustar a quantidade de aditivos para manter uma fluidez mínima determinada da argamassa, tendo em vista a importância de se garantir que as argamassas formuladas mantivessem suas propriedades de auto nivelamento. No que se refere à fluidez, adotou-se como base o diâmetro médio de abertura obtido através do ensaio do cone de Kantro (KANTRO, 1980), maior que 130 mm, seguindo a indicação dos estudos de Nakakura e Bucher (1997) e Souza *et al.* (2013).

Na sequência foi realizado o ensaio de variação dimensional para avaliação da contribuição da adição de fibras na retração por secagem. Outras caracterizações nos estados fresco e endurecido foram desenvolvidas com o objetivo de se analisar a aplicabilidade das argamassas autonivelantes formuladas, seguindo requisitos de qualidade específicos a esse tipo de argamassa, com base na revisão bibliográfica realizada. Por fim, nesta última etapa da pesquisa foi realizada a análise de custos para avaliar o potencial econômico da referida formulação para o mercado da construção civil.

Sendo assim, está demonstrado na Figura 3.2 um fluxograma que detalha as principais etapas de desenvolvimento do programa experimental. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Tecnologia de Argamassas (LATECA) do Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME) da UFPR.

Figura 3.2 – Fluxograma das etapas de ensaio.

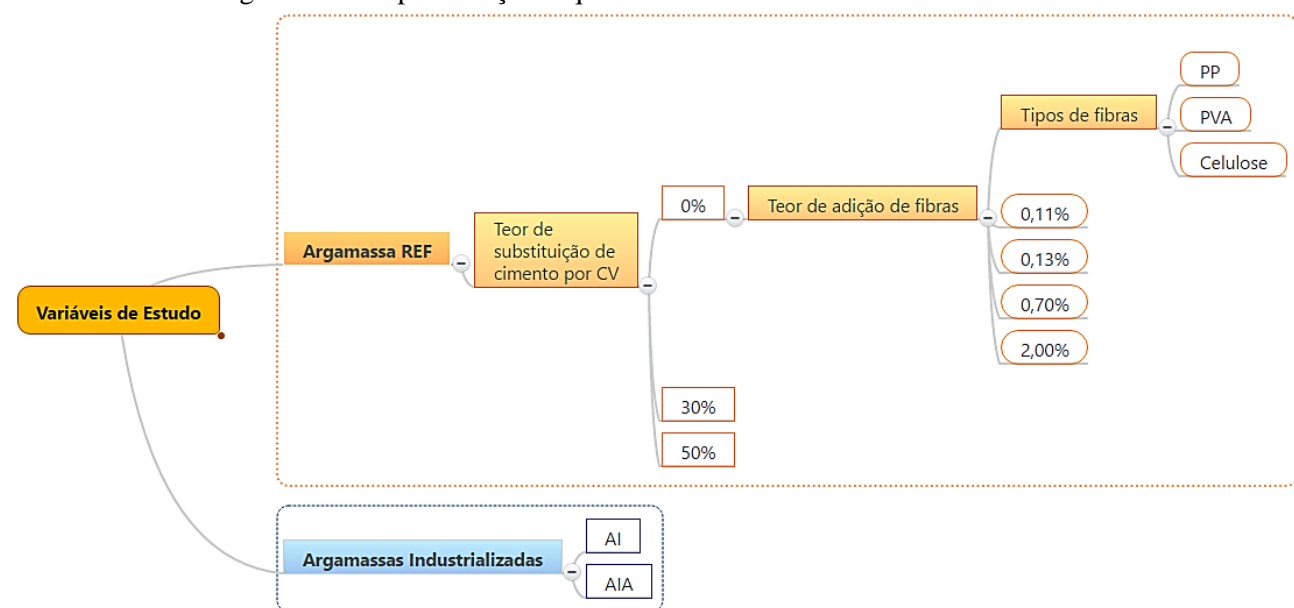


3.1. VARIÁVEIS DE ESTUDO

As principais variáveis deste estudo são as formulações da argamassa autonivelante, os diferentes teores de adição de fibras e de substituição parcial do cimento por cinza volante. Sendo o desenvolvimento da formulação da argamassa autonivelante a unidade de análise deste trabalho, têm-se como variáveis independentes (Figura 3.3):

- formulações: argamassa de referência (REF) sem fibras; argamassa REF com substituição do cimento por cinza volante em diferentes teores; argamassas REF com adição das fibras em diferentes teores; e argamassas industrializada de contrapiso (AI) e de piso de alta resistência (AIA);
- tipos de fibras: polipropileno (PP), acetato de polivinila (PVA) e de celulose;
- teores de adição das fibras em relação a massa de cimento;
- teores de substituição de cimento por cinza volante.

Figura 3.3 – Representação esquemática das variáveis de estudo.



Fonte: o autor.

Os ensaios foram realizados com base em normas nacionais, internacionais e em procedimentos descritos na literatura. Após a coleta dos resultados ocorreu a supressão dos valores espúrios (que se distanciaram da média em uma vez o desvio-padrão). Em seguida, foi utilizada a tabela ANOVA para tratamento estatístico dos dados objetivando avaliar se o

desvio padrão da amostra em estudo ocorreu devido erros acidentais ou pela alteração dos parâmetros do processo. A análise estatística também permitiu comparar se os parâmetros ensaiados são significativamente iguais ou não.

3.2. MATERIAIS

Neste item serão descritos os materiais utilizados no programa experimental.

3.2.1. Cimento

O cimento escolhido para realização desta pesquisa foi o CPV ARI, que possui característica de alta resistência inicial. A escolha foi pautada na finura desse tipo de cimento em relação aos demais tipos, pois quanto maior a superfície específica dos grãos, menor é a tensão de escoamento e maior a viscosidade da mistura, propriedade essa que é relevante para as argamassas autonivelantes. A escolha desse tipo de cimento também se deu pela rapidez de endurecimento que ele pode conferir ao material, o que se relaciona com a liberação em pouco tempo do piso para trânsito de pessoas e máquinas.

Apresenta-se na Tabela 3.1 composição química do cimento utilizado e na Tabela 3.2 suas características físicas, segundo dados fornecidos pelo fabricante. Na Tabela 3.3 apresenta-se a área específica BET do cimento segundo dado fornecido pelo Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB).

Tabela 3.1 - Características químicas do CPV ARI

Amostra	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Perda ao fogo (%)	CaO livre (%)	Resíduo insolúvel (%)	Equivalente alcalino (%)	Teor de C ₃ A ⁽¹⁾
CPV ARI	4,33	18,66	2,63	60,64	4,83	2,85	2,89	0,92	0,66	0,61	7,0%

(1) Cálculo do teor de C₃A (item 5.1.3 - NBR 5737/1992): $(C_3A) = 2,65 \cdot (Al_2O_3) - 1,692 \cdot (Fe_2O_3)$

Fonte: Fabricante (2014).

Tabela 3.2 - Características físicas do CPV ARI

Cimento	Massa específica (g/cm ³)	Tempo de pega		Blaine (m ² /g)	Resistência à compressão (MPa)				Observação
		Início	Fim		1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	
CP V-ARI	3,12	02h47	03h23	0,406	22,0	37,9	43,3	51,6	Adição de até 5% de filler calcário

Fonte: Fabricante (2014).

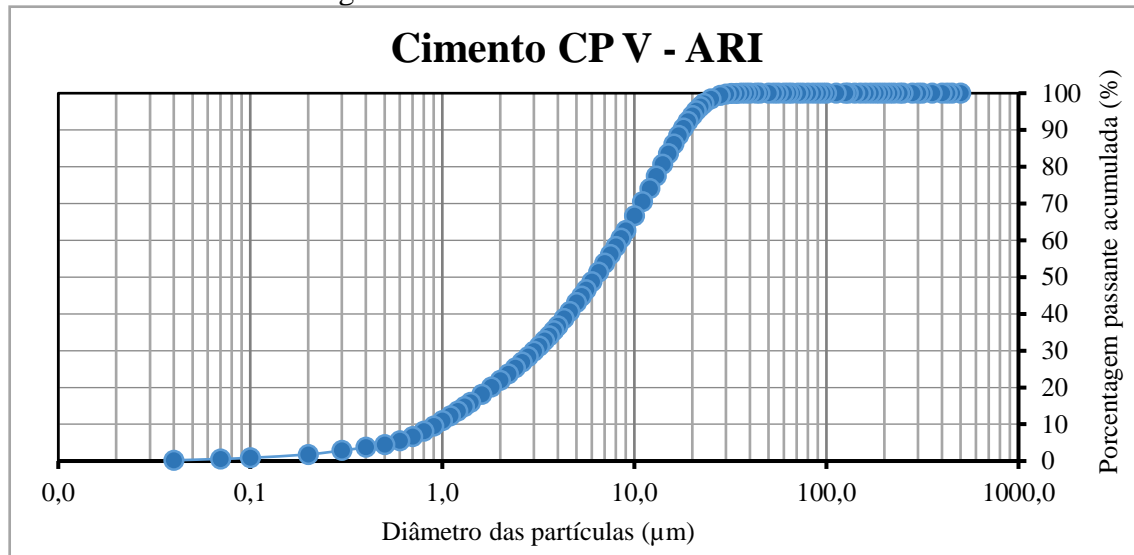
Tabela 3.3 - Área específica do CPV ARI

CPV ARI	Resultado
Área específica BET (m ² /kg)	1.070

Fonte: UFOB (2015).

O cimento também foi caracterizado quanto a sua granulometria através do ensaio de granulometria a laser. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Minerais e Rochas (LAMIR), situado na Universidade Federal do Paraná (UFPR), através do equipamento CILAS 1064. Portanto, apresenta-se na Figura 3.4 a curva granulométrica do material.

Figura 3.4 – Granulometria do CPV ARI.



Fonte: LAMIR (2014).

3.2.2. Cinza Volante

Com o objetivo de reduzir o consumo de cimento e consequentemente os efeitos de retração da argamassa autonivelante, esta pesquisa propôs o emprego de partículas de cinza volante. Ademais, este material pode promover a viscosidade da argamassa. Esse material foi fornecido pela empresa catarinense Pozofly. A composição química da cinza volante está apresentada na Tabela 3.4 e suas características físicas e atividade pozolânica estão apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.4 - Características químicas da cinza volante.

Adição mineral	Composição Química (%)								
	SiO ₂	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	SO ₃	MgO
Cinza volante	57,8	3	6,2	1,6	26,3	0,1	1,3	0,3	0,8

Fonte: UFOB (2015).

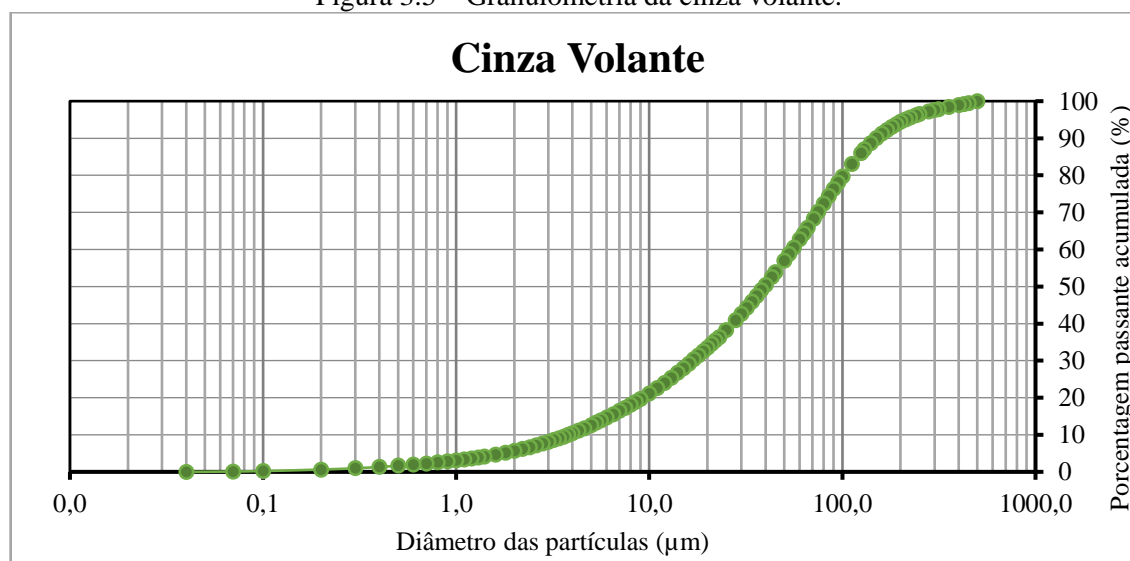
Tabela 3.5 - Características físicas e resultado do Chapelle modificado da cinza volante.

Adições minerais	Massa específica (g/cm ³)	Chapelle modificado NBR 15895 (mg Ca(OH) ₂ /g amostra)
Cinza volante	2,20	408

Fonte: UFOB (2015).

O ensaio de granulometria a laser também foi realizado para a cinza volante, no LAMIR e com o mesmo equipamento utilizado para caracterização do cimento. Apresenta-se na Figura 3.5 a granulometria da cinza volante.

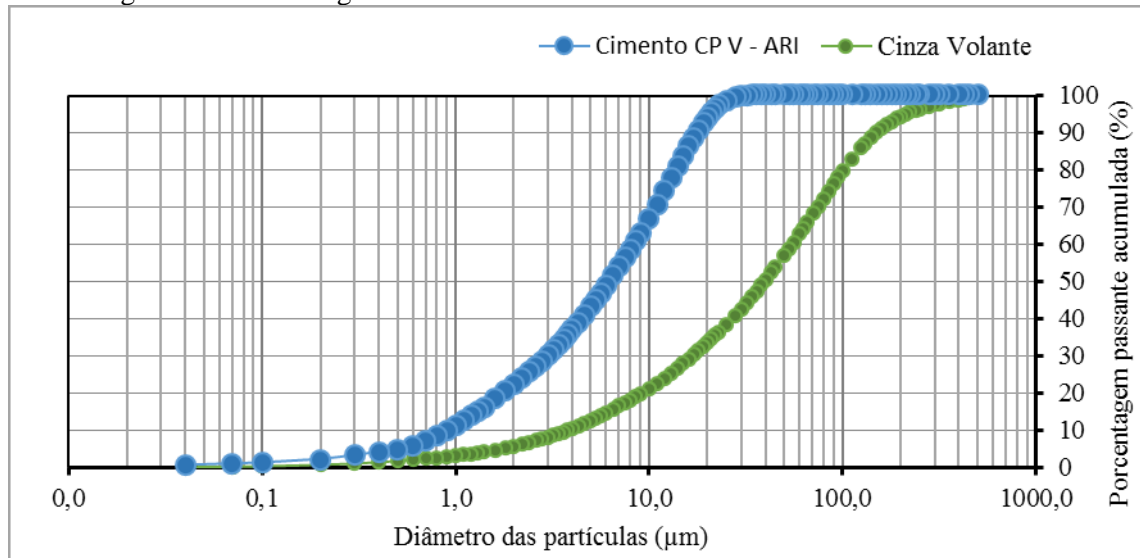
Figura 3.5 – Granulometria da cinza volante.



Fonte: LAMIR (2014).

Em relação à curva granulométrica da cinza volante ressalta-se que esse material é mais grosso que o cimento utilizado nesta pesquisa (Figura 3.6). Nota-se que a curva granulométrica do cimento apresenta grãos de dimensões entre 0,1 e 20 µm, enquanto que a cinza volante apresenta grãos de dimensões entre 0,1 e 100 µm. Isso não era de se esperar de uma adição mineral, mas que ainda assim pode contribuir para melhoria da granulometria dos materiais anidros que compõem a argamassa.

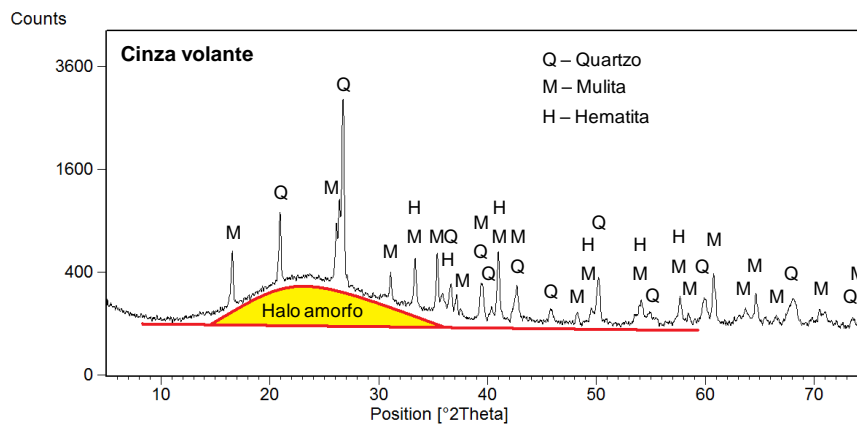
Figura 3.6 – Curvas granulométricas do Cimento CP V – ARI e da Cinza Volante.



Fonte: o autor.

Além disso, também foi realizado o ensaio de DRX na Universidade Federal do Oeste da Bahia (Figura 3.7) a fim de identificar os compostos cristalinos que compõem a cinza volante (Tabela 3.6).

Figura 3.7 – Difratoograma da amostra de cinza volante.



Fonte: UFOB (2015).

Tabela 3.6 - Minerais encontrados na amostra de cinza volante

Código de Referência	Nome do Composto	Fórmula Química	Mineral
46-1045	Dióxido de silício	SiO ₂	Quartzo
15-0776	Sílico aluminato	Al ₆ Si ₂ O ₁₃	Mulita
01-1053	Óxido de ferro	Fe ₂ O ₃	Hematita

Fonte: UFOB (2015).

3.2.3. Agregado miúdo

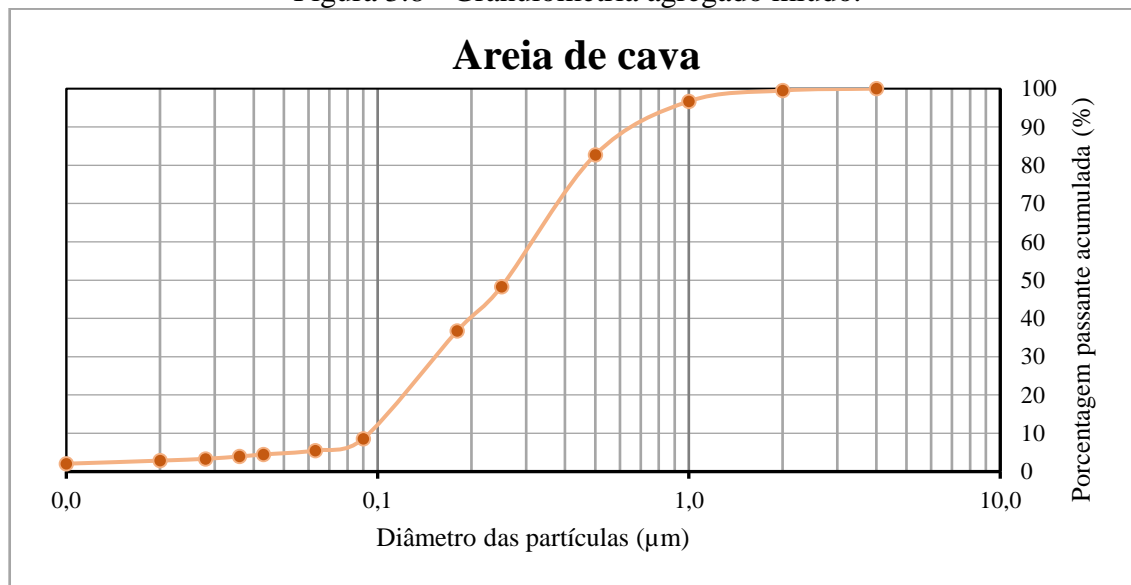
Como agregado miúdo empregado foi utilizada areia natural de cava com as características expostas na Tabela 3.7 e granulometria apresentada na Figura 3.8. O ensaio de granulometria do agregado miúdo também foi realizado no LAMIR, e os demais no LATECA.

Tabela 3.7 - Características da areia natural

Areia natural	Resultado
Massa específica sss (g/cm ³)	2,63
Massa unitária (g/cm ³)	1,54
Módulo de Finura	2,4
D.M.C. (mm)	1,00

Fonte: o autor (2016).

Figura 3.8 - Granulometria agregado miúdo.



Fonte: LAMIR (2014).

3.2.4. Aditivos

Os aditivos utilizados foram o superplastificante (SP) e o promotor de viscosidade (VMA). O aditivo SP é o Powerflow 4000, da MC Bauchemie. É um aditivo com coloração marrom escuro e composição básica de solução de policarboxilato em meio aquoso. Na Tabela 3.8 apresentam-se os dados técnicos fornecidos pelo fabricante.

Tabela 3.8 - Dados técnicos do aditivo SP Powerflow 4000.

Características	Unidade	Valor	Observações
Densidade	g/cm ³	1,09	-
Dosagem	%	0,2 a 5,0	Sobre o peso do cimento
Teor de Cloretos	%	< 0,1	Sobre o peso
Teor de Álcalis	%	< 1,0	Sobre o peso

Fonte: Fabricante (2015).

O aditivo VMA utilizado foi o Centrament Stabi 520, também da MC Bauchemie. Este aditivo é um líquido viscoso translúcido e o fabricante apenas informou que é um estabilizador orgânico, sem especificar exatamente qual a composição química. Na Tabela 3.9 apresenta-se os dados técnicos deste aditivo.

Tabela 3.9 - Dados técnicos aditivo VMA Centrament Stabi 520.

Características	Unidade	Valor	Observações
Densidade	g/cm ³	1,00	-
Dosagem	%	0,02 a 0,5	Sobre o peso do cimento
Teor de Cloretos	%	< 0,1	Sobre o peso
Teor de Álcalis	%	< 1,0	Sobre o peso

Fonte: Fabricante (2015).

3.2.5. Fibras

Como citado anteriormente, a fim de avaliar o emprego das fibras no desempenho das argamassas autonivelantes, foram escolhidos três tipos de fibras, sendo dois sintéticos e um natural: polipropileno, acetato de polivinila e celulose, respectivamente. As principais informações das fibras estão contidas na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 - Dados técnicos das fibras.

Tipo	Cód.	ϕ	Comp.	Alongamento da Rup.	Densidade	Ponto de Fusão	Resist. à tração	Mód. de elast.	Nacionalidade	Empresa
Polipropileno	PP	12 μ m	8 mm	25%	0,091 g/cm ³	160 °C	450 MPa	4 GPa	Brasileira	Neomatex
Acetato de Polivinila	PVA	14 μ m	12 mm	7,0 \pm 5%	-	-	1092 GPa	22,6 GPa	Chinesa	Joywell
Celulose	C	20 μ m	200 μ m	-	0,105 a 0,160 g/cm ³	-	-	-	Alemã	J. Rettemeier

(-) Não consta nas informações do fabricante.

Fonte: Fabricantes (2015).

3.2.6. Água de amassamento

Para a produção das argamassas utilizou-se água potável proveniente da rede de abastecimento da Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR).

3.2.7. Argamassas industrializadas

Para efeito de comparação de desempenho no estado fresco e de custos foram utilizadas duas argamassas industrializadas sendo essas o “Contrapiso autonivelante” (AI) da empresa Quartzolit e a “P600 A Cime” (AIA) da empresa Polipiso, respectivamente.

A AI possui composição básica de cimento, polímeros, agregados minerais e aditivos especiais. E a AIA possui como composição básica cimento, areia quartzosa, aditivo químico, carga reativa e fibras. Apresenta-se as características físicas dessa argamassa (Tabela 3.11 e Tabela 3.12).

Tabela 3.11 – Características físicas da AI.

Características Físicas	Contrapiso Autonivelante
Resistência à compressão (28 dias)	≥ 8 Mpa
Resistência de aderência (28 dias)	> 1 MPa
Densidade aparente	1,7 kg/l

Fonte: o Fabricante (2015).

Tabela 3.12 – Características físicas da AIA.

Características Físicas	P600 A Cime
Resistência à compressão (28 dias)	60 ± 5 Mpa
Resistência à tração por compressão diametral (28 dias)	> 4 MPa
Desgaste à abrasão	0,7 mm
Coefficiente de atrito dinâmico (sup. seca)	0,6
Coefficiente de atrito dinâmico (sup. molhada)	0,5
Permeabilidade	4 mm

Fonte: o Fabricante (2016).

3.3. MÉTODOS

Os ensaios realizados estão apresentados na Tabela 3.13. No entanto, a pesquisa foi dividida em três etapas visando organizar o programa experimental. Primeiramente foi preciso fazer o ajuste da formulação em função da mudança dos insumos usados por Souza *et al.* (2013), pesquisa a qual foi adotada a formulação avaliada com melhor desempenho. Ademais, foi realizado o estudo da retração das argamassas formuladas e a caracterização física das mesmas em estado fresco e endurecido, além da aplicabilidade econômica da argamassa em obra.

Tabela 3.13 - Caracterização das argamassas autonivelantes formuladas nesta pesquisa.

ESTADO FRESCO		ESTADO ENDURECIDO	
Ensaio	Normas	Ensaio	Normas
Densidade de massa e teor de ar incorporado	NBR 13278 (2005)	Varição dimensional*	NBR 15261 (2005)
Consistência – Cone de Kantro	Kantro (1980)	Resistência à compressão	NBR 13279 (2005)
Tempo de Retenção de Fluxo	ASTM C 1708 (2012)	Resistência à tração na flexão	NBR 13279 (2005)

(*) – Obtenção da retração pelo valor da variação dimensional.

3.3.1. Etapa 1: Ajuste da formulação

A etapa 1 constituiu na adaptação da formulação de Souza *et al.* (2013). Como resultado das tentativas de ajuste desta formulação, foram obtidas 10 novas formulações de argamassa autonivelante que, com base nos critérios definidos por Martins (2009), foram avaliadas qualitativamente no estado fresco, resultando na escolha de uma única formulação para sequência dos estudos, essa já adequada para os novos insumos considerados nesta pesquisa. O detalhamento dos critérios de análise e escolha da formulação será apresentado na sequência. Portanto, apresentam-se as formulações desenvolvidas por Souza *et al.* (2013) na Tabela 3.14, em que a formulação adotada para dar continuidade nesta pesquisa é a de código “9”.

Tabela 3.14 - Proporção em massa (kg) das formulações de Souza *et al.* (2013)

Código	Cimento	Areia	Sílica Ativa	SP	VMA	a/ms
1	1	1,25	0,05	0,0048	0,0143	0,435
5	1	1,25	0,05	0,0048	0,0143	0,2989
9	1	1,25	0,05	0,004	0,0077	0,236
12	1	1,45	0,05	0,009	0,0094	0,229
13	1	1,55	0,05	0,009	0,0094	0,220
15	1	1,875	0,25	0,009	0,0094	0,232

a/ms = água/ materiais secos (cimento + areia + sílica ativa)

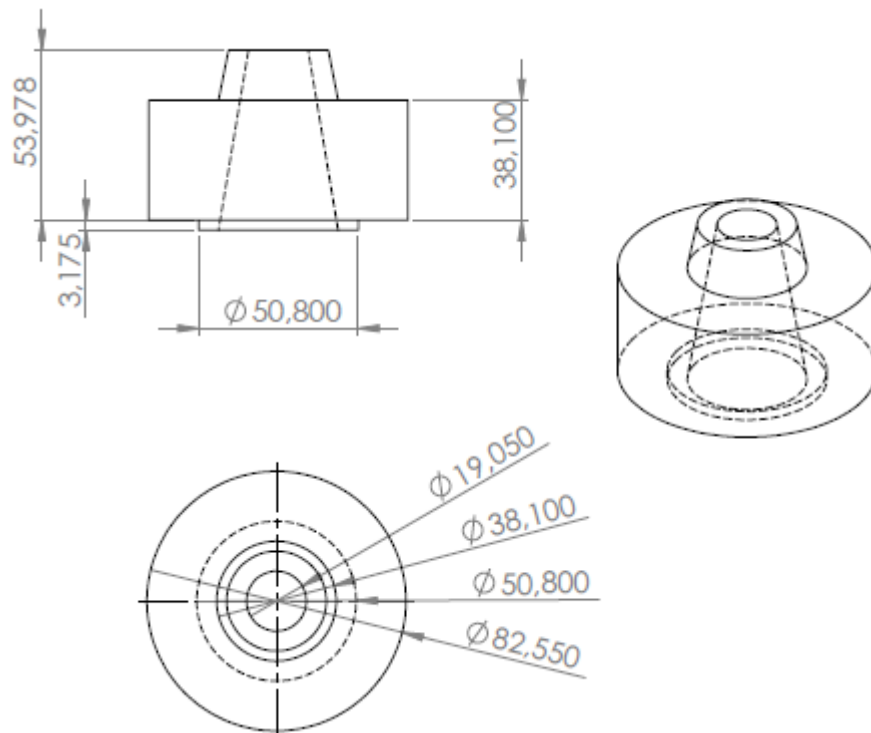
Fonte: Souza et al. (2013).

Como já citado, a adição mineral adotada nesta pesquisa é a cinza volante. Em Souza et.al (2013) foi adotada uma sílica ativa, material disponível naquela ocasião.

O ajuste de formulação foi feito através do ensaio de consistência realizado com o cone de Kantro (Kantro,1980) em que se verifica o diâmetro de espalhamento do material para avaliar a fluidez e, simultaneamente, seguindo os critérios de Martins (2009), avaliou-se visualmente as condições de borda e a existência de segregação e exsudação. Ressalta-se que o ensaio do cone de Kantro foi originalmente desenvolvido para avaliação de pasta, porém Nakakura e Bucher (1997) propuseram avaliação da consistência de argamassas autonivelantes por esse método, devido à fluidez e composição das mesmas.

O cone de Kantro apresenta as seguintes dimensões, como consta na Figura 3.9.

Figura 3.9 – Cone de Kantro (medidas em mm).



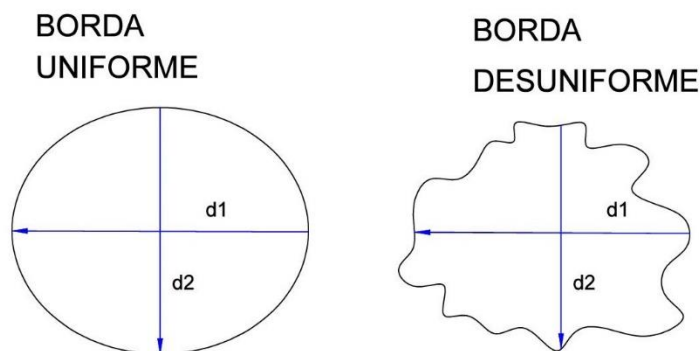
Fonte: Adaptado de Kantro (1980).

O diâmetro de espalhamento da argamassa é obtido após o seu escoamento em uma placa de vidro adequadamente nivelada. O diâmetro médio de abertura da argamassa é determinado a partir de duas medidas ortogonais de diâmetro e indica a fluidez da argamassa.

Ao mesmo tempo que se realiza a execução das medidas de diâmetro de espalhamento, avaliam-se também as condições de borda, existência de segregação e exsudação, seguindo os critérios definidos por Martins (2009) para as pastas.

A verificação das condições de borda é a avaliação visual da uniformidade da borda da argamassa espalhada após ensaio de cone de Kantro, conforme demonstrado na Figura 3.10. Essa uniformidade também é dependente dos processos de segregação e exsudação da argamassa.

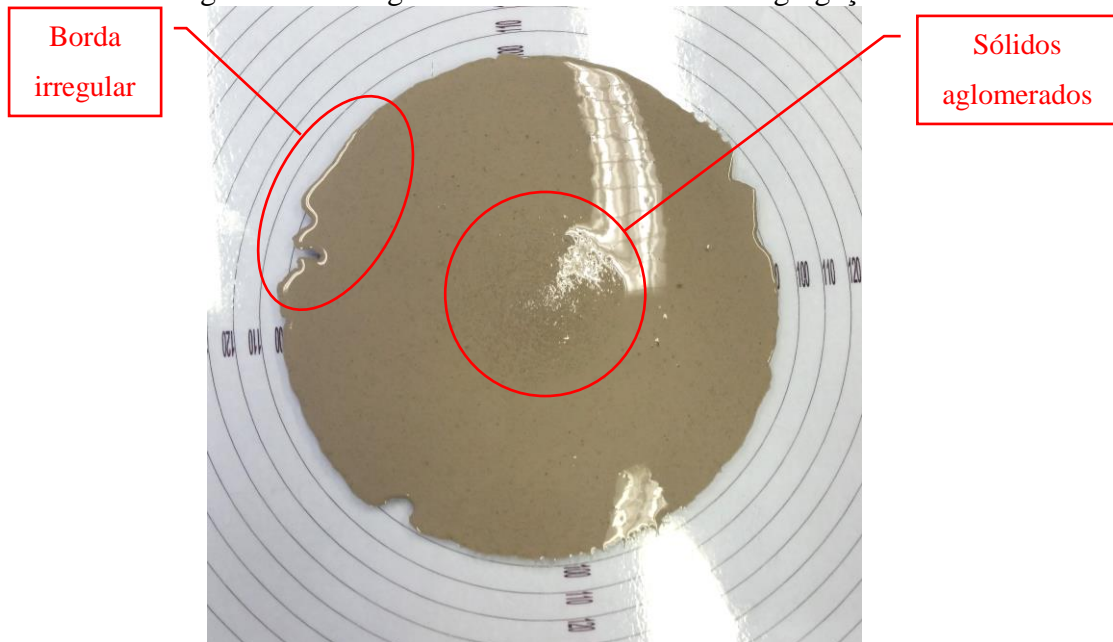
Figura 3.10 – Condições de uniformidade visual da borda da argamassa escoada.



Fonte: Adaptado de Martins (2009).

De maneira análoga, a análise da ocorrência ou não de segregação e exsudação das argamassas também foi realizada visualmente. As bordas da argamassa podem se apresentar altas ou baixas, fluidas em excesso ou não, com ou sem forma definida, e também pode-se identificar a presença de sólidos aglomerados, como exemplificado na Figura 3.11.

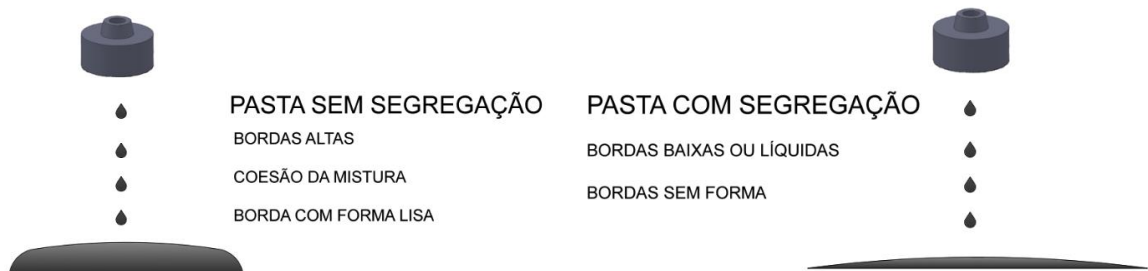
Figura 3.11 – Argamassa autonivelante com segregação.



Fonte: o autor.

Sendo assim, na Figura 3.12 mostram-se esquematicamente as duas situações que caracterizam a existência ou não de segregação da argamassa segundo critérios de Martins (2009).

Figura 3.12 – Análise visual da argamassa escoda quanto à segregação.



Fonte: Adaptado de Martins (2009).

Para a verificação da exsudação verifica-se a presença ou não de água com nata de cimento na superfície da argamassa e na borda, resultado da percolação de água, como exemplificado na Figura 3.13.

Figura 3.13 – Argamassa autonivelante com exsudação.



Fonte: o autor.

O ajuste das quantidades dos aditivos e da relação água/materiais secos (a/ms) foi realizado conjuntamente com as análises quantitativa e visual já citadas, feitos para que se obtivesse uma formulação referência que deu a base para as formulações com adição de fibras.

Por fim, ajustou-se as referidas quantidades de modo que a argamassa de referência desenvolvida tivesse um diâmetro médio de espalhamento maior que 130 mm, seguindo a indicação de Nakakura e Bucher (1997), e que contenha borda uniforme sem segregação e exsudação, seguindo as mesmas premissas de Martins (2009) e Souza *et al.* (2013).

Feito isso, partiu-se para o desenvolvimento das demais formulações com adições das fibras e substituição de parte do cimento por cinza volante, repetindo as mesmas análises qualitativas e visuais, para então obter argamassas com diâmetro de espalhamento maior 130 mm, com borda uniforme, sem segregação e exsudação, e principalmente sem aglomerados de fibras mal dispersas na mistura. Portanto, apresenta-se na Tabela 3.15 a relação das formulações desenvolvidas, sendo que o teor de adição das fibras é apresentado em porcentagem da massa de cimento.

Tabela 3.15 – Códigos e descrições das formulações de argamassas.

Código	Descrição	Teor de fibras (g/m³)
REF	Formulação referência sem adição de fibras	-
REF30S	Formulação com substituição do cimento em 30%	-
REF50S	Formulação com substituição do cimento em 50%	-
C011	Formulação com adição de 0,11% de fibras de celulose	0,85
C013	Formulação com adição de 0,13% de fibras de celulose	1,00
C070	Formulação com adição de 0,70% de fibras de celulose	5,40
C200	Formulação com adição de 2,00% de fibras de celulose	15,38
PP011	Formulação com adição de 0,11% de fibras de polipropileno	0,85
PP013	Formulação com adição de 0,13% de fibras de polipropileno	1,00
PVA011	Formulação com adição de 0,11% de fibras de acetato de polivinila	0,85
PVA013	Formulação com adição de 0,13% de fibras de acetato de polivinila	1,00
AI	Argamassa industrializada	-

A porcentagem de adição das fibras para as formulações que contém denominação “013” fora determinada baseada no valor sugerido pelo fabricante da fibra PP para argamassas autonivelantes. A recomendação é a adição de fibras no teor de 0,13% da massa de cimento.

Assim, explica-se que a presente pesquisa adotou a sugestão do fabricante da fibra PP, pois da fibra PVA, não foi encontrado nenhum tipo de recomendação. Dessa forma, aplicou-se o mesmo teor para as demais fibras de PVA e celulose, a fim de comparar os resultados entre formulações com o mesmo teor de fibras.

Além disso, foi proposto outro teor de adição para os três tipos de fibra em uma quantidade inferior ao outro adotado para efeito de comparação dos resultados na retração, e também verificação dos efeitos dos teores de adição das fibras nos estados fresco e endurecido do material. Assim foi proposto como teor mais baixo, denominado como “011”, a adição em porcentagem da massa de cimento equivale a 0,11%.

Por fim, seguindo as orientações do fabricante das fibras de celulose, foram empregados mais dois teores para esse tipo de fibra, “200” e “070”, que representam a adição de 2,0% e 0,70%, respectivamente. Esclarece-se, portanto, que esses últimos teores só foram

empregados para fibras de celulose, pois extrapolam os teores indicados pelo fabricante das fibras sintéticas para argamassas autonivelantes.

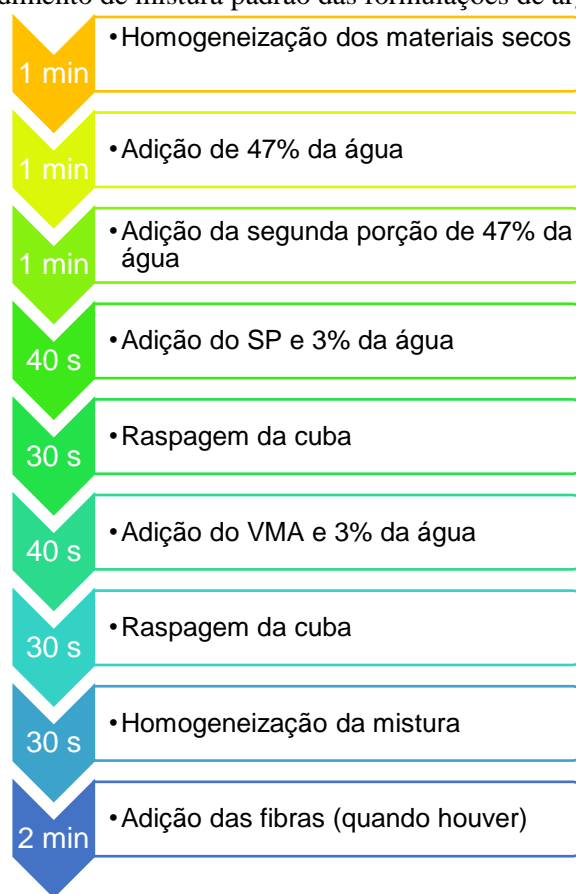
3.3.1.1. *Procedimento de mistura*

O procedimento de mistura de uma argamassa influi sobremaneira nas suas propriedades, tanto no estado fresco como no endurecido. Sendo assim, este trabalho propõe o procedimento para produção da argamassa de referência que foi o mesmo utilizado por Souza *et al.* (2013), que por sua vez o desenvolveu a partir do procedimento para pasta da argamassa autonivelante de Martins (2009).

Este procedimento foi desenvolvido para que a dispersão dos materiais no composto se desse de maneira mais homogênea possível. Nessas pesquisas, foi notado que primeiramente deveria se homogeneizar os materiais secos e depois adicionar porções separadas da quantidade de água total para que os mesmos fossem bem umedecidos. Feito isso, a sequência de mistura dos aditivos se deu de forma que primeiramente se promovesse a dispersão dos materiais pelo aditivo SP, e em seguida emprego do VMA para promover a coesão final da mistura.

No entanto, devido ao emprego das fibras, foi adicionada uma etapa final para a mistura destas. A escolha da adição das fibras ao final da mistura foi baseada no estudo de França e Pileggi (2015) que atestaram que as fibras são melhor dispersas se adicionadas à argamassa no ponto de fluidez. Assim, expõe-se na Figura 3.14 o procedimento desta pesquisa. Vale ressaltar que as misturas foram realizadas em argamassadeira com capacidade de 5 litros de eixo vertical e em velocidade baixa.

Figura 3.14 – Procedimento de mistura padrão das formulações de argamassa autonivelante.



Fonte: O autor.

3.3.2. Etapa 2: Análise da variação dimensional

Para esta etapa foi previsto o monitoramento da variação dimensional de amostras das argamassas formuladas que permitiu avaliar por esta variação como está o comportamento das argamassas quanto à retração por secagem.

O ensaio de variação dimensional está prescrito na norma ABNT NBR 15261 (2005) que prevê a avaliação da variação através de corpos de prova (CP) prismáticos de dimensões 25 x 25 x 285 mm que são moldados com pinos que permitirão a fixação do corpo de prova no estado endurecido a um pórtico com relógio comparador (Figura 3.15). A norma também prevê a leitura da massa dos corpos de prova.

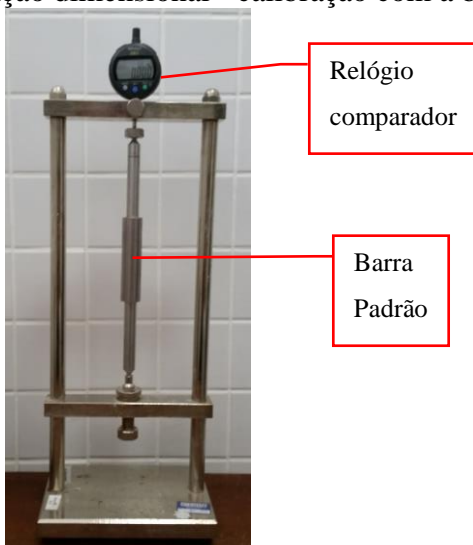
Figura 3.15 – Ensaio de variação dimensional – leitura do corpo de prova.



Fonte: O autor.

A leitura no aparelho comparador de comprimento é feita a partir da calibração do mesmo com uma barra padrão (Figura 3.16) de modo que quando posicionado o CP no equipamento, o relógio comparador apresente a diferença entre o CP e a barra. A norma ainda, indica que sejam feitas leituras e pesagens nas idades de 1, 7 e 28 dias a contar da desforma que deverá ser feita 48h após a moldagem. Ademais, essa indica que sejam feitas leituras para as quatro faces de cada CP, estando este sempre na mesma posição.

Figura 3.16 – Ensaio de variação dimensional - calibração com a barra padrão.



Fonte: O autor.

Nesse sentido, a presente pesquisa propõe um procedimento que difere desse procedimento normativo nos seguintes pontos descritos na sequência:

- a) desmoldagem a 24h após a moldagem;
- b) leituras e pesagens nas idades de 1, 7, 14, 21 e 28 dias após a desmoldagem;

A variação dimensional é calculada a partir da equação 5.

$$\varepsilon_i = \frac{L_i - L_0}{0,25} \quad (4)$$

Onde:

ε_i – variação dimensional (mm/m) na idade “i”;

L_i – leitura efetuada na idade final (mm);

L_0 – leitura efetuada após a desforma (mm);

0,25 – distância entre pinos fixos no corpo de prova (m).

Optou-se por adiantar a desmoldagem que é indicada a 48h pela norma devido ao rápido endurecimento do material. Também, foram feitas leituras semanais a fim de analisar melhor o fenômeno de retração durante os 28 dias e por segurança para o caso de analisar se os corpos de prova não sofreram alguma avaria durante o tempo de ensaio.

A utilização dessa equação permite a obtenção de valores de expansão ou retração em mm/m no tempo de ensaio. Ou seja, se o valor da variação dimensional for positivo houve uma expansão, porém se o valor for negativo houve uma retração. Desta forma, para esta pesquisa, o valor da retração aos 28 dias foi obtido através do resultado da variação dimensional neste tempo de ensaio.

Por fim, foram produzidas amostras para cada formulação a fim de garantir um maior número de resultados e a confiabilidade da variação dimensional média obtida.

3.3.3. Etapa 3: Ensaio de caracterização

Nesta etapa foram realizados todos os demais ensaios apresentados na Tabela 3.13. Para tanto apresenta-se abaixo cada ensaio desta etapa, seus procedimentos normatizados e/ou adotados nesta pesquisa.

3.3.3.1. *Densidade de massa e teor de ar incorporado*

Para a realização dos ensaios de densidade de massa e teor de ar incorporado foram adotados os procedimentos previstos na ABNT NBR 13278 (2005). A única adaptação do ensaio é que para o preenchimento do recipiente de pesagem não foi necessário o adensamento por golpes, dada à fluidez das argamassas autonivelantes.

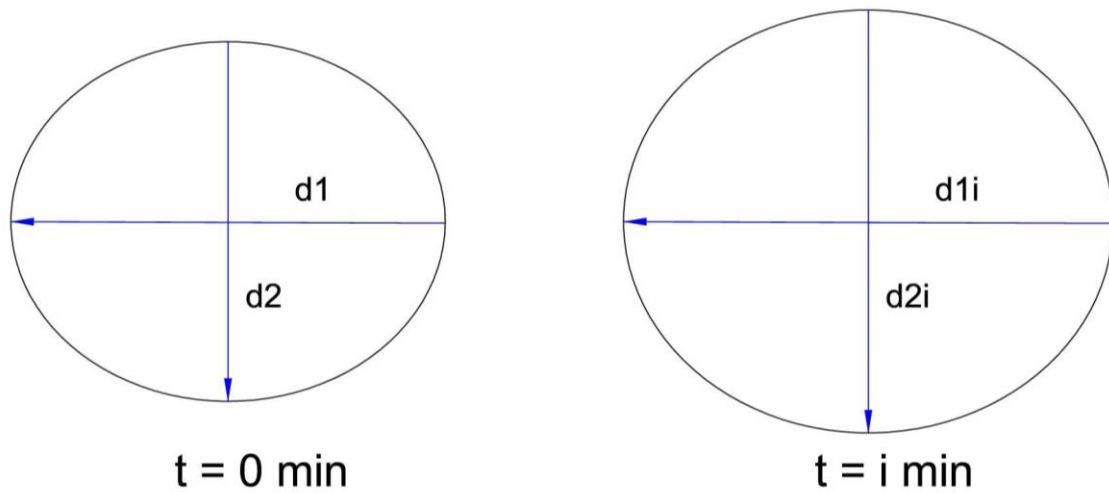
3.3.3.2. *Tempo de retenção de fluxo*

Este ensaio permite a avaliação da perda da trabalhabilidade do material aplicado, e seu procedimento é determinado pela ASTM C 1708 (2012). A norma indica que seja avaliado o escoamento do material, semelhante ao ensaio de consistência, através de um “anel de fluxo” que consiste em um cilindro de 50 mm de diâmetro interno e 30 mm de altura. Assim mede-se o diâmetro de espalhamento nos tempos de 20 e 30 minutos após a mistura (Figura 3.17).

No presente trabalho, o equipamento de espalhamento utilizado nesse ensaio foi o cone de Kantro por ter sido adotado também para verificação da consistência. Optou-se também por fazer a verificação do diâmetro de abertura até 60 minutos após mistura e nos intervalos de 10 em 10 minutos, tendo-se em vista a necessidade de desempenho da argamassa durante o seu tempo de aplicação, nesse caso a retenção de fluxo durante a aplicação.

Além disso, esclarece-se que a norma prevê a leitura do diâmetro ao longo do tempo de espalhamentos independentes. Com esse método 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. Porém, para este trabalho optou-se em monitorar as argamassas já espalhadas durante um tempo determinado, a fim de verificar se as mesmas continuavam a fluir durante o tempo. Objetivou-se com isso avaliar o espalhamento do material de modo que não prejudique sua aplicação. Ou seja, se as argamassas continuarem fluindo ao longo tempo, o preenchimento das áreas na espessura desejada será prejudicada.

Figura 3.17 – Ensaio de retenção de fluxo – Obtenção diâmetro médio de espalhamento pela média dos diâmetro ortogonais nos tempos 0 e i min, sendo i os tempos determinados para leitura.



Fonte: O autor.

3.3.3.3. Resistência à compressão e à tração na flexão

Os ensaios de resistência à compressão e à tração na flexão foram realizados conforme prescrito na ABNT NBR 13279 (2005) e, para tanto, moldou-se 6 CP's prismáticos de 40 x 40 x 160 mm, para cada formulação, já que cada exemplar pode ser utilizado para fazer os dois ensaios. Como dito anteriormente, não será necessário aplicar os golpes de adensamento previstos na norma. Vale ressaltar que os CP foram desformados após 24h da moldagem e acondicionados na câmara seca para cura. Os ensaios foram realizados nos dias 7 e 28 após a moldagem.

3.3.3.4. Análise de custos

Ademais, foram analisados os custos por m^2 dos insumos das argamassas formuladas no presente trabalho a fim de comparar com o custo da utilização de uma argamassa de piso de alta resistência industrializada (AIA).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. ETAPA 1 – AJUSTE DA FORMULAÇÃO

O desenvolvimento da formulação consistiu basicamente na verificação da fluidez e consistência da argamassa através do ensaio do cone de Kantro, seguindo a mesma proporção em massa da formulação de Souza *et al.* (2013), mas com insumos obtidos para esta pesquisa.

4.1.1. Dosagem dos aditivos SP e VMA

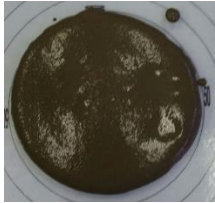

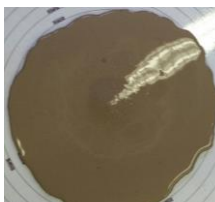
No primeiro momento foi obtido um diâmetro médio de espalhamento de 118 mm, valor este inferior ao obtido por Souza *et al.* (2013) e menor que o parâmetro de Nakakura e Bucher (1997) de 130 mm (parâmetro mínimo adotado para esta pesquisa). Portanto, partiu-se do pressuposto que seria necessário ajustar as quantidades dos aditivos SP e VMA, e também de água na mistura, visto que o agregado miúdo empregados possuía maior superfície específica reduzindo com isso a fluidez da argamassa. Além disso, devido ao emprego de aditivos SP e VMA produzidos por empresas diferentes da pesquisa de Souza *et al.* (2013), o ajuste de adição dos mesmos e da própria quantidade de água da argamassa de referência para obtenção da determinada fluidez não necessariamente seria através aumento da quantidade desses insumos.

Desse modo, foram produzidas argamassas com maior quantidade de aditivo SP com o intuito de aumentar a fluidez através da dispersão das partículas na mistura. Com o aumento em 50% da quantidade desse aditivo em relação a formulação “0” houve o aumento da fluidez, mas percebeu-se a falta de coesão das partículas pela não uniformidade da borda, como apresentado na formulação “1” da Tabela 4.1.

Depois em teste com o aumento de 25% da quantidade de SP em relação a formulação “0” (formulação base desta pesquisa) houve também o aumento da fluidez, mas desta vez notou-se a ocorrência de segregação. Esse fenômeno pode ser identificado pela mancha mais escura ao centro do material espalhado que é característico da concentração de sólidos nesse local. Isso comprova a sensibilidade da adição de aditivos superplastificantes à base de carboxilatos que em excesso ou falta desestabiliza o equilíbrio dos componentes

da mistura promovendo a separação das fases sólida e líquida a nível de caracterizar-se por bordas líquidas ou ao máximo por segregação.

Tabela 4.1 - Proporção em massa e diâmetro médio de espalhamento formulações com aumento da quantidade de SP.

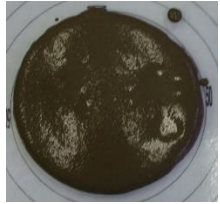

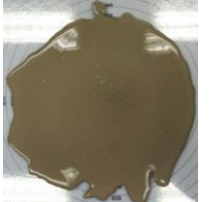
Código	cimento (kg)	areia (kg)	adição (g)	SP (g)	VMA (g)	a/ms	ϕ (mm)	Espalhamento
0	1	1,25	50	4,0	7,7	0,236	117,5	
1	1	1,25	50	6,0	7,7	0,236	155,0	
2	1	1,25	50	5,0	7,7	0,236	175,0	

“0” – Formulação de Souza *et. al.* (2013)

Fonte: o autor.

Sendo assim, partiu-se para o ajuste simultâneo das quantidades dos dois aditivos (Tabela 4.2). Para o primeiro teste, foi mantido o aumento de 25% de SP e aumentado em 17% a quantidade de VMA com a intenção de manter a fluidez e conferir a mistura maior coesão. No entanto, a argamassa também apresentou segregação. Portanto, com o entendimento que o excesso de SP promove esse tipo de ocorrência, optou-se por aumentar a quantidade em apenas 10% em relação à formulação base e aumentar ainda mais a quantidade de VMA para 30%. Feito isso, a argamassa apresentou ainda mais não uniformidade da borda e um indício de exsudação comprovando assim que o excesso do VMA também pode desestabilizar o equilíbrio da mistura.

Tabela 4.2 - Proporção em massa e diâmetro médio de espalhamento formulações com aumento da quantidade de SP e VMA.

Código	cimento (kg)	areia (kg)	adição (g)	SP (g)	VMA (g)	a/ms	ϕ (mm)	Espalhamento
0	1	1,25	50	4,0	7,7	0,236	117,5	
3	1	1,25	50	5,0	9,0	0,236	140,0	
4	1	1,25	50	4,4	10,01	0,236	195	

“0” – Formulação de Souza *et. al.* (2013)

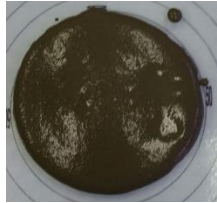
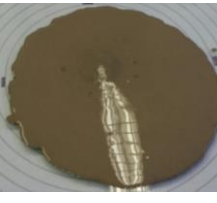
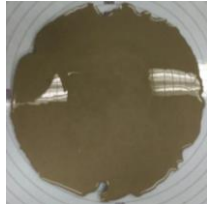
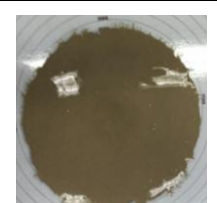
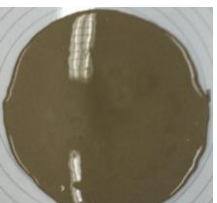
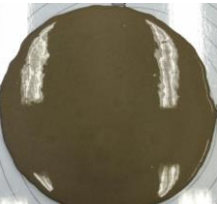
Fonte: o autor.

Por fim, partiu-se para o ajuste da quantidade de água (Tabela 4.3). Assim como as demais etapas de ajuste, primeiramente manteve-se a quantidade de SP da formulação “2”, reduziu-se um pouco da quantidade de VMA permanecendo um acréscimo de 17% em relação à formulação base, e aumentando em 6% a quantidade água. Assim, foi obtido um material com maior fluidez, porém com segregação e exsudação. A segregação ocorreu devido ao excesso de água atrelado à ação de dispersão das partículas pelo SP, o que resultou na separação das fases da mistura. A exsudação ocorreu em razão do excesso do VMA somado também ao excesso de água não foi capaz de promover o equilíbrio da suspensão das partículas permitindo principalmente que a água percolasse para face superior do material.

Sendo assim, constatando-se a sensibilidade do ajuste das quantidades dos aditivos nas formulações, foi promovida alteração apenas da quantidade de água da mistura em relação à formulação “0”. Com o aumento das quantidades de água notou-se a ocorrência de exsudação claramente explicado pelo excesso de água na mistura. Então, foi experimentado

diminuir a quantidade de água de modo que talvez assim o aditivo SP pudesse atuar de modo satisfatório e diminuir a quantidade de VMA para que não houvesse exsudação.

Tabela 4.3 – Proporção em massa e diâmetro médio de espalhamento das formulações desenvolvidas.

Código	cimento (kg)	areia (kg)	adição (g)	SP (g)	VMA (g)	a/ms (kg)	ϕ (mm)	Espalhamento
0	1	1,25	50	4,0	7,7	0,236	117,5	
5	1	1,25	50	5,0	9,0	0,25	185,0	
6	1	1,25	50	4,0	7,7	0,25	185,5	
7	1	1,25	50	4,0	7,7	0,244	185,0	
8	1	1,25	50	4,0	7,7	0,241	155,0	
REF	1	1,25	50	4,0	7,5	0,225	145,0	

REF – argamassa de referência;

Fonte: o autor.

Através do método de “tentativa e erro” verificou-se que os melhores resultados foram para as formulações com menor relação água/ materiais secos (a/ms) e menor quantidade de aditivo VMA. O critério de avaliação foi realizado de forma qualitativa através da obtenção do diâmetro médio de espalhamento, e visual das bordas para verificação da ocorrência de segregação e exsudação. Por fim, chegou-se a formulação apresentada na Tabela 4.4, que foi adotada como a formulação referência (REF) desta pesquisa que ao contrário do esperado em relação à formulação proposta por Souza et. al (2013) foi necessário diminuir aproximadamente em 3% a quantidade de VMA e em 5% a quantidade de água. Isto prova que devido às características químicas dos aditivos e a granulometria dos materiais anidros empregados nesta pesquisa, foi possível ajustar a formulação referência apenas com a redução do teor de VMA e da quantidade de água.

Tabela 4.4 – Formulação de referência em massa.

Form.	Cimento (kg)	Areia (kg)	Cinza V. (g)	SP (g)	VMA (g)	a/ms
REF	1	1,25	50	4,0	7,5	0,225 ^(*)

(*) – relação água/ cimento (a/c) = 0,51 e água/ ligante (a/l) = 0,49

Fonte: o autor.

Resumidamente, para as diversas argamassas produzidas pode-se perceber que com o aumento do aditivo SP aumentava-se a segregação da mistura e com o aumento do aditivo VMA aumentava-se a segregação.

4.1.2. Emprego de cinza volante

A partir da formulação de referência procedeu-se a dosagem das argamassas com substituição do cimento por cinza volante com intuito de formular argamassas autonivelantes com propriedades adequadas no estado fresco, mas buscando controlar o processo de retração identificado por Souza *et. al.* (2013).

Para as formulações com substituição em 30 e 50% da quantidade de cimento por cinza volante, em razão do aumento de partículas de cinza volante que, nesta pesquisa, são maiores que as do cimento, a fluidez e as condições de borda foram prejudicadas. Portanto, foi necessário o ajuste das quantidades de água e aditivo superplastificante, como apresenta-se na Tabela 4.5.

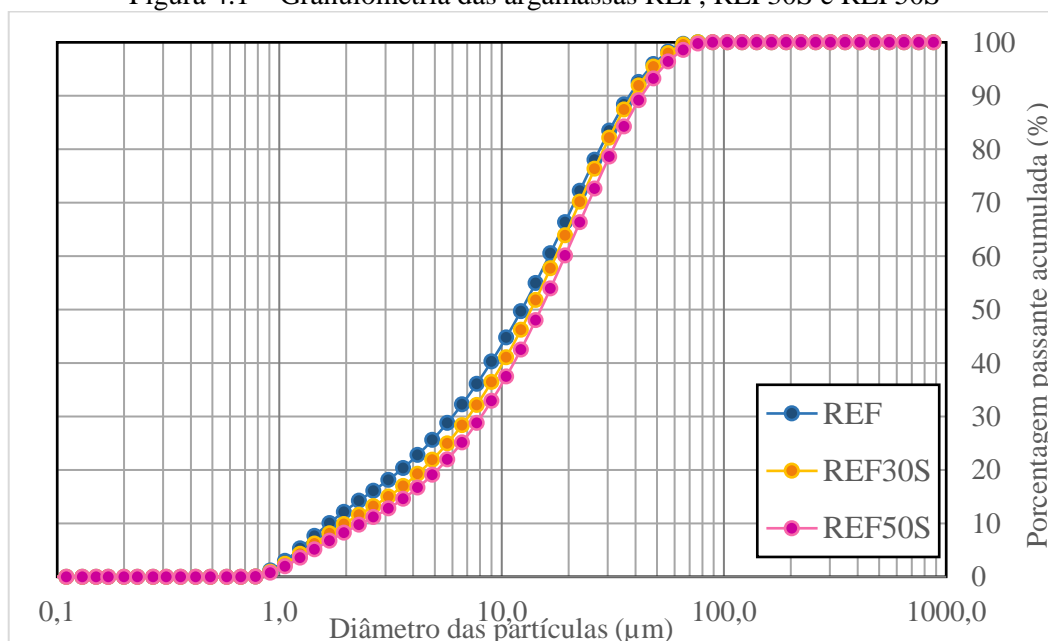
Apresenta-se também na tabela o consumo de cimento, pois a intenção de formular argamassas com substituição foi justamente a de reduzir esse consumo que para argamassa de referência estava alto. Reduziu-se o consumo de cimento a fim de reduzir a retração que é resultante, em grande parcela, pelas reações de hidratação do cimento. Para mais, mostra-se a curva granulométrica das argamassas de referência e com substituição parcial de cimento, em que o deslocamento das curvas representa a parcela de cinza volante adicionada em relação à argamassa de referência. A cinza volante utilizada nessa pesquisa apresentou-se bastante grossa quando comparada ao cimento.

Tabela 4.5 – Formulações das argamassas de referência e com substituição de cinzas volantes, em massa .

Form.	Cimento (kg)	Areia (kg)	Cinza V. (g)	SP (g)	VMA (g)	a/ms	a/c	Consumo de cimento (kg/m ³)
REF	1	1,25	50	0,004	0,0075	0,225	0,51	746,7
REF30S	1	1,79	500	0,006	0,0107	0,200	0,66	522,42
REF50S	1	2,5	1.100	0,0048	0,0150	0,230	1,06	346,06

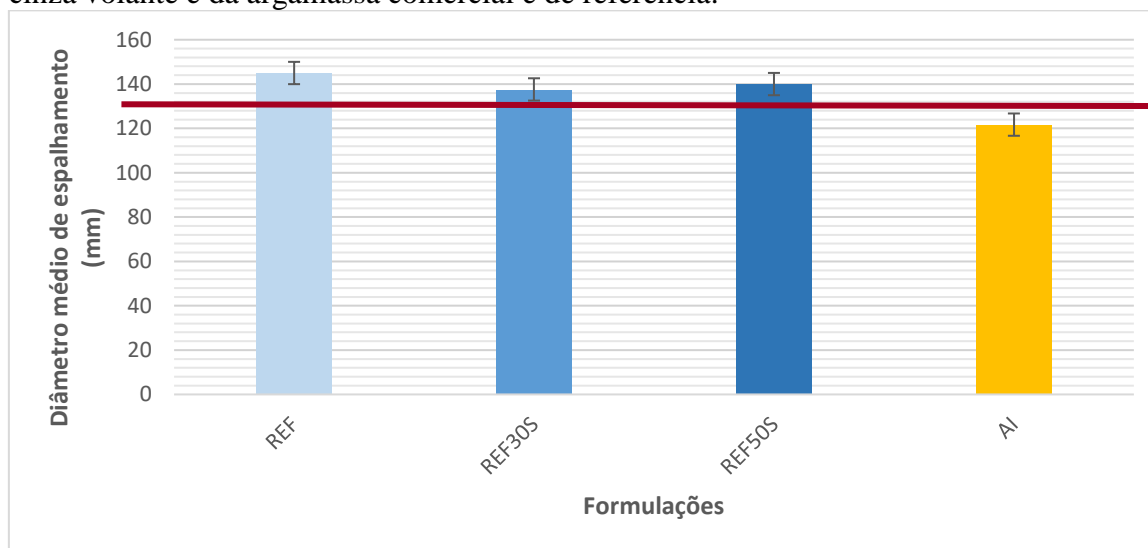
Fonte: o autor.

Figura 4.1 – Granulometria das argamassas REF, REF30S e REF50S



Com a dosagem das argamassas com substituição ajustadas, apresenta-se na Figura 4.2 os resultados do diâmetro médio de espalhamento dessas formulações obtido no ensaio do cone de Kantro e também para uma argamassa comercial para aplicação em piso.

Figura 4.2 – Diâmetro médio de espalhamento das argamassas formuladas com cinza volante e da argamassa comercial e de referência.



— Limite mínimo de Nakakura e Bucher (1997) – $D_m = 130$ mm
Fonte: o autor.

Do gráfico é possível concluir que as argamassas com substituição de cinza volante foram dosadas de modo que a fluidez ficou similar à argamassa de referência. Nota-se também que a argamassa comercial possui diâmetro de espalhamento muito próximo ao limite proposto por Nakakura e Bucher (1997), o que era de se esperar já que as argamassas autonivelantes para diferentes aplicações devem cumprir o desempenho de fluidez.

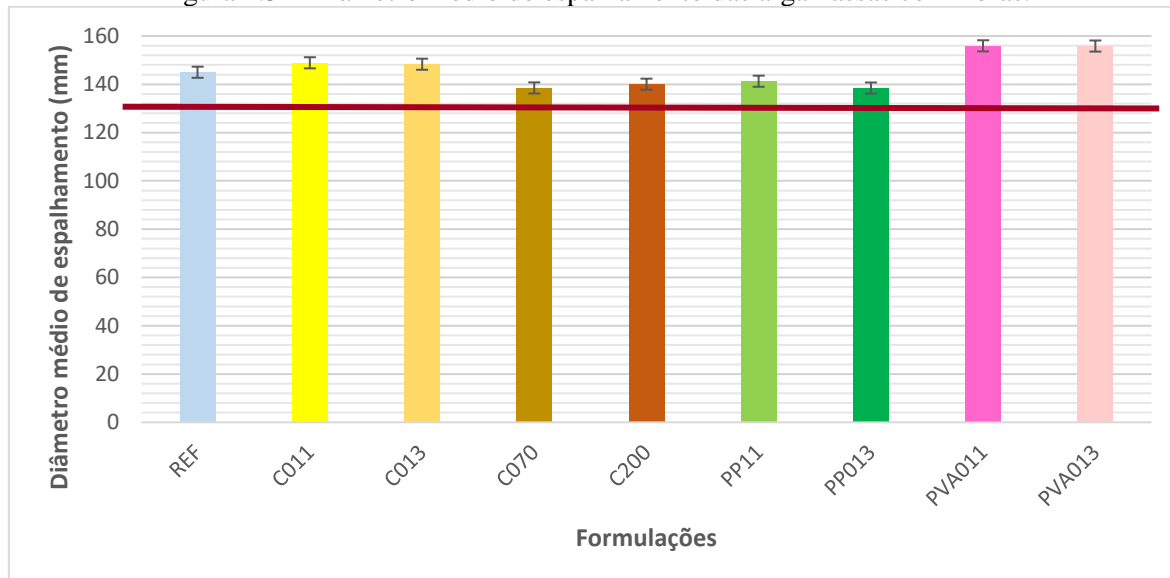
4.1.3. Emprego de fibras

Em seguida, foi realizada a dosagem das argamassas com fibra. Os resultados obtidos se opuseram ao pressuposto de que o emprego de fibras diminuiria a fluidez das argamassas, comportamento identificado por Silva et. al. (2007). Todas as argamassas também apresentaram borda uniforme e ausência de segregação e exsudação, em conformidade com o método de avaliação proposto por Martins (2009).

Ao contrário do que se esperava, não foi necessário o ajuste dos insumos. Certamente isso foi possível, devido à escolha correta do procedimento de mistura que para o caso de

adição de fibras é de suma importância. Assim sendo, apresenta-se na Figura 4.3 as formulações com adição das diversas fibras e teores.

Figura 4.3 – Diâmetro médio de espalhamento das argamassas com fibras.



— Limite mínimo de Nakakura e Bucher (1997) – $D_m = 130$ mm
 Fonte: o autor.

Com base nos resultados, pode-se perceber que as formulações com 0,11% de fibras de celulose e de PVA apresentaram diâmetro médio de espalhamento maior que da referência, sendo essa diferença de aproximadamente 2,7% e 7,5%, respectivamente. Isso pode ser explicado pela própria natureza dessas fibras, que no caso da celulose tende a permitir uma melhor homogeneidade na distribuição da água na mistura aumentando sua fluidez. E no caso da fibra de PVA que é um polímero sintético com estrutura $(-CH_2CHOH-)_n$, o grupamento OH tem alta afinidade química com a matriz cimentícia (SAVASTANO JR, H; AGOPYAN, V.; JOHN, V. M., 2006). Sendo assim, essa característica desse tipo de fibra foi o que permitiu uma melhor dispersão das mesmas e o conseqüente aumento da fluidez.

Para as formulações que continham 0,13% de fibras de celulose e de PVA também foi observado o aumento do diâmetro de espalhamento em aproximadamente 2,3% e 7,5%, respectivamente. Ou seja, para esses dois tipos de fibras os dois teores aplicados aumentaram a fluidez da mistura. Nesse sentido, destaca-se que para ambos os teores de adição de 0,11 e 0,13% os diâmetros de espalhamentos foram numericamente muito próximos o que permite concluir que na realidade a diferença entre esses dois teores não foi significativa promovendo assim um comportamento similar das argamassas.

Porém, o comportamento observado para as fibras de polipropileno foi oposto as demais. As duas formulações com adição destas fibras apresentaram redução da fluidez, sendo que a formulação PP011 apresentou diâmetro 2,6% inferior, e a PP013 4,5% à argamassa de referência. Isso ocorreu pela maior dificuldade de dispersão dessas fibras que prejudicaram, portanto, o espalhamento. No entanto, ressalta-se que mesmo assim os valores de diâmetros médios obtidos ainda são maiores que o valor mínimo de 130 mm indicado por Nakakura e Bucher (1997), diâmetro esse fixado como limite mínimo na metodologia desta pesquisa.

Sendo assim, realizou-se uma análise de variância dos resultados de diâmetro médio de espalhamento das argamassas que contemplam os três tipos de fibras para os dois teores em comum (0,11% e 0,13%), a fim de compreender a significância do tipo e do teor de fibras nesses resultados.

Da 6 pode-se perceber que os dois teores de fibra adotados não influenciaram na fluidez das argamassas. Por outro lado, para o tipo de fibra o efeito foi significativo. Ressalta-se que isso pode ser influência do tipo de da fibra em si, considerando a característica física da superfície e sua afinidade com a matriz cimentícia, ou do tamanho das fibras que nesta pesquisa cada uma possui um comprimento diferente. Na tabela também se mostra que a interação entre tipo e teor de fibra não influi no desempenho à fluidez das argamassas.

Tabela 4.6 – Análise de variância dos resultados de diâmetros médios de espalhamento das argamassas PP011, PP013, PVA 011 e PVA013.

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	F Tab	Significância
Teor de fibra (A)	7,30	1	7,30	0,40	4,75	NS
Tipo de fibra (B)	1004,02	2	502,01	27,70	3,89	S
AB	17,82	2	8,91	0,49	3,89	NS
ERRO	217,50	12	18,12			
Total	1246,63	17				

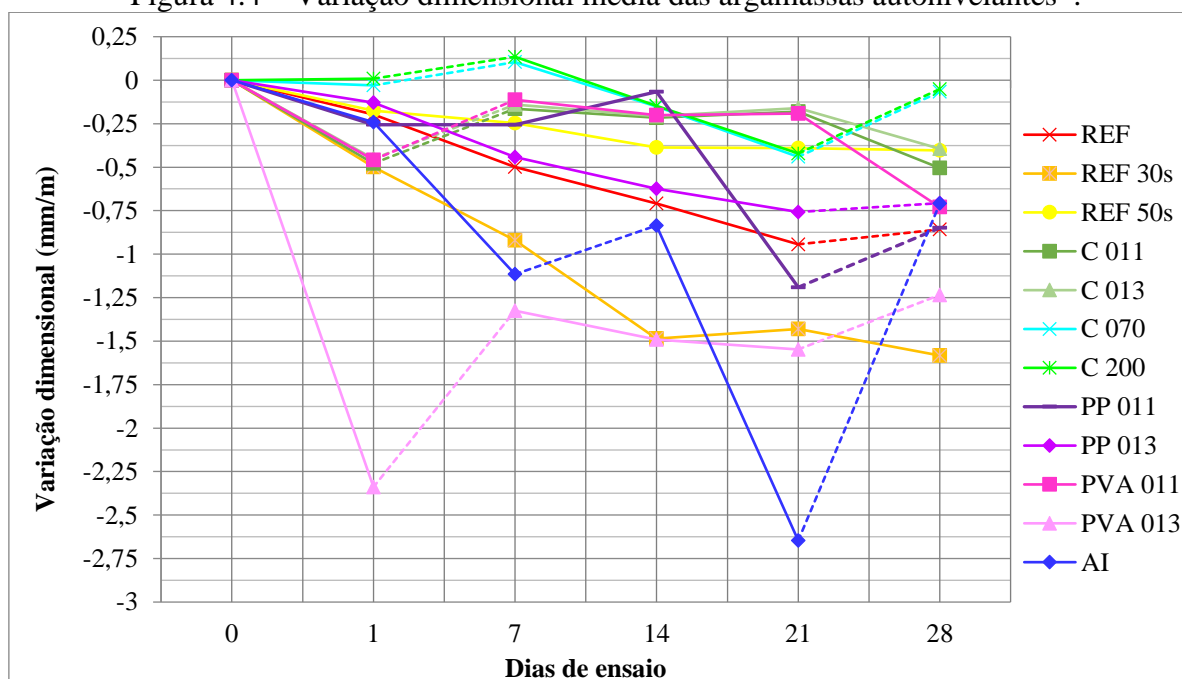
SQ = soma quadrática; GL = graus de liberdade; MQ = média quadrática; F = valor calculado de F; F Tab = valor tabelado de F; S = valor significativo; NS = valor não significativo; Se $F < F \text{ Tab}$ = efeito não significativo

Para mais, a adição das fibras de celulose em maiores teores, 0,70% e 2,00%, também reduziu a fluidez. Mas de maneira análoga às fibras de PP, os diâmetros obtidos também estão dentro do limite.

4.2. ETAPA 2 – VARIAÇÃO DIMENSIONAL

A análise de variação dimensional foi realizada para todas as formulações. Apresenta-se na Figura 4.4 os resultados obtidos. Analisando os gráficos é possível notar que para todas as argamassas, inclusive nos dados da argamassa comercial, há etapas em que o gráfico se apresenta ascendente fato este que caracterizaria uma expansão. Desse modo, partiu-se do pressuposto que os componentes das argamassas não teriam qualquer elemento químico que pudesse causar expansão e que, portanto, a causa estaria no controle de umidade insuficiente da câmara seca, a qual os corpos de prova estiveram expostos durante o tempo de ensaio.

Figura 4.4 – Variação dimensional média das argamassas autonivelantes*.



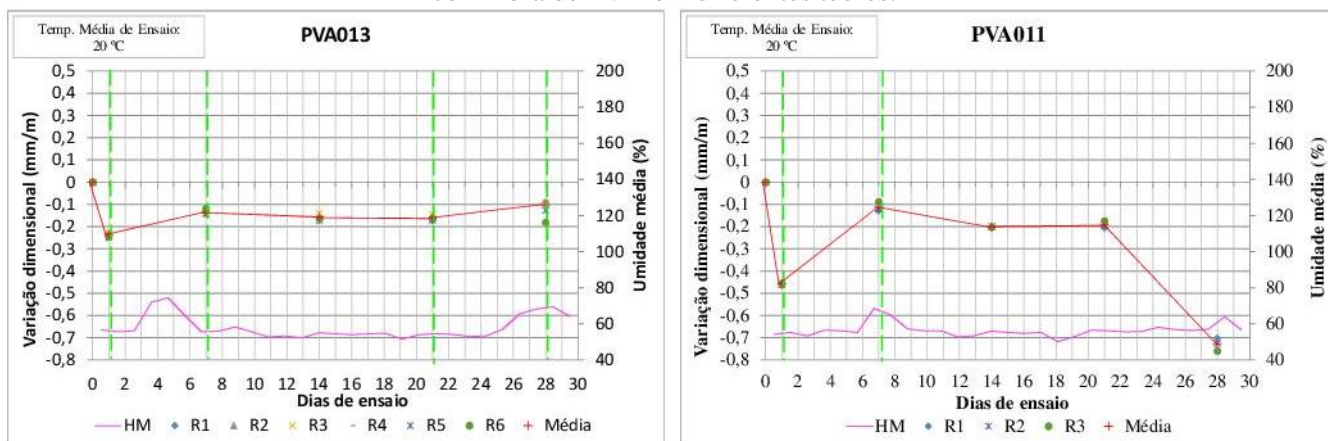
(*) - os ensaios foram realizados em temperatura média de 20 °C e umidade variando entre 43 e 81%; as linhas pontilhadas representam um fenômeno de expansão dos corpos de prova.

Sendo assim, foram extraídos e avaliados os dados armazenados pelo termo higrômetro da câmara seca para confirmar se o controle de temperatura e umidade estavam sendo insuficientes. Feito isso, confirmou-se que para os dias em que havia o aumento da umidade do ambiente ocorreu um fenômeno de “expansão” dos corpos de prova, o que atesta a sensibilidade do ensaio.

Para as formulações REF, PP011, PP013, PVA013 e AI o ensaio de variação dimensional foi repetido com o intuito de verificar se os ensaios realizados não tiveram seus resultados prejudicados. Os resultados finais aos 28 dias se mostraram similares e mesmo

adotando um procedimento de limpeza diária do dispositivo controlador de umidade, notou-se que ainda houve picos de umidade durante os 28 dias resultando no mesmo fenômeno de “expansão”. Para estes ensaios procurou-se fazer leituras diárias e leituras até 35 dias para também garantir que a leitura no 28º dia tenha sido alterada pelas condições de umidade.

Figura 4.5 - Variação dimensional e controle da umidade média da câmara seca das argamassas com fibra de PVA em diferentes teores.



Legenda: HM – Umidade média; RN – Amostra N

Sendo assim, está apontado na Figura 4.5 a variação dimensional de duas formulações em que estão identificados, entre linhas pontilhadas, os períodos em que o controle da umidade do ambiente não foi realizado de maneira satisfatória e que, portanto, influenciaram nos resultados de variação dimensional representando uma reta ascendente. Resumidamente, foi verificado e comprovado que quando houve aumento da umidade do ambiente houve a expansão das argamassas, justificando a existência das retas ascendentes na Figura 4.4.

Em treinamento com a empresa de aditivos químicos Wacker Química do Brasil Ltda., recebeu-se a instrução que para argamassas autonivelantes a retração máxima desejada seria de 0,5 mm/m, mas que valores até 0,8 mm/m ainda seriam aceitáveis. Ademais, Lessa e Coutinho (2013), que formularam o contrapiso autonivelante utilizado nesta pesquisa como argamassa industrializada, admitiram para o seu produto a retração por secagem final aos 28 dias máxima de 0,6 mm/m. Sendo assim, observando os dados de retração média a 28 dias apresentados na Tabela 4.7, pode-se inferir que foram satisfatórios para as argamassas que contém adição de fibra de celulose (C011, C013, C070 e C200), e para a argamassa com 50% de substituição da quantidade de cimento, que apresentaram retração inferior ou igual ao valor máximo de 0,8 mm/m adotado então como limite máximo para esta pesquisa.

O valor de retração obtida para as argamassas PP013, PVA011 e AI se apresentou entre 0,7 e 0,8 mm/m, ou seja, para estas formulações a variação dimensional ainda é aceitável segundo parâmetro adotado nesta pesquisa. Por fim, demonstra-se que as argamassas PP011, REF, PVA013 e REF30S tiveram retração maior que 0,8 mm/m. No entanto, vale frisar que para PVA013 e REF30S foram obtidos os maiores resultados de retração, ou seja, com 0,13% de fibra de PVA e também considerando-se a substituição parcial do cimento em 30%.

Tabela 4.7 – Retração por secagem aos 28 dias das argamassas formuladas.

Formulação	Retração por secagem aos 28 dias (mm/m)
C200	0,05
C070	0,07
C013	0,39
REF50S	0,40
C011	0,50
PP013	0,71
AI	0,71
PVA011	0,73
PP011	0,85
REF	0,86
PVA013	1,23
REF30S	1,58

Nesse sentido, conclui-se primeiramente que o emprego das fibras de celulose contribui significativamente para o controle do processo de retração das argamassas autonivelantes, tendo em vista os menores valores de retração apresentados na Tabela 4.7. Essas fibras atuam como micro vasos capilares que controlam a movimentação da água dentro composto, o que conseqüentemente favorece o processo de hidratação das partículas de cimento, além de proporcionar um maior controle da perda de água para meio externo, perda esta que tende a aumentar a retração da mistura cimentícia. Cabe destacar que os maiores teores de fibras de celulose determinaram retrações quase nulas (C070 e C200).

Para o caso da argamassa com substituição de 50% do teor de cimento em cinza volante, de fato alcançou-se o objetivo de redução da variação dimensional em relação à formulação de referência que possui alto consumo de cimento. Por outro lado, para argamassa com 30% de substituição não foi observada redução da retração. Nesse caso a inserção de partículas de cinza volante que, nesta pesquisa, apresenta-se numa faixa granulométrica maior que o cimento, ao contrário do que se esperava provavelmente não

contribuiu com o efeito de preenchimento dos vazios. Muito provavelmente aumentou uma classe de partículas que se aglomeraram aumentando a quantidade de vazios que durante o endurecimento do material exercem como capilares que fomentam a retração de secagem.

Por fim, para as argamassas com fibra de polipropileno se obteve um resultado desejável com a PP013 comprovando que para este tipo de fibra e teor é possível reduzir o fenômeno da retração em relação à argamassa de referência. Ainda mais, as fibras de PP possuem um menor custo comparadas às demais que são importadas.

De forma divergente, para as argamassas com fibra de PVA a retração foi reduzida para PVA011 e maior para PVA013. Para essas formulações aquela que possui maior teor de adição apresentou maior teor de ar incorporado que justifica o aumento da retração pela contribuição da maior quantidade de vazios na saída na movimentação da água interna para o meio externo. Além disso, a diferença dos valores de retração obtidos para as duas argamassas com fibra de PVA é pequena, comprovando também que a diferença entre os teores de adição de fibra de 0,11 e 0,13% não impactou na retração.

Com o intuito de compreender a influência do tipo e do teor de fibras nas argamassas, foi realizada a análise de variância para as argamassas os diferentes tipos de fibra e os teores em comum (0,11% e 0,13%). Portanto, mostra-se na Tabela 4.8 que tanto o teor de fibra, quanto o tipo de fibra e a interação dos dois fatores influem significativamente nos resultados de retração. Esta análise já era esperada visto que cada tipo de fibra possui uma adsorção diferenciada dentro da matriz cimentícia que pode contribuir ou não para o controle da retração. E de forma análoga o teor de fibras também controlar a retração. Além disso, chama-se a atenção que a análise de variância também prova que mesmo tendo sido escolhidos dois teores próximos, em porcentagem, houve significância nos resultados de retração.

Tabela 4.8 – Análise de variância dos resultados de retração das argamassas PP011, PP013, PVA 011 e PVA013.

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	F Tab	Significância
Teor de fibra (A)	0,03	1	0,03	449,09	4,75	S
Tipo de fibra (B)	0,50	2	0,25	3872,57	3,89	S
AB	0,02	2	0,01	176,56	3,89	S
ERRO	0,00	12	0,00			
Total	0,56	17				

SQ = soma quadrática; GL = graus de liberdade; MQ = média quadrática; F = valor calculado de F; F Tab = valor tabelado de F; S = valor significativo; NS = valor não significativo; Se $F < F_{Tab}$ = efeito não significativo

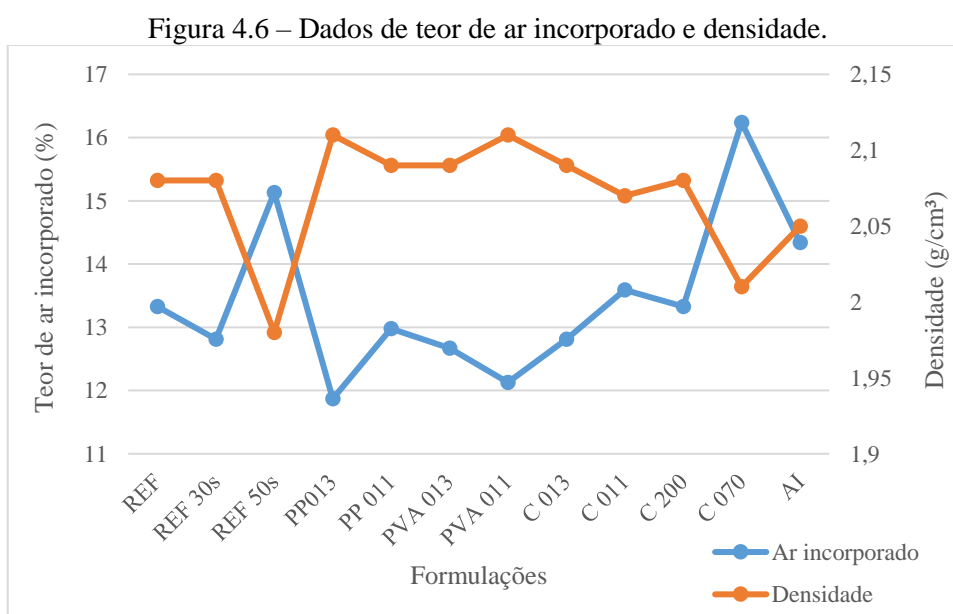
4.3. ETAPA 3 – CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS E ANÁLISE DE CUSTO

4.3.1. Estado fresco

4.3.1.1. Densidade e teor de ar incorporado

Através dos resultados obtidos (Figura 4.6) é possível identificar a influência da adição das fibras e da cinza volante no composto na incorporação de ar e consequentemente na densidade das argamassas.

As argamassas com adição de fibra de celulose incorporaram maior quantidade de ar, pois a área específica dessas fibras é muito alta o que no momento da mistura pode ter contribuído para o aprisionamento de bolhas de ar. De maneira análoga, a argamassa REF50S também incorporou mais ar, resultando em uma densidade menor que a argamassa de referência. Isso ocorreu provavelmente devido aos grãos de cimento que foram insuficientes para preencher os vazios dos grãos de cinza volante. Destaca-se que para todas argamassas foi utilizado o mesmo procedimento de mistura suprimindo assim a hipótese da má dispersão das partículas e incorporação de ar pelo método. Ademais, a argamassa industrializada também incorporou mais ar supostamente em razão de sua composição. As demais argamassas possuem valores de teor de ar incorporado e densidade bastante próximos.



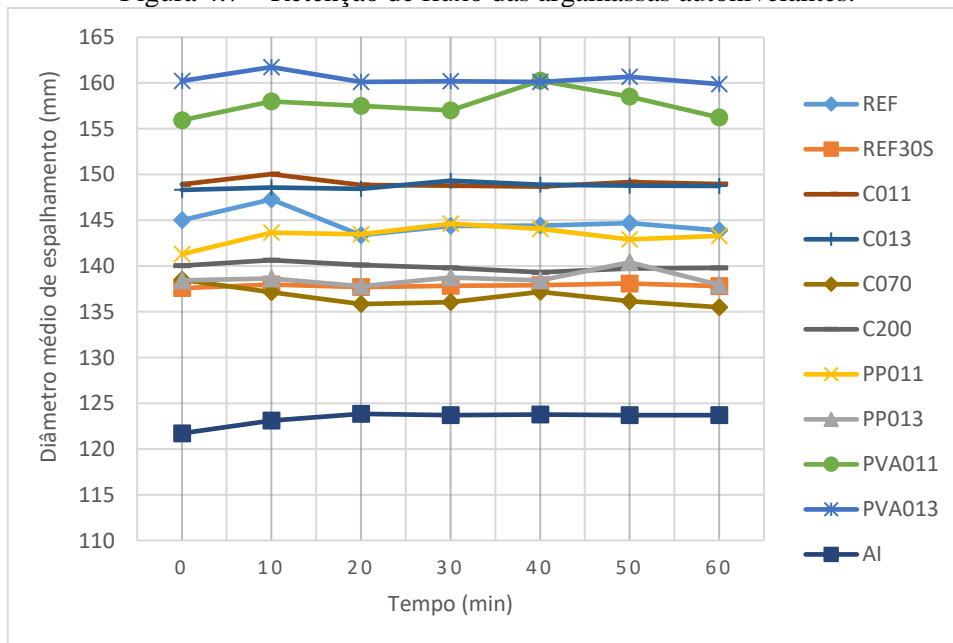
4.3.1.2. Retenção de Fluxo

As argamassas foram monitoradas por 60 min para obtenção de diâmetros de espalhamento médios a cada 10 min, e também para avaliação visual das condições de bordas através de método já descrito. As evoluções dos diâmetros médios podem ser observadas na Figura 4.7.

O teste mostrou que todas as argamassas, com exceção da argamassa C070, apresentaram um aumento mínimo do diâmetro nos primeiros 10 min, mas no decorrer do tempo o diâmetro de espalhamento se manteve praticamente constante o que significa que não houve perda da trabalhabilidade.

Nesse sentido, pode-se concluir que todas argamassas tem capacidade de retenção de fluxo igual ou maior que 60 min. Dessa forma, ressalta-se a importância do cuidado com o tempo de trabalhabilidade inicial das argamassas autonivelantes, devido a sua aplicação em obras ser através de bombeamento. Jawahar *et. al.* (2013) *apud* RILEM (2000) mencionam que para concretos auto adensáveis que também possuem a mesma condição de aplicação por bombeamento, o tempo de retenção de fluxo deve ser entre 60 e 90 min após a colocação da água na mistura.

Figura 4.7 – Retenção de fluxo das argamassas autonivelantes.



Há estudos que obtiveram sucesso na retenção de fluxo de concretos auto adensáveis até 60 min através do uso de aditivos superplastificante e promotor de

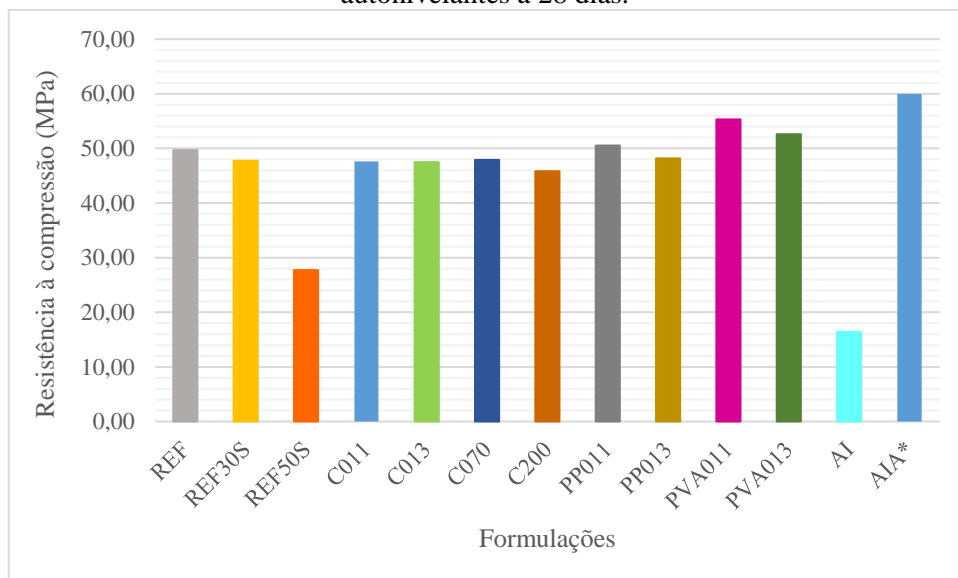
viscosidade, e da dosagem correta da relação água/cimento (JAWAHAR *et. al.*, 2013). Sendo assim, conclui-se que o ajuste das quantidades de água e aditivos das formulações contribuiu para conter a perda da trabalhabilidade das argamassas desenvolvidas nesta pesquisa.

4.3.2. Estado Endurecido

4.3.2.1. Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão se deu aos 28 dias e os CP foram mantidos em cura úmida. Para esse ensaio todos os dados obtidos em cada argamassa foram tratados, eliminando-se os valores espúrios para encontrar os resultados médios (Figura 4.8).

Figura 4.8 – Dados de resistência à compressão e teor de ar incorporado das argamassas autonivelantes a 28 dias.



Os resultados mostram que para as formulações em que o consumo de cimento foi substituído por cinza volante a resistência a 28 dias é menor em aproximadamente 4 e 56% respectivamente para REF30S e REF50S. Dados estes que eram esperados em razão da redução consumo de cimento. Além disso, essa redução é normal ao processo de ganho de resistência para compostos com adições minerais, pois 28 dias não é tempo suficiente para identificar a contribuição da cinza volante nas resistências mecânicas. A velocidade de reação na presença adições pozolânicas, como de cinza volante, é lenta, pois a pozolana

reage com o hidróxido de cálcio proveniente da reação de hidratação do cimento (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Além disso, para essas duas formulações foi necessário o aumento da quantidade de água para que as argamassas atingissem a fluidez mínima determinada para esta pesquisa, como apresentado na Tabela 4.5. Sendo assim, com o aumento da relação água/cimento (a/c) reduz-se substancialmente a resistência mecânica dos compostos visto que no estado endurecido o espaço que era ocupado pela água de amassamento consumida para hidratação do cimento, se torna um vazão que é um ponto frágil concentrador de tensões que resulta na queda da resistência. Portanto, pode-se concluir que a substituição de cinza volante alterou a resistência à compressão dos compostos, porém é necessário avaliar dados para idades mais avançadas em que as partículas de cinza apresentaram característica cimentante podendo recuperar a perda de resistência das primeiras idades.

Para mais, as argamassas desenvolvidas nesta pesquisa, com exceção à REF50S, podem ser classificadas como argamassas de alta resistência por terem atingido resistências à compressão à cima de 40 Mpa, limite mínimo prescrito pela norma para argamassas de alta resistência mecânica para pisos ABNT NBR 12041 (2012). Percebe-se, portanto, que as resistências chegaram próximas da resistência fornecida pelo fabricante da argamassa AIA.

Para as formulações com fibra de PVA obteve-se as resistências mais altas. Segundo Magalhães (2008) as fibras de PVA apresentam uma alta aderência química à matriz cimentícia, formando assim uma maior deposição de produtos hidratados na interface fibra-matriz, diminuindo a porosidade nesta região. Este fenômeno explica o aumento da resistência para as formulações com adição desse tipo de fibras.

Além disso, a melhora no desempenho de resistência à compressão também foi observada para as formulações PP011. Em contrapartida, a formulação com adição de fibra de polipropileno em 0,13% apresentou uma resistência inferior à da argamassa de referência, pois assim como foi observado que esta adição diminuiu a fluidez da argamassa também em relação à de referência. Isso pode ocorrer devido a sua característica de atração entre si o que pode ter ocasionado a aglomeração de pequenos e imperceptíveis “novelos” de fibra que quando submetidos à esforços de tensão são pontos frágeis passíveis de ruptura com menor resistência.

As diferenças em pontos percentuais dos resultados do ensaio de resistência à compressão foram no máximo 11% a mais para argamassa PVA011, e em análise estatística de variância dos dados identificou-se diferenças significativas (Tabela 4.9). Para efeito de

comparação não foi considerada a argamassa industrializada, visto que esta é uma argamassa de contrapiso que naturalmente tem uma resistência mecânica requerida muito inferior às argamassas de alta resistência desenvolvidas nesta pesquisa. Além disso, as argamassas formuladas nesta pesquisa resultaram em resistências pouco maiores em relação à argamassa desenvolvida por Souza *et. al.* (2013) a qual se escolheu a formulação para dar continuidade. Na referida pesquisa a argamassa atingiu resistência média de aproximadamente de 42,4 Mpa, e como já mencionado pode ser classificada como argamassa de alta resistência atendendo à prescrição da ABNT NBR 12041 (2012).

Por fim, foi realizada a análise de variância para o mesmo conjunto de argamassas que possui adição das diferentes fibras e dos mesmos teores (Tabela 4.9). Obteve-se que o teor e o tipo de fibra atuam individualmente no resultado de resistência à compressão. Como já citado, a quantidade de fibras no composto pode aumentar a incorporação de ar e consequentemente reduzir a resistência à compressão. Por outro lado, o tipo de fibra pode conferir ao material maior resistência devido à capacidade de resistência da própria fibra.

Tabela 4.9 – Análise de variância dos resultados de resistência à compressão das argamassas PP011, PP013, PVA 011 e PVA013.

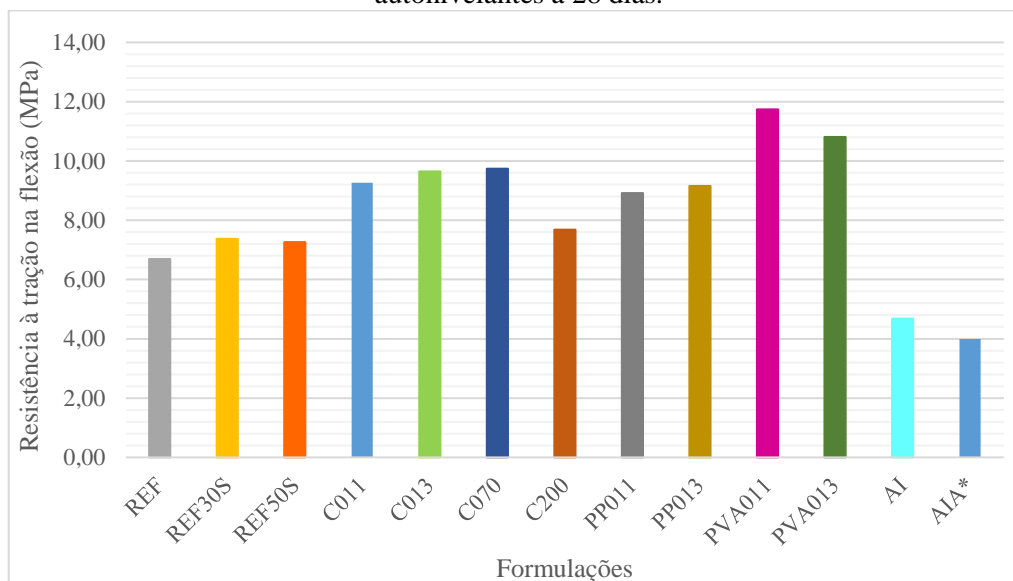
Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	F Tab	Significância
Teor de fibra (A)	27,34	1	27,34	6,85	4,17	S
Tipo de fibra (B)	260,72	2	130,36	32,69	3,32	S
AB	11,46	2	5,73	1,44	3,32	NS
ERRO	119,64	30	3,99			
Total	419,16	35				

SQ = soma quadrática; GL = graus de liberdade; MQ = média quadrática; F = valor calculado de F; F Tab = valor tabelado de F; S = valor significativo; NS = valor não significativo; Se $F < F_{Tab}$ = efeito não significativo

4.3.2.2. Resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado com os mesmos corpos de prova do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias. As médias dos resultados obtidos para esse ensaio estão apresentadas na Figura 4.9.

Figura 4.9 – Dados de resistência à tração na flexão e teor de ar incorporado das argamassas autonivelantes a 28 dias.



Em geral os resultados mostram que houve um aumento da resistência à tração na flexão a 28 dias das argamassas formuladas em relação à de referência. Ademais, as argamassas desenvolvidas nesta pesquisa novamente podem ser classificadas como argamassas de alta resistência por terem atingido resistências à tração à cima de 4 Mpa, limite mínimo prescrito pela norma para argamassas de alta resistência mecânica para pisos ABNT NBR 12041 (2012). Vale frisar que as argamassas formuladas apresentaram maior resistência à tração que as argamassas comerciais AI e AIA, principalmente as que contemplam a adição de fibras.

Novamente, para as formulações com fibra de PVA obteve-se as maiores resistências o que pode ser explicado pelo fato de que dentre as fibras é a que possui maior resistência à tração e maior capacidade de aderência à matriz cimentícia. As argamassas com fibra de polipropileno também apresentaram aumento na resistência à tração na flexão, no entanto o desempenho das argamassas com os três menores teores de adição de fibra de celulose foi ainda melhor que aquelas, pois essas fibras atuam de forma diferente. Essas promovem o aumento da resistência por promoverem de forma eficaz a distribuição da água de amassamento dentro do composto, permitindo que haja uma melhor hidratação do cimento, ao contrário do que se esperava devido à dimensão das fibras.

As diferenças em pontos percentuais dos resultados médios do ensaio de resistência à tração na flexão foram de aumento máximo de 75% para argamassa PVA011. Para efeito de comparação também não foi considerada a argamassa industrializada, visto que esta é

uma argamassa de contrapiso. Além disso, as argamassas formuladas, com exceção as argamassas REF, REF30S, REF50S e C200, resultaram em resistências maiores em relação à argamassa desenvolvida por Souza *et. al.* (2013). Na referida pesquisa a argamassa atingiu resistência média de aproximadamente de 8,6 Mpa.

Mais uma vez através da análise de variância identifica-se a significância dos fatores teor e tipo de fibra, e interação entre eles. Sendo assim, apresenta-se na Tabela 4.10 que para os resultados de resistência à tração na flexão apenas o tipo de fibra possui significância. Isso ocorre devido a capacidade de resistência de cada tipo de fibra e também devido ao comprimento de cada uma.

Tabela 4.10 – Análise de variância dos resultados de resistência à tração na flexão das argamassas PP011, PP013, PVA 011 e PVA013.

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	F Tab	Significância
Teor de fibra (A)	0,05	1	0,05	0,08	4,75	NS
Tipo de fibra (B)	16,98	2	8,49	13,44	3,89	S
AB	1,55	2	0,77	1,23	3,89	NS
ERRO	7,58	12	0,63			
Total	26,15	17				

SQ = soma quadrática; GL = graus de liberdade; MQ = média quadrática; F = valor calculado de F; F Tab = valor tabelado de F; S = valor significativo; NS = valor não significativo; Se $F < F \text{ Tab}$ = efeito não significativo.

4.3.3. Análise de custo

Afim de avaliar de forma simples parte da aplicabilidade financeira das argamassas desenvolvidas nesta pesquisa foi feito um levantamento de custos apenas dos materiais para obtenção do custo total das argamassas, e do custo da argamassa autonivelante industrializada de contrapiso (AI) caracterizada neste trabalho, e outra para pisos de alta resistência industrializada (AIA). Portanto, apresenta-se na Tabela 4.11 os resultados obtidos.

Tabela 4.11 – Custos por m² das argamassas autonivelantes e das argamassa industrializadas.

Arg.	REF	PP 013	PP 011	PVA 013	PVA 011	C013	C011	C200	C070	REF 30S	REF 50S	AI	AIA
Custo (R\$/m ²)	6,37	7,06	6,91	6,48	6,53	6,69	6,58	10,33	7,46	6,30	5,14	87,0	23,0

Dos dados obtidos verifica-se que em geral as argamassas apresentam um custo médio de R\$ 6,70/m². Apenas as argamassas C200 e REF50 apresentam valores distantes da

média, pois a primeira contém uma grande porcentagem de adição da fibra de celulose que é um material importado que importado e que conseqüentemente tem maior valor agregado. Já a segunda apresenta um valor 20% mais baixo que o da argamassa de referência, justamente porque o cimento que é o insumo de maior valor no composto foi substituído pela cinza volante.

Em contrapartida, as argamassas industrializadas possuem alto valor agregado em razão dos custos do processo de fabricação. Portanto, optou-se por apresentar os valores para título de conhecimento, mas é importante afirmar que não comparar esses valores com os calculados para argamassas formuladas.

Como visto anteriormente, as argamassas C070 e C200 apresentaram desempenho desejável nos estados fresco e endurecido, e, principalmente, obtiveram um processo de retração por secagem praticamente nulo. Ou seja, essas duas argamassas se aplicadas em uma edificação tem chances mínimas de fissurar podendo ser, então, materiais de alta durabilidade. No entanto, essas são as argamassas que possuem maior custo dentre as formuladas neste trabalho.

Por outro lado, houve um grupo de argamassas em que foram obtidos valores de retração desejáveis (C011, C013, C070, C200, PP011, PVA013, REF50S). Desse grupo, pode-se notar que as argamassas que PP011 e PVA013 apresentam custos inferiores, quando comparadas a C070 e C200 de retração quase nula. Dessa forma, pode-se dizer que pelo fato dessas duas argamassas terem atendido aos requisitos esperados de desempenho de nos estados fresco e endurecido, e quanto à retração, elas possuem um melhor custo benefício.

Quanto à REF50S, em razão da substituição parcial do cimento ela apresentou uma resistência mecânica inferior que as demais, quase 50% menor. Por isso, é uma argamassa que pertence a uma classe de argamassas diferente das demais, ou seja, pode ser utilizada para produção pisos comuns, que exigem menor resistência, e não deve ser comparada com as demais argamassas. Por fim, essa argamassa apresenta um custo menor em relação às demais justificado pela menor quantidade de cimento no composto, que é o material de maior custo. De toda forma, a mesma também apresentou os requisitos de desempenho desejáveis, mas apenas deve ser direcionada para um tipo diferente de aplicação que seria para contrapisos devido ao seu desempenho mecânico.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho promoveu o desenvolvimento de argamassas autonivelantes para piso através de metodologia proposta e avaliou o processo de retração por secagem a fim de conferir maior durabilidade às argamassas. Para tanto, foram produzidas argamassas com teor de adição mineral em substituição parcial de cimento e outras com emprego de fibras. Além disto, as argamassas foram caracterizadas a fim de compreender a influência da formulação no desempenho dos estados fresco e endurecido, tendo em vista que principalmente às características de alta fluidez e ausência de segregação deveriam ser mantidas para se caracterizar esse tipo de argamassa, dentre outras características também secundárias discutidas nesse trabalho.

Quanto à composição das argamassas autonivelantes verificou-se que a proporção dos componentes, em especial a dosagem de aditivos e água, na mistura mostra-se muito influente na coesão da mistura. Destaca-se a sensibilidade do teor de aditivos superplastificante e VMA que quando em excesso provocam fenômenos de segregação e exsudação, respectivamente.

A substituição de parte do cimento por cinza volante influenciou diretamente na fluidez das argamassas. Esse resultado é explicado pelo aumento de partículas intermediárias às do cimento e agregado miúdo aumentando o consumo de água para envolver os grãos e promover a fluidez. Porém, a fluidez desejada foi alcançada mesmo com a cinza volante sendo de uma fração mais grossa que o cimento.

Quanto à adição das fibras, foi observado que para as formulações com fibras de celulose e PVA o espalhamento das argamassas aumentou consideravelmente em relação a argamassa de referência, ao contrário do que se esperava. Este comportamento é explicado pela distribuição da água de amassamento pelas fibras de celulose, e pela afinidade química pela matriz cimentícia. Já as argamassas com adição de fibras de polipropileno também apresentaram fluidez desejada e ainda mais são materiais com o custo bem inferior aos demais tipos.

Da análise da variação dimensional, o objetivo de controle da retração apenas não foi alcançado para as formulações REF30S e PVA013. Pressupõe-se que nessas argamassas houve a aglomeração de partículas aumentando a quantidade de vazios que exerceram como capilares fomentando a retração de secagem. Salienta-se que as argamassas com maiores teores de fibra de celulose (C070 e C200) apresentaram retrações quase nulas.

Quanto à incorporação de ar, as argamassas com fibra de celulose apresentaram maiores resultados em razão de sua elevada área específica que certamente proporcionou o aprisionamento de bolhas de ar. Do mesmo modo, a argamassa REF50S também apresentou maior teor de ar incorporado em razão dos grãos de cimentos não terem sido suficientes para preencher os vazios das partículas de cinza, que neste trabalho se apresentaram maiores que os de cimento.

Das avaliações de retenção de fluxo, notou-se que no decorrer de 60 min praticamente as argamassas se mantêm fluidas. Portanto, esse resultado favorece a aplicação das argamassas sem prejuízo de perda da trabalhabilidade inicial e comprometimento de produtividade de aplicação.

Quanto às resistências mecânicas, aos 28 dias foram obtidos valores que permitem classificar as argamassas formuladas como argamassas autonivelantes para pisos de alta resistência. Os valores médios para todas as argamassas formuladas, com exceção a REF50S, são de 49 MPa e 9 Mpa para resistências à compressão e tração na flexão respectivamente. Para a argamassa REF50S obteve-se aproximadamente 28 MPa e 7 Mpa, respectivamente. No entanto, essa redução é normal ao processo de ganho de resistência para compostos com adições minerais e 28 dias não é tempo suficiente para identificar a contribuição da cinza volante nas resistências mecânicas. Resistências maiores serão obtidas após 60 dias, devido à reação pozolânica.

Por fim, os custos das argamassas autonivelantes formuladas nesta pesquisa não podem ser comparados aos custos das argamassas industrializadas. Desse modo, é importante calcular os custos para produção e comercialização das argamassas, adicioná-los ao custo bruto do produto para então compor um valor final e verificar as vantagens econômicas das argamassas estudadas.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos com o programa experimental e com as limitações desta pesquisa sugere-se como trabalhos futuros:

- estudo do perfil reológico de argamassas autonivelantes;
- verificação da aplicação prática em obra das argamassas autonivelantes com fibras determinadas nesta pesquisa e outras dosagens;
- estudo isolado dos tipos de retração em argamassas autonivelantes;

- emprego de outros tipos de adições minerais e em dosagens diversas de forma a reduzir o consumo de cimento em maior proporção.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS. *NBR 7584: Concretos endurecidos – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão – Método de ensaio*. ABNT, Rio de Janeiro, 2012.

_____. *NBR 12041: Argamassa de alta resistência para pisos – Determinação da resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral*. ABNT, Rio de Janeiro, 2012.

_____. *NBR 13277: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água – Método de ensaio*. ABNT, Rio de Janeiro, 2005.

_____. *NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado – Método de ensaio*. ABNT, Rio de Janeiro, 2005.

_____. *NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão – Método de ensaio*. ABNT, Rio de Janeiro, 2005.

_____. *NBR 12528: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência à tração – Método de ensaio*. ABNT, Rio de Janeiro, 2010.

_____. *NBR 15261: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear) – Método de ensaio*. ABNT, Rio de Janeiro, 2005.

_____. *NBR 15839: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método squeeze-flow – Método de ensaio*. ABNT, Rio de Janeiro, 2010.

_____. *NM 09: Concreto e argamassa – Determinação dos tempos de pega por meio de resistência à penetração – Método de ensaio*. ABNT, Rio de Janeiro, 2003.

_____. *NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone – Método de ensaio*. ABNT, Rio de Janeiro, 1998.

ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 224.1R-93 – *Causes, evaluation and repair of cracks in concrete structures*. Manual of Concrete Practice, Detroit, 1998.

AGOPYAN, V. Exemplo de aplicação da ciência dos materiais de construção civil – o caso dos materiais fibrosos. Simpósio de desempenho de materiais e componentes de construção civil, I, *Anais...*p. 34 – 42, Florianópolis, 1988.

AHMED, S. F. U.; MIHASHI, H. Strain hardening behavior of lightweight hybrid polyvinyl alcohol (PVA) fiber reinforced cement composites. *Materials and Structures*, v. 44, p. 1179-1191, 2011.

AÏTCIN, P. C. *Concreto de alto desempenho*. Tradução de Geraldo G. Serra. Ed. PINI, São Paulo, 2000.

ANJOS, M. A. S. *Adição do resíduo de biomassa de cana-de-açúcar em pastas para cimentação de poços petrolíferos de óleos pesados*. Tese de doutorado em Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2009.

ASTM – American Society for Testing and Materials. *C 1708: Standard Test Methods for Self-leveling Mortars Containing Hydraulic Cements*. ASTM, 2012.

BALAGURU, P. N.; SHAH, S. P. *Fiber-Reinforced Cement Composites*. McGraw-Hill International Editions. Civil Engineering Series. Singapore, 1992.

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

BARROS, M. M. B.; SABBATINI, F. H. *Tecnologia de produção de contrapiso para edifícios habitacionais e comerciais*. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1991.

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

BENTUR, A.; MINDESS, S. *Fibre reinforced cementitious composites*. Elsevier Science Publishers Ltd. London, 1990.

BISSONNETTE, B.; PIERRE, P.; PIGEON, M. Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, v. 29, n. 10, p. 1655 – 1662, 1999.

BUFFO-LACARRIERE, L. *Prevision et evaluation de la fissuration precoce des ouvrages en beton*. Tese de doutorado do Institut National de Sciences Appliquées, França, 2007.

CAMPELLO, E. F. *Comportamento mecânico de argamassas reforçadas por fibras sintéticas e metálicas*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Universidade Federal Fluminense. Niterói, RJ, 2013.

CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Caracterização reológica de argamassas pelo método de Squeeze-flow. Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassa, VI. *Anais...* Florianópolis, 2005.

CHEN, W.; BROUWERS, H. J. H. The hydration of slag, part 1: reaction models for alkali-activated slag. *Journal Materials Science*, v. 42, p. 428 – 332, 2007.

CHRISTIANO, H. A. *Effect of chemical and mineral admixtures on the fresh properties of self-compacting mortars*. Master of Science in civil engineering. Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, August, 2004.

COSTA, F. L.; SCHMIDT, M. V.; GLEIZE, P. J. P.; GÓMEZ, L. A. Metodologia para verificação da ocorrência e evolução de fissuras em argamassas cimentícias. Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, VI. *Anais...* Florianópolis, 2006.

DE LA PEÑA, B. Hormigón autocompactante. In: *Revista BIT*, Junho, 2001.

DO, J.; SOH, Y. Performance of polymer-modified self-leveling mortars with high polymer-cement ratio for floor finishing. *Cement and Concrete Research*, v. 33, p. 1497-1505, nov. 2003.

EFNARC – EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS. *Specification and guidelines for polymer-modified cementitious flooring as wearing surfaces for industrial and commercial use*. United Kingdom, 2001.

ESPING, O. *Early age properties of self-compacting concrete – Effects of fine aggregate and limestone filler*. Thesis for the degree of doctor of philosophy of the Department of Civil and Environmental Engineering of Chalmers University of Technology. Sweden, 2007.

FELEKOĞLU, B.; TOSUN, K.; BARADAN, B.; ALTUN, A.; UYULGAN, B. The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self-compacting repair mortars. *Cement and Concrete Research*. v. 36, p. 1719 – 1726, 2006.

FIGUEIREDO, A. D. *Concreto com fibras de aço*. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, BT/PCC/260, p. 58, 2000.

FRACALOSSI, R. A. R. *Aditivos à base de policarboxilatos: influência nos tempos de pega e na manutenção do abatimento em pastas de cimento portland*. Trabalho de diplomação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

FRANÇA, M. S.; PILEGGI, R. G. Avaliação de sequências de mistura no preparo de argamassas com fibras de pva. Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, XI. *Anais...* Porto Alegre, 2015.

FREITAS, E. R.; BORJA, E. V.; ANJOS, M. A. S.; PEREIRA, A. C.; VIANA, J. S. Estudo das adições e aditivos minerais nas propriedades de argamassas auto-nivelantes. *Anais... V CONNEPI*. Maceió, 2010.

FREITAS, J. C. *Uso de aditivo redutor de retração no combate à retração em argamassas auto-adensáveis de alta resistência*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

GASPARO, A.; HERWEGH, M.; ZURBRIGGEN, R.; SCRIVENER, K. Quantitative distribution patterns of additives in self-leveling flooring compounds (underlayments) as function of application, formulation and climatic conditions. *Cement and Concrete Research*, v.39, p. 313-323, dec. 2008.

GETTU, R.; RONCERO, J. Aditivos superfluidificantes para hormigones de latas prestaciones. Simpósio sobre aditivos para hormigones, IV, *Anais...*Madrid, 1998.

GIROTTI, 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.

GIROTTI, L.S.; BARBOSA, M.P.; MACIEL, G.F. Avaliação do comportamento reológico na retração plástica e na fissuração de argamassa de concreto auto-adensável. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*. v.7, p. 24-52, fev. 2014.

GOMES, A. O.; GONÇALVES, J. P. Inovações tecnológicas em canteiros de obras. Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassa, V. *Anais...* Fortaleza, 2013.

GOWDA, M. R.; NARASIMHAN, M. C.; KARISIDDAPPA. Development and study of the strength of self-compacting mortar mixes using local materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 23, n. 5, p. 526 – 532, 2011.

GUIMARÃES, M. B. Polímeros dispersíveis para argamassas autonivelantes. Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassa, V. *Anais...* Fortaleza, 2013.

HAMMER, T. A. *Deformations, strain capacity and cracking of concrete in plastic anearly hardening phases*. Thesis for the degree of doctor of Norwegian University of Science and Technology, 2007.

HARTMANN, C. T. *Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilatos destinados a concretos de cimento Portland*. Dissertação de mestrado em Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica de São Paulo, 2002.

HASPARYK, N. P.; LOPES, A. N.; ANDRADE, M.; SANTOS, S. B. *Deformações por retração e fluência*. Concreto – Ensino, Pesquisa e Realizações. 1 ed. Ed. G. C. Isaia. Ibracon, 2005.

HENKENSIEFKEN, R.; BRIATKA, P.; BENTZ, D.; NANTUNG, T.; WEISS, J. Plastic Shrinkage Cracking in Internally Cured Mixtures Made with Pre-wetted Lightweight Aggregate. *Concrete International*, v. 32 (2), p. 49-54, 2010.

HOLLAWAY. Polymers and polymer composites. *Construction Materials*, 2 ed., Ed. E & FN SPON, 1994.

HOLT, E. E. Early ages autogenous shrinkage of concrete. *Technical Research Center of Finland*, ESPOO, 2001.

HOLT, E. E.; LEIVO, M. E. Cracking risks associated with early age shrinkage. *Cement & Concrete Composites*, v. 26, p. 521-530, 2004.

JAWAHAR, J. G. et al. Optimization of superplasticiser and viscosity modifying agent in self-compacting mortar. *Asian Journal of Civil Engineering*. Vol. 14, nº 1, 2013.

JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F. Autogenous deformation and RH-change in perspective. *Cement and Concrete Research*, v. 31, n. 12, p. 1859 – 1865, 2001.

JONGVISUTTISUN, P.; NEGRELLO, C.; KURTIS, K. E. Effect of processing variables on efficiency of eucalyptus pulps for internal curing. *Cement and Concrete Composites*, v. 37, p. 126 – 135, 2013.

JUAREZ, C. A.; FARJADO, G.; MONROY, A.; DURAN-HERRERA, A.; VALFEZ, P.; MAGNIONT, C. Comparative study between natural and PVA fibers to reduce plastic shrinkage cracking in cement-based composite. *Construction and Building Materials*, v. 91, p. 164 – 170, 2015.

KANTRO, D.L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste - A miniature slump test. *Cement, Concrete and Aggregates*, v. 2, n. 2, p. 95-102, 1980.

KAWASHIMA, S.; SHAH, S. Early-age autogenous and drying shrinkage behavior of cellulose fiber-reinforced cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, v. 33, p. 201 – 208, 2011.

LAPLANTE, P.; BOULAY, C. Evolution du coefficient de dilatation thermique du béton en fonction de sa maturité aux tout premiers ages. *Materials and Structures*, v. 27, n. 10, p. 596 – 605, 1994.

LUNDHOLM, M.; LAVRELL, G.; MATHIASSEN, L. Self-leveling mortar as a possible cause of symptoms associated with “Sick Building Syndrome”. *Archives of Environmental Health*, v. 45, n. 3, p. 135 – 140, 1990.

HUA, C.; ACKER, P.; EHRLACHER, A. Analyses and models of autogenous shrinkage of hardening cement paste. *Cement and Concrete Research*, v. 25, n. 7, p. 1457 – 1468, 1995.

KATSIADRAMIS, N. J.; SOTIROPOULOU, A. B.; PANDERMARAKIS, Z. G. Rheological and mechanical response modifications for a self-leveling mortar. *EPJ Web of Conferences*, v. 6, 2010.

KAUFMANN, J.; WINNEFELD, F.; HESSELBARTH, D. Effect of the addition of ultrafine cement and short fiber reinforcement on shrinkage, rheological and mechanical properties of Portland cement pastes. *Cement and Concrete Composites*, v. 26, n. 5, p. 541 – 549, 2004.

KHALEEL, O. R.; RAZAK, H. A. The effect of powder type on the setting time and self compactability of mortar. *Construction and Building Materials*, v. 36, p. 20 -26, 2012.

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

MARTINS, E. J. *Procedimento para dosagem de pastas para argamassa autonivelante*. Dissertação de Mestrado em Construção Civil – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009.

MASSAZA, F. Pozzolanic Cements. *Cement and Concrete Composites*, v. 15, p. 185 – 214, 1993.

MEHDIPOUR, I.; RAZZAGUI, 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*, v. 40, p. 1029 – 1037, 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. Ed. Ibracon, São Paulo, 2014.

MELO, R. *Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de fíler calcário*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

MELO NETO, A. A. *Estudo da retração em argamassa com cimento de escória ativada*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade Federal de São Paulo, 2002.

MELO NETO, A. A. *Influência de aditivos redutores e compensadores de retração em argamassas e pastas com cimento de escória aditivada*. Tese de doutorado em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade Federal de São Paulo, 2008.

MIHASHI, H.; LEITE, J. P. B. State-of-art report on control of cracking in early age concrete. *Journal of advance concrete technology*, v. 2, n. 2, p. 141 – 154, 2004.

MINDESS, S.; YOUNG, J. F. *Concrete*. Ed. Prentice-Hall, New Jersey, 1981.

MOHAMED, A. R.; HANSEN, W. Prediction of stresses in concrete pavements subject to non-linear gradients. *Cement and Concrete Composites*, v. 18, n. 6, p. 381 – 387, 1996.

MONTE, R. *Avaliação de metodologia de ensaios destinadas à verificação da eficiência de aditivos superplastificantes em pastas de cimento Portland*. Dissertação de mestrado em Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2003.

NAKAKURA, E. H.; BUCHER, H. R. E. Pisos Auto-nivelantes. Propriedades e Instalações. Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, II. *Anais...* Salvador, 1997.

NAWA, T.; HORITA, T. Autogenous shrinkage of high-performance concrete. International Workshop on Microstructure and Durability to Predic Service Life of Concrete Structures, *Anais...* Sapporo, 2004.

NEVILLE, A. M. *Properties of concrete*. 3 ed. Ed. Pitman, 1981.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto*. 2 ed. Ed. PINI, São Paulo, 1997.

NITA, C. *Utilização de pozolanas em compósitos de cimento reforçados com fibras de celulose e pva*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

OLIVEIRA, M. L. L. *Influência da adição de fibras de polipropileno em argamassas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001.

ORTEGA, A. G. Mortero Autonivelante. *III Jornadas Iberoamericano de Materiales de Construcción*. San Juan, 2003.

PANESAR, D. K.; SHINDMAN, B. The effect of segregation on transport and durability properties of self-consolidating concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 42, p. 252 – 264, 2012.

PILEGGI, R. G. *Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários*. Tese de doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2001.

REPETTE, W. L. *Concretos de última geração: presente e futuro*. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. Ed. G. C. Isaia. V. 2. Ibracon, São Paulo, 2005.

RETTENMAIER, J.; SÖHNE. *Welcome to the world of fibers*. Germany, 2012.

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

RUBIN, A. P. *Argamassas autonivelantes industrializadas para contrapiso: análise do desenvolvimento físico-mecânico frente às argamassas dosadas em obra*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2015.

SAFIUDDIN, Md.; WEST, J. S.; SOUDKI, K. A. Flowing ability of the mortars formulated from self-compacting concretes incorporating rice husk ash. *Construction and Building Materials*, v. 25, p. 973 – 978, 2011.

SAHMARAN, M.; CHRISTIANTO, H. A.; YAMAN, I. O. The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars. *Cement & Concrete Composites*, v.28, p. 432-440, jan. 2006.

SARVARANTA, L.; MIKKOLA, E. Fibre mortar composites under fure conditions: effects of ageing and moisture content of specimens. *Materials and Structures*, v. 27, p. 532 – 538, 1994.

SAVASTANO JR, H; AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. Tecnologia para o desenvolvimento de telhas de fibrocimento – CIM-CEL. *Coletânea Habitar – Inovação tecnológica na construção habitacional*. v. 6, p.22. Porto Alegre, 2006.

SCHAEFER, C. O. *Valorização de fonte alternativa de sulfato de cálcio para a produção de argamassas autonivelantes*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2013.

SÉBAÏBI, Y.; DHEILLY, R. M.; QUÉNEUDEC, M. Study of the water-retention capacity of a lime-sand mortar: Influence of the physicochemical characteristics of the lime. *Cement and Concrete Research*, v. 33, p. 689 – 696, 2003.

SEIFERT, S.; NEUBAUER, J.; GOETZ-NEUNHOEFFER, F. *Spatially resolved quantitative in-situ phase analysis of a self-leveling compound*. University of Erlangen-Nuremberg, Schlossgarten. Erlangen, Germany, 2011.

SILVA, E.R.; COELHO, J.F.J.; BORDADO, J.C. Hybrid polyethylene/polypropylene blended fiber-reinforced cement composite. *Journal of Composite Materials*, v.47, p. 3131-3141, oct. 2012.

SIVA, N. G. *Avaliação da retração e da fissuração em revestimento de argamassa na fase plástica*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2011.

SILVA, R. P. *Argamassas com adição de fibras de polipropileno – Estudo do comportamento reológico e mecânico*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

SILVA, R. P.; BARROS, M. D. B.; JOHN, V. M. Influência do método de mistura na produção de argamassas com fibras. Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassa, VII. *Anais...Recife*, 2007.

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, 2013.

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

TANESI, J.; AGOPYAN, V. Compósitos reforçados com fibras plásticas para construção civil. Encontro Tecnologia de Sistemas Plásticos na Construção Civil, II, 1997, São Paulo. *Anais... p. 219-252*. São Paulo: EPUSP, 1997.

TAYLOR, H. F. *Cement chemistry*. 2 ed. Ed. T. Telford, London, 1997.

TAZAWA, E.; SATO, R.; SAKAI, E.; MIYAZAWA, S. Work of JCI Committee on autogenous shrinkage – Proceedings of international workshop on shrinkage of concrete “Shrinkage 2000”. *Anais...Hiroshima*, 2000.

TAZAWA, E.; MIYAZAWA, S. KASAI, T. Chemical Shrinkage and autogenous shrinkage of hydrating cement paste. *Cemente and Concrete Research*, v. 25, n. 2, p. 288 – 292, 1995

TELLO, R.; RIBEIRO, F. *Guia CBIC de boas práticas em sustentabilidade na indústria da Construção*. Nova Lima: Fundação Dom Cabral. Brasília, 2012.

TUCRY, P.; LOUKILI, A. Evaluation of plastic shrinkage cracking of self-consolidating concrete. *ACI Journal*, p. 272 – 279, 2006.

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, sept. 2012.

TUTIKAN, B. F. *Método para dosagem de concretos auto-adensáveis*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

TUTIKAN, B. F., DAL MOLIN, D. C. *Concreto auto-adensável*. Ed. PINI, São Paulo, 2008.

TVIKSTA, L. *SCC: Guideline, task 9 and product*. Brite EuRam Construct No BRPR – CT96-0366, p. 48, 2000.

UNE – UNA NORMA ESPAÑOLA – *EN 13813: Screed materials and floor screeds – Definitions*. UNE, 2002.

URBE, L. J. M. Y. *Desenvolvimento e avaliação de argamassa translúcida com fibra ótica polimérica*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2010.

VEIGA, M. R. *Comportamento de argamassas de revestimento de paredes*. Lisboa, Portugal, 1998.

WANG, X. H.; JACOBSEN, S.; HE, J. Y.; ZHANG, Z. L.; LEE, S. F.; LEIN, H. L. Application of nanoindentation testing to study of the interfacial transition zone in steel fiber reinforced mortar. *Cement and Concrete Research*, v. 39, p. 701 – 715, may 2009.

WBCSD - World Business Council for Sustainable Development (2012) Diretrizes para o Relatório e Monitoramento das Emissões na Indústria de Cimento. Iniciativa para a Sustentabilidade do Cimento. Brasília. 40 pp. v. 02

WITTMANN, F.; BELTZUNG, F.; ZHAO, T. J. Shrinkage mechanisms, crack formation and service life of reinforced concrete structures. *International Journal of Structural*, v. 1, n. 1, 2009.

ZENG, Z.; FELDMAN, D. Synthetic fibre-reinforced concrete. *Progress in Polymer Science*, v. 20, p. 185 – 210, 1995.

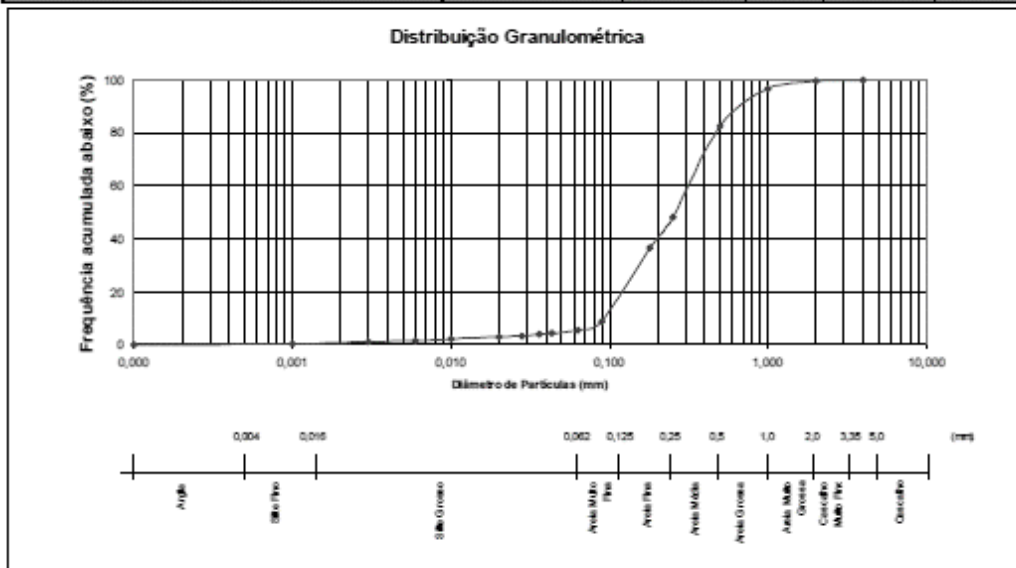
ZHU, W.; BARTOS, P. J. M. Permeation properties of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 33, p. 921 – 926, 2003

ZHU, Y.; MA, B.; LI, X.; HU, D. Ultra high early strength self-compacting mortar based on sulfoaluminate cement and silica fume. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed*, oct. 2013.

ANEXOS

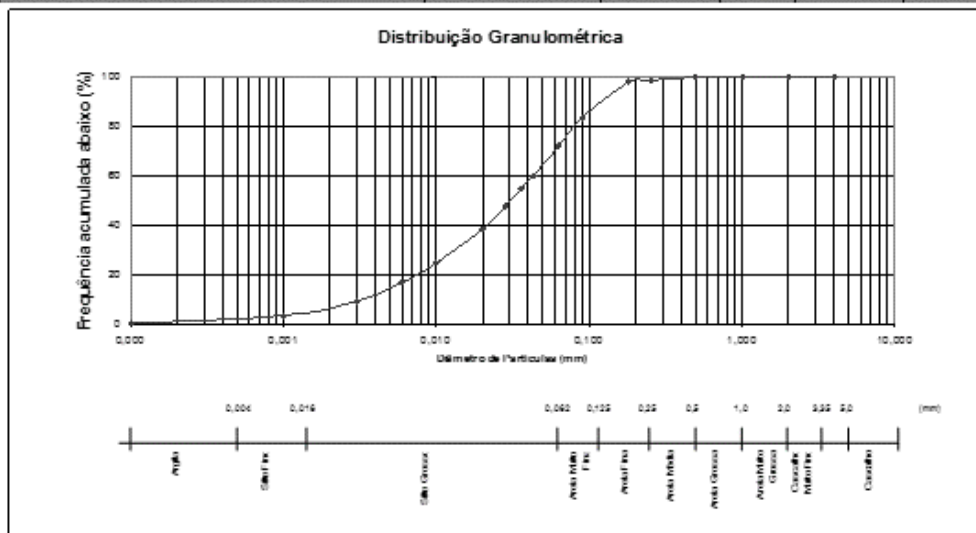
ANEXO 01 – GRANULOMETRIA DA AREIA

UFPR		RESULTADOS DE ANÁLISE			LAMIR	
GRANULOMÉTRICA INTEGRADA GEOLÓGICA						
POR PENEIRAMENTO E DIFRAÇÃO DE LASER						
Cliente:	Sarah Honorato Lopes		Peneiramento	Integrado		
Material:	Cinza		Equipamento	Peneiras Bertel + Laser Cilas 1084		
Nº Lamir	016/15 01		Nº DNPM			
Nome da Amostra	Areia - AC 101214		Técnico	Elielane R. Pecolini		
Massa Inicial (g):	200,00		Data:	12/02/2015		
MALHAS (TYLER)	ABERTURA (mm)	MASSA RETIDA (g)	% PESO	% ACUMULADA ACIMA	% ACUMULADA ABAIXO	
6	4,000	0,00	0,00	0,00	100,00	
8	2,000	0,88	0,50	0,50	89,50	
18	1,000	6,81	2,81	3,30	86,70	
32	0,600	27,88	13,89	17,28	82,71	
60	0,250	88,78	34,38	61,87	48,33	
Laser	0,180	23,23	11,81	83,28	38,72	
Laser	0,080	68,22	28,11	81,38	8,81	
Laser	0,063	8,18	3,08	84,48	6,52	
Laser	0,043	2,08	1,04	86,52	4,48	
Laser	0,036	1,08	0,53	88,05	3,96	
Laser	0,028	1,22	0,61	88,88	3,34	
Laser	0,020	0,96	0,47	87,13	2,87	
Laser	0,010	1,80	0,80	87,94	2,08	
Laser	0,008	0,96	0,48	88,41	1,68	
Laser	0,003	1,14	0,57	88,98	1,01	
Laser	0,001	1,31	0,68	89,64	0,38	
Laser	0,000	0,72	0,38	100,00	0,00	
MASSA FINAL (g):		200,00	Finos abaixo #60 - Micrômetros			
			Diâmetro 10%	48,10	Diâmetro 50%	239,38
			Diâmetro 90%	137,48	Diâmetro médio	148,48



ANEXO 02 – GRANULOMETRIA DA CINZA VOLANTE

UFPR		RESULTADOS DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA INTEGRADA GEOLÓGICA POR PENEIRAMENTO E DIFRAÇÃO DE LASER			LAMIR	
Cliente:	Sarah Honorato Lopes		Peneiramento	Integrado		
Material:	Cinza		Equipamento	Peneiras Bertel + Laser Cilas 1084		
Nº Lamir	016/1602		Nº DNPM			
Nome da Amostra	Cinza Volante - CV 101214		Técnica	Eliisiane R. Pesolini		
Massa Inicial (g):	200,00		Data:	12/02/2016		
MALHAS (TYLER)	ABERTURA (mm)	MASSA RETIDA (g)	% PESO	% ACUMULADA ACIMA	% ACUMULADA ABAIXO	
6	4,000	0,00	0,00	0,00	100,00	
9	2,000	0,00	0,00	0,00	100,00	
18	1,000	0,00	0,00	0,00	100,00	
32	0,600	0,13	0,06	0,07	99,93	
60	0,250	2,78	1,39	1,48	98,54	
Laser	0,150	1,38	0,68	2,14	97,88	
Laser	0,090	23,89	14,60	18,83	83,37	
Laser	0,063	22,89	11,34	27,97	72,03	
Laser	0,043	23,83	11,91	39,89	60,11	
Laser	0,038	10,74	5,37	45,26	54,74	
Laser	0,028	14,78	7,38	52,84	47,38	
Laser	0,020	17,72	8,88	61,60	38,60	
Laser	0,010	23,03	14,01	75,61	24,49	
Laser	0,008	16,31	7,88	83,17	16,83	
Laser	0,003	16,73	7,88	91,03	9,17	
Laser	0,001	11,67	5,78	96,82	3,18	
Laser	0,000	6,37	3,18	100,00	0,00	
MASSA FINAL (g):			200,00			
			Finos abaixo #60 - Micrômetros			
			Dímetro 10%	3,30	Dímetro 90%	107,88
			Dímetro 50%	28,92	Dímetro médio	43,88



APÊNDICES

APÊNDICE 01 – DADOS DA ANÁLISE VISUAL E DA RETENÇÃO DE FLUXO

Formulação	Argamassa			Diâmetro médio de espalhamento (mm)							
				0 min				10 min			
	Borda	Exsud.	Seg.	d1	d2	d3	dM	d1	d2	d3	dM
REF	OK	N	N	142,2	147,79	144,54	144,84	147,03	147,53	143,73	146,10
REF30S	OK	N	N	137,32	137,83	137,55	137,57	136,85	139,07	137,84	137,92
REF50S	OK	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-
AI	OK	N	N	119,57	123,85	125,25	122,89	122,42	123,75	123,83	123,33
PP013	Ok	N	N	134,13	142,76	139,18	138,69	132,9	144,37	139,53	138,93
PP011	OK	N	N	138,49	144,09	145,74	142,77	139,25	148,06	146,49	144,60
PVA013	OK	N	N	155,92	155,78	169	160,23	156,23	161	168	161,74
PVA011	OK	N	N	155,87	156	165	158,96	158	158	161	159,00
C013	OK	N	N	145,97	150,66	149,17	148,60	145,19	151,96	149,18	148,78
C011	OK	N	N	145,17	152,65	147,19	148,34	146,92	153,17	150,97	150,35
C200	OK	N	N	139,55	140,52	141,43	140,50	139,97	141,31	141,3	140,86
C070	OK	N	N	137,39	139,59	138,05	138,34	134,34	139,96	137,97	137,42

Legenda: Exsud. – exsudação; Seg. – segregação; OK – borda uniforme; N – não consta; dn - diâmetro de espalhamento; n – quantidade de leituras; dM – diâmetro médio de espalhamento

Formulação								
	20 min				30 min			
	d1	d2	d3	dM	d1	d2	d3	dM
REF	141,43	145,32	149,56	145,44	142,21	146,52	141,46	143,40
REF30S	137,1	138,28	137,4	137,59	135,12	140,55	135,55	137,07
REF50S	-	-	-	-	-	-	-	-
AI	123,42	124,26	123,1	123,59	123,4	124	123,53	123,64
PP013	132,44	143,13	140,83	138,80	133,3	144,2	140,47	139,32
PP011	138,69	148,24	147,13	144,69	139,18	150,06	146,55	145,26
PVA013	155,4	157	168	160,13	156,54	157	167	160,18
PVA011	157	158	165	160,00	156	158	166,5	160,17
C013	144,99	151,91	150,16	149,02	147,83	150,82	148,21	148,95
C011	146,07	151,62	149,76	149,15	145,71	151,83	148,57	148,70
C200	139,65	140,59	142,3	140,85	139	140,58	140,74	140,11
C070	132,34	139,32	137,52	136,39	133,14	138,96	137,87	136,66

Legenda: Exsud. – exsudação; Seg. – segregação; OK – borda uniforme; N – não consta; dn - diâmetro de espalhamento; n – quantidade de leituras; dM – diâmetro médio de espalhamento

Formulação	Leituras											
	40 min				50 min				60 min			
	d1	d2	d3	M	d1	d2	d3	M	d1	d2	d3	M
REF	142,62	146,18	138,58	142,46	143,37	146,02	143,05	144,15	142,66	145,13	142,07	143,29
REF30S	135,37	140,46	135,77	137,20	137,33	138,85	137,27	137,82	134,93	140,65	136,03	137,20
REF50S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AI	123,71	123,83	123,39	123,64	123,7	123,68	123,73	123,70	123,51	123,91	122,91	123,44
PP013	133,9	142,97	140,48	139,12	132,54	148,27	145,75	142,19	133,5	142,41	140,66	138,86
PP011	139,13	148,96	147,01	145,03	138,6	147,18	145,86	143,88	138,05	148,53	144,8	143,79
PVA013	156,36	157	167	160,12	156,05	159	167	160,68	155,65	157	167	159,88
PVA011	156,5	164	161	160,50	156	161	164	160,33	155	157,5	167	159,83
C013	146,5	151,28	147,72	148,50	145,99	151,6	148,87	148,82	145,79	151,68	147,74	148,40
C011	146,2	151,16	149,05	148,80	146,68	151,68	148,22	148,86	146,24	151,7	147,2	148,38
C200	138,64	139,99	141,2	139,94	139,29	140,16	141,05	140,17	138,94	140,63	140,49	140,02
C070	134,75	139,61	136,88	137,08	132,22	140,09	137,13	136,48	131,93	139,05	136,62	135,87

Legenda: Exsud. – exsudação; Seg. – segregação; OK – borda uniforme; N – não consta; dn - diâmetro de espalhamento; n – quantidade de leituras; dM – diâmetro médio de espalhamento

APÊNDICE 02 – DADOS DA ANÁLISE DE VARIAÇÃO DIMENSIONAL

REF	$\epsilon 0$	$\epsilon 1$	$\epsilon 7$	$\epsilon 14$	$\epsilon 21$	$\epsilon 28$	Média	Desvio	Máx.
CP2	0	-0,205	-0,676	-0,916	-0,927	-1,245	0,7323	0,011	0,0474
CP3	0	-0,172	-0,647	-0,913	-0,775	-1,267	0,7069	0,0364	
CP4	0	-0,216	-0,801	-1,001	-0,872	-1,248	0,7907	0,0474	
Média do dia	0	-0,198	-0,708	-0,944	-0,858	-1,253	0,7433	-	
Médias umidade	50,25	50,2	52,3	55,55	57,65	53,4	53,079	-	
Médias temperatura	21,4	21,9	21	21,4	21,55	21,1	21,407	-	

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

REF 30S	$\epsilon 0$	$\epsilon 1$	$\epsilon 7$	$\epsilon 14$	$\epsilon 21$	$\epsilon 28$	Média	Desvio	Máx.
CP2	0,000	-0,403	-1,464	-1,432	-1,559	-1,347	-1,186	0,167	0,201
CP3	0,000	-0,545	-1,512	-1,456	-1,600	-1,137	-1,196	0,177	
CP5	0,000	-0,569	-1,493	-1,455	-1,645	-1,237	-1,220	0,201	
CP6	0,000	-0,480	-1,475	-1,381	-1,527	-1,136	-1,154	0,135	
Média do dia	0,000	-0,499	-1,486	-1,431	-1,583	-1,214	-1,019	-	
Médias umidade	53,40	54,84	55,17	56,50	56,47	58,18	55,57	-	
Médias temperatura	21,10	20,96	21,67	22,07	22,05	21,22	21,62	-	

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

REF 50S	$\epsilon 0$	$\epsilon 1$	$\epsilon 7$	$\epsilon 14$	$\epsilon 21$	$\epsilon 28$	Média	Desvio	Máx.
CP3	0,000	-0,206	-0,419	-0,383	-0,396	-0,403	-0,344	0,055	0,055
CP5	0,000	-0,162	-0,363	-0,382	-0,396	-0,405	-0,325	0,037	
CP6	0,000	-0,158	-0,377	-0,408	-0,419	-0,436	-0,340	0,051	
Média do dia	0,000	-0,175	-0,386	-0,391	-0,404	-0,414	-0,288	-	
Médias umidade	55,22	56,31	56,83	54,90	55,75	55,80	55,43	-	
Médias temperatura	22,13	21,72	21,20	21,87	22,01	22,48	21,87	-	

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

C011	$\epsilon 0$	$\epsilon 1$	$\epsilon 7$	$\epsilon 14$	$\epsilon 21$	$\epsilon 28$	Média	Desvio	Máx.
CP2	0,000	-0,475	-0,151	-0,211	-0,173	-0,489	-0,300	0,116	0,116
CP3	0,000	-0,480	-0,172	-0,225	-0,191	-0,506	-0,315	0,010	
CP4	0,000	-0,480	-0,171	-0,203	-0,187	-0,507	-0,309	0,035	
CP5	0,000	-0,474	-0,159	-0,222	-0,178	-0,508	-0,308	0,045	
CP6	0,000	-0,483	-0,166	-0,221	-0,177	-0,515	-0,312	0,009	
Média do dia	0,000	-0,478	-0,164	-0,216	-0,181	-0,505	-0,309	-	
Médias umidade	0,000	-0,475	-0,211	-0,173	-0,489	-0,300	0,116	-	
Médias temperatura	22,13	21,72	21,20	21,87	22,01	22,48	21,87	-	

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

C013	ε 0	ε 1	ε 7	ε 14	ε 21	ε 28	Média	Desvio	Máx.
CP2	0,000	-0,463	-0,161	-0,224	-0,123	-0,329	-0,260	0,011	0,0213
CP3	0,000	-0,432	-0,125	-0,200	-0,199	-0,353	-0,262	0,009	
CP4	0,000	-0,447	-0,136	-0,191	-0,184	-0,380	-0,268	0,003	
CP5	0,000	-0,450	-0,131	-0,201	-0,148	-0,429	-0,272	0,001	
CP6	0,000	-0,465	-0,149	-0,212	-0,149	-0,484	-0,292	0,021	
Média do dia	0,000	-0,452	-0,141	-0,206	-0,160	-0,395	-0,271	-	
Médias umidade	0,000	-0,475	-0,211	-0,173	-0,489	-0,300	0,116	-	
Médias temperatura	22,13	21,72	21,20	21,87	22,01	22,48	21,87	-	

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

C070	ε 0	ε 1	ε 7	ε 14	ε 21	ε 28	Média	Desvio	Máx.
CP1	0,000	-0,036	0,087	-0,163	-0,458	-0,091	-0,132	0,015	0,015
CP2	0,000	-0,042	0,116	-0,145	-0,443	-0,058	-0,114	0,003	
CP3	0,000	-0,034	0,105	-0,149	-0,445	-0,068	-0,118	0,001	
CP4	0,000	-0,022	0,102	-0,155	-0,442	-0,066	-0,117	0,000	
CP5	0,000	-0,027	0,103	-0,150	-0,431	-0,056	-0,112	0,004	
CP6	0,000	-0,019	0,111	-0,143	-0,424	-0,065	-0,108	0,009	
Média do dia	0,000	-0,030	0,104	-0,151	-0,441	-0,067	-0,117	-	
Médias umidade	0,000	-0,475	-0,211	-0,173	-0,489	-0,300	0,116	-	
Médias temperatura	22,13	21,72	21,20	21,87	22,01	22,48	21,87	-	

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

C200	ε 0	ε 1	ε 7	ε 14	ε 21	ε 28	Média	Desvio	Máx.
CP4	0,000	-0,115	0,009	-0,151	-0,424	-0,063	-0,149	0,054	0,427
CP5	0,000	-0,013	0,111	-0,130	-0,404	-0,031	-0,094	0,427	
CP6	0,000	0,154	0,285	-0,160	-0,435	-0,059	-0,043	0,427	
Média do dia	0,000	0,009	0,135	-0,147	-0,421	-0,051	-0,095	-	
Médias umidade	0,000	-0,475	-0,211	-0,173	-0,489	-0,300	0,116	-	
Médias temperatura	22,13	21,72	21,20	21,87	22,01	22,48	21,87	-	

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

PP011	ε 0	ε 1	ε 7	ε 14	ε 21	ε 28	Média	Desvio	Máx.
CP1	0,000	-0,203	-0,124	-1,124	-0,833	-1,087	-0,596	0,064	0,108
CP2	0,000	-0,252	-0,104	-1,192	-0,849	-1,189	-0,640	0,108	
CP5	0,000	-0,297	-0,040	-1,221	-0,860	-1,067	-0,630	0,099	
CP6	0,000	-0,276	0,000	-1,225	-0,853	-1,065	-0,616	0,084	
Média do dia	0,000	-0,257	-0,067	-1,191	-0,849	-1,102	-0,532	-	
Médias umidade	50,25	50,20	52,30	55,55	57,65	53,40	53,08	-	
Médias temperatura	21,40	21,90	21,00	21,40	21,55	21,10	21,41	-	

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

PP013	ε 0	ε 1	ε 7	ε 14	ε 21	ε 28	Média	Desvio	Máx.
CP4	0,000	-0,105	-0,669	-0,641	-0,775	-1,060	-0,615	0,089	0,101
CP5	0,000	-0,165	-0,615	-0,781	-0,701	-1,052	-0,627	0,101	
CP6	0,000	-0,117	-0,591	-0,851	-0,644	-0,949	-0,598	0,073	
Média do dia	0,000	-0,129	-0,625	-0,758	-0,707	-1,020	-0,526	-	
Médias umidade	50,25	50,20	52,30	55,55	57,65	53,40	53,08	-	
Médias temperatura	21,40	21,90	21,00	21,40	21,55	21,10	21,41	-	

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

PVA011	ε 0	ε 1	ε 7	ε 14	ε 21	ε 28	Média	Desvio	Máx.
CP4	0,000	-0,453	-0,129	-0,202	-0,206	-0,703	-0,339	0,000	0,002
CP5	0,000	-0,461	-0,122	-0,199	-0,194	-0,727	-0,341	0,002	
CP6	0,000	-0,461	-0,089	-0,202	-0,175	-0,760	-0,337	0,001	
Média do dia	0,00	-0,46	-0,11	-0,20	-0,19	-0,73	-0,34	-	
Médias umidade	54,17	55,29	57,24	54,75	55,77	55,63	55,47	-	
Médias temperatura	21,40	21,90	21,00	21,40	21,55	21,10	21,41	-	

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

PVA013	ε 0	ε 1	ε 7	ε 14	ε 21	ε 28	Média	Desvio	Máx.
CP1	0,000	-0,233	-0,140	-0,171	-0,173	-0,167	-0,177	0,011	0,011
CP2	0,000	-0,239	-0,124	-0,157	-0,159	-0,116	-0,159	0,007	
CP3	0,000	-0,227	-0,137	-0,139	-0,145	-0,124	-0,155	0,011	
CP4	0,000	-0,235	-0,137	-0,151	-0,160	-0,130	-0,163	0,003	
CP5	0,000	-0,251	-0,143	-0,174	-0,171	-0,141	-0,176	0,011	
CP6	0,000	-0,246	-0,119	-0,163	-0,162	-0,127	-0,163	0,002	
Média do dia	0,000	-0,239	-0,133	-0,159	-0,162	-0,134	-0,165	-	
Médias umidade	54,17	55,29	57,24	54,75	55,77	55,63	55,47	-	
Médias temperatura	21,40	21,90	21,00	21,40	21,55	21,10	21,41	-	

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

AI	ε 0	ε 1	ε 7	ε 14	ε 21	ε 28	Média	Desvio	Máx.
CP1	0,000	-0,025	-1,064	-0,655	-2,576	-0,696	-1,003	0,107	0,130
CP2	0,000	-0,245	-1,081	-0,803	-2,604	-0,697	-1,086	0,024	
CP3	0,000	-0,455	-1,201	-1,048	-2,761	-0,735	-1,240	0,130	
Média do dia	0,000	-0,242	-1,116	-0,835	-2,647	-0,709	-1,110	-	
Médias umidade	54,17	55,29	57,24	54,75	55,77	55,63	55,47	-	
Médias temperatura	21,40	21,90	21,00	21,40	21,55	21,10	21,41	-	

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

APÊNDICE 03 – DADOS DAS RUPTURAS À COMPRESSÃO

Form.	REF	REF 30S	REF 50S	C011	C013	C070	C200	PP 011	PP 013	PVA 011	PVA 013	AI
CP1	47,35	45,12	28,12	47,11	47,73	48,62	43,46	49,42	49,54	54,33	52,11	16,98
CP2	50,04	47,53	27,12	50,31	48,28	48,31	47,03	48,8	46,86	54,08	54,14	15,45
CP3	50,47	47,36	27,6	40,88	47,22	46,7	45,45	52,35	49,06	53,17	53,54	16,67
CP4	48,41	46,81	28,32	48,94	49,81	46,89	46,72	49,76	47,58	54,09	51,6	17,6
CP5	51,72	50,09	27,4	48,55	45,5	50,75	44,23	50,55	48,15	58,28	53,01	16,17
CP6	50,08	49,52	27,76	50,07	46,36	46,1	48,02	52,27	47,82	57,89	51,17	15,54
Média	49,68	47,74	27,72	47,64	47,48	47,90	45,82	50,53	48,17	55,31	52,60	16,40

APÊNDICE 04 – DADOS DAS RUPTURAS À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Form.	REF	REF 30S	REF 50S	C011	C013	C070	C200	PP 011	PP 013	PVA 011	PVA 013	AI
CP1	7,10	6,31	7,35	8,58	8,56	10,05	8,72	9,59	9,29	12,38	10,87	3,45
CP2	6,31	9,00	8,19	9,87	10,85	9,58	7,90	9,13	9,57	12,28	11,11	5,19
CP3	6,67	6,81	6,25	9,36	9,53	9,59	6,43	8,03	8,61	10,56	10,45	5,41
Média	6,69	7,37	7,26	9,27	9,65	9,74	7,68	8,92	9,16	11,74	10,81	4,68